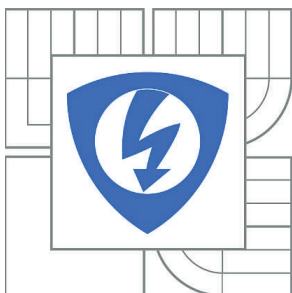


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

DISTRIBUOVANÉ OPTICKÉ VLÁKNOVÉ SENZORY

DISTRIBUTED OPTICAL FIBER SENSORS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

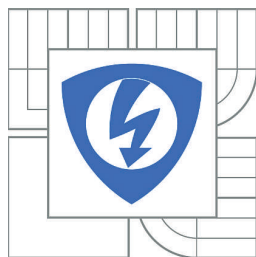
Bc. JIŘÍ HYNEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR MÜNSTER

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 Hynek

ID: 109661

Ročník: 2

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Distribuované optické vláknové senzory

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce je detailně prozkoumat možnosti využití optického vlákna jako senzor. Student se zaměří na možnosti detekce akustických vibrací podél rozprostřeného vlákna a navrhne vhodné systémy schopné detekce na vzdálenost až 100 km s možností lokalizace vzniklé události. Výsledné modely budou ověřeny měřením, případně simulací.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Sakairi, Y.; Matsuura, S.; Adachi, S.; Koyamada, Y.; , "Prototype double-pulse BOTDR for measuring distributed strain with 20-cm spatial resolution," SICE Annual Conference, 2008 , vol., no., pp.1106-1109, 20-22 Aug. 2008

[2] Youfu Geng; Xuejin Li; Xiaoling Tan; Yuanlong Deng; Yongqin Yu; , "High-Sensitivity Mach–Zehnder Interferometric Temperature Fiber Sensor Based on a Waist-Enlarged Fusion Bitaper," Sensors Journal, IEEE , vol.11, no.11

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 29.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Petr Münster

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

Optická vlákna jsou v dnešní době jednou z neodmyslitelných částí telekomunikačních sítí, jelikož slouží pro přenos informací na velké vzdálenosti.

Tato práce využívá optická vlákna ne jako nosiče, ale přímo jako zdroje informací, přesněji jako senzory k zjišťování fyzikálních vlivů působících na konkrétní optické vlákno, které je standardně využíváno pro telekomunikační účely.

K získání vhodných informací o působících vlivech na optické vlákno je využito lineárních a nelineárních vlastností vlákna.

KLÍČOVÁ SLOVA

Optické vlákno, nelineární jevy v optických vláknech, Rayleighův rozptyl, Brillouinův rozptyl, optické vláknové senzory, OptSim.

ABSTRACT

Nowadays, optical fibers are one of important parts of computer networks, especially for their ability to transfer information for long distance.

This thesis doesn't utilize optical fibers as carriers, but as sources of information, specifically as sensors intended to detect physical effects acting on the optical fiber, which is usually used for telecommunication purposes.

Linear and nonlinear properties of the fiber are used to gain information about acting effects on the optical fiber.

KEYWORDS

Optical fiber, nonlinear properties in optical fibers, Rayleigh scattering, Brillouion scattering, optical fiber sensors, OptSim.

HYNEK, J. Rozprostřené optické vláknové senzory na dlouhé vzdálenosti. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací, 2013. 95 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Petr Münster

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Rozprostřené optické vláknové senzory na dlouhé vzdálenosti 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 Ing. Petru Münsterovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	1
1 Optický světelný paprsek	2
1.1 Definice světla	2
1.2 Základní vztahy pro světelný paprsek	3
1.2.1 Index lomu	3
1.2.2 Základní popis periodického vlnění.....	3
2 Vibrace	5
2.1 Projevy kmitání v různých prostředích.....	5
2.1.1 Akustická vlna	5
2.2 Vlivy akustických vibrací na prostředí	6
3 Optické vlákno	7
3.1 Dělení optických vláken	7
3.1.1 Vlákná mnohovidová s konstantním indexem lomu jádra a skokovou změnou indexu lomu pláště.....	7
3.1.2 Vlákná mnohovidová s proměnným indexem lomu v příčném řezu vláknem.....	8
3.1.3 Vlákná jednovidová s konstantním indexem lomu jádra a skokovou změnou indexu lomu pláště.....	8
3.1.4 Dělení jednovidových vláken podle doporučení ITU-T	9
3.2 Podmínky šíření světelného paprsku optickým vláknem	9
3.2.1 Totální odraz paprsku	10
3.2.2 Numerická apertura NA.....	10
3.2.3 Normalizovaná frekvence V	11
3.2.4 Mezní vlnová délka λ_{\max}	11
3.3 Lineární parametry optického vlákna	12
3.3.1 Útlum optického vlákna.....	12
3.3.2 Disperze	12
3.3.3 Ohybové ztráty.....	15
3.3.4 Rayleighův rozptyl.....	16

3.3.5	Mieho rozptyl.....	17
3.4	Nelineární jevy vznikající v optickém vlákně	17
3.4.1	Brillouinův rozptyl SBS (Stimulated Brillouin Scattering).....	18
3.4.2	Ramanův rozptyl SRS (Stimulated Raman Scattering)	20
3.4.3	Křížová fázová modulace XPM (Cross-Phase modulation).....	21
3.4.4	Čtyřvlnné směšování FWM (Four-Wave Mixing)	22
4	Optické vláknové senzory - OVS	24
4.1	Obecné zapojení OVS.....	24
4.2	Dělení optických vláknových snímačů	26
4.2.1	Amplitudové optické vláknové senzory	27
4.2.2	Fázové optické vláknové senzory	28
4.2.3	Polarizační optické vláknové senzory.....	28
4.3	Rozprostřené vláknové senzory	29
4.3.1	OTDR (Optical Time Domain Reflectometry).....	29
4.3.2	POTDR (Polarization Time Domain Reflectometry)	31
4.3.3	BOTDR (Brillouin Time Domain Reflectometry).....	32
5	Uložení optického kabelu	33
5.1	Pevné uložení svazku optických vláken	33
5.2	Pevné uložení jednoho optického vlákna.....	34
6	Návrh vlastního řešení	36
6.1	Základní útlumy optických vláken	36
6.2	Řešení pomocí polarizovaného Rayleighova rozptylu	36
6.2.1	Popis hlavních bloků POTDR zapojení	36
6.2.2	Blokové zapojení měřicí soustavy Rayleighova rozptylu.....	37
6.2.3	Popis funkce a měření navržených měřících soustav využívající Rayleighova rozptylu	39
6.3	Řešení pomocí polarizovaného Brillouinova rozptylu	40
6.3.1	Popis hlavních bloků BOTDR zapojení.....	40
6.3.2	Blokové zapojení měřicí soustavy pro zjištění Brillouinova rozptylu	41
6.3.3	Srovnání navržených blokových měřících systémů.....	44
6.4	Výpočet přibližného dosahu měřícího systému	45
6.4.1	Základní výpočty vlastností Brillouinova rozptylu	46

7 Simulace	47
7.1 OptSim v. 5.2	47
7.1.1 Hlavní obrazovka OptSim v. 5.2	47
7.1.2 Vytvoření nového projektu	48
7.2 MATLAB.....	50
7.2.1 Hlavní obrazovka MATLAB	50
7.2.2 Vytvoření nového scriptu.....	51
7.2.3 Základní operace	51
7.3 Vlastní simulace.....	52
7.3.1 Základní zapojení.....	52
7.3.2 Popis funkce použitých bloků.....	53
7.4 Blok CCM.....	55
7.4.1 Vytvoření bloku CCM	55
7.4.2 Profil SBS_n	58
7.4.3 Profil SBS_mikrodeformace.....	59
7.4.4 Profil SBS_teplota	60
7.4.5 Společná část kódu.....	61
7.5 Výstup simulací	62
7.5.1 Porovnání grafů OptSim a MATLAB na vstupu CCM	63
7.5.2 Porovnání grafů OptSim a MATLAB na výstupu CCM	65
7.5.3 Konec optické trasy	67
Závěr	69
Literatura	71
Seznam příloh	73

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1:	Znázornění elektromagnetického vlnění [13].	2
Obr. 1.2:	Základní parametry periodické vlny [5].	3
Obr. 2.1:	Šíření vlny prostředím.	5
Obr. 2.2:	Přibližný průběh útlumu optického vlákna OTDR [15].	6
Obr. 3.1:	Mnohovidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu [1].	7
Obr. 3.2:	Mnohovidové vlákno s proměnným indexem lomu [1].	8
Obr. 3.3:	Jednovidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu pláště [1].	8
Obr. 3.4:	Šíření světelného paprsku v optickém vlákne [7].	10
Obr. 3.5:	Vliv disperze na přenášený optický signál [2].	13
Obr. 3.6:	Šíření světelného impulzu různými druhy vláken [1].	14
Obr. 3.7:	Ukázka polarizační vidové disperze [1].	15
Obr. 3.8:	Brillouinův posuv [8].	19
Obr. 3.9:	Vliv Brillouinova rozptylu na přenášený signál [8].	20
Obr. 3.10:	Vliv křížové fázové modulace [4].	22
Obr. 3.11:	Vliv čtyřvlenného směšování [4].	23
Obr. 4.1:	Blokové zapojení OVS 1 [3].	24
Obr. 4.2:	Blokové zapojení OVS 2.	25
Obr. 4.3:	Blokové zapojení OTDR [12].	30
Obr. 4.4:	Blokové zapojení POTDR.	31
Obr. 4.5:	Blokové zapojení BOTDR.	32
Obr. 5.1:	Uložení svazku optických kabelů	33
Obr. 5.2:	Uložení optického kabelu	34
Obr. 6.1:	Blokové zapojení k měření Rayleighova rozptylu 1.	37
Obr. 6.2:	Blokové zapojení k měření Rayleighova rozptylu 2.	38
Obr. 6.3:	Blokové zapojení k měření Brillouinova rozptylu 1.	41
Obr. 6.4:	Blokové zapojení k měření Brillouinova rozptylu 2.	42
Obr. 6.5:	Blokové zapojení k měření Brillouinova rozptylu 3.	43
Obr. 7.1:	Hlavní obrazovka OptSim v. 5.2.	47
Obr. 7.2:	Nový projekt.	48
Obr. 7.3:	Volba druhu nového projektu.	49

Obr. 7.4:	Nastavení simulace.	49
Obr. 7.5:	Hlavní obrazovka MATLAB.	50
Obr. 7.6:	Nový script.	51
Obr. 7.7:	Testovací zapojení.	52
Obr. 7.8:	Nastavení bloku laslor1.	53
Obr. 7.9:	Pozorovatelné průběhy modulem probe.	54
Obr. 7.10:	Profil modulu CCM.	55
Obr. 7.11:	Nastavení vstupů a výstupů.	56
Obr. 7.12:	Nastavení parametrů.	56
Obr. 7.13:	Přístup k matematickému kódu.	57
Obr. 7.14:	Závislost Brillouinovy frekvence na indexu lomu.	58
Obr. 7.15:	Závislost Brillouinovy frekvence na mikrodeformaci [16].	59
Obr. 7.16:	Závislost Brillouinovy frekvence na teplotě [16].	60
Obr. 7.17:	Graf modu probe2 – klasické zobrazení.	63
Obr. 7.18:	Graf modu probe2 – Lorentzian zobrazení.	63
Obr. 7.19:	Graf modu probe2 – Rectangular zobrazení.	64
Obr. 7.20:	Graf modu CCM1 – MATLAB vstupní signál.	64
Obr. 7.21:	Graf modu probe3 – klasické zobrazení.	65
Obr. 7.22:	Graf modu probe3 – Lorentzian zobrazení.	65
Obr. 7.23:	Graf modu probe2 – Rectangular zobrazení.	66
Obr. 7.24:	Graf modu CCM1 – MATLAB výstupní signál.	66
Obr. 7.25:	Graf modu probe4 – klasické zobrazení.	67
Obr. 7.26:	Graf modu probe4 – Lorentzian zobrazení.	67
Obr. 7.27:	Graf modu probe4 – Rectangular zobrazení.	68

ÚVOD

Rozproštěné optovláknové senzory se vyvíjí už od doby, kdy bylo vynalezeno optické vlákno. Tehdy se předpokládalo, že tyto technologie dojdou velkého rozmachu, a to zejména v průmyslu. Ačkoliv zájem nenaplnil očekávání, vývoj nepřestal.

V současné době jsou optovláknové senzory nenahraditelné v řadě aplikací - například gyroskop využívá optického vlákna jako senzoru pohybu. Stejně fungující senzor, ale klasické konstrukce, nedosahuje zdaleka takovýchto parametrů ani výsledků získaných optovláknovým senzorem.

Senzory využívající optická vlákna se dnes postupně rozšiřují do nejrůznějších technických oblastí - například letecké inženýrství, automatizace, kontrola výroby, biomedicína, chemie, telekomunikace, stavební průmysl a další.

Převážná funkce těchto senzorů je zajištění bezpečného chodu, vyhlášení včasného varování a zaznamenávání vlivů působících na zkoumaný objekt.

Tato práce je zaměřena na vlastnosti a využití skleněných optických vláken jako senzorů, které jsou schopny měřit pomocí stávajícího datového vedení uloženého v zemi okolní parametry působící na celé délce tohoto vedení.

Postupně jsou zde uvedena základní dělení a parametry optických vláken - přesněji vlastnosti, které se mohou měnit vlivem působení vnějších fyzikálních veličin, jako jsou lineární a nelineární parametry optických vláken. Do této skupiny spadají i rozptyly vznikající za určitých podmínek v optickém vlákne, a právě pomocí těchto určitých rozptylů je možné monitorovat určitý druh působení (teplota, tlak) podél celého vlákna.

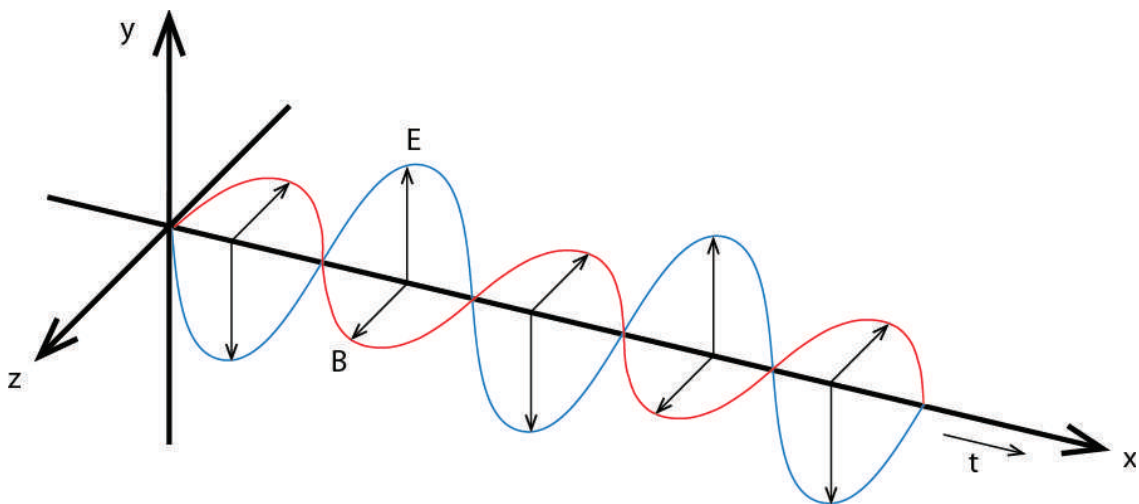
V závěru této práce je navrženo několik měřících aparátů a jejich simulace, využívající rozptýleného záření, k měření vibrací (tlaku) a teploty působících na telekomunikační optický kabel.

1 OPTICKÝ SVĚTELNÝ PAPERSEK

Je tvořen určitou částí světelného spektra, která je využívána pro přenos informace v optickém vlákně. Optický světelný paprsek je tedy možné popsat stejnými vzorci jako obecné světlo neboli elektromagnetické záření.

1.1 Definice světla

Jedná se o elektromagnetické vlnění s velmi vysokou frekvencí. To ovšem neznamená, že neexistují další druhy elektromagnetického vlnění, například radiové vlny, infra záření, UV záření a další. To všechno jsou elektromagnetická vlnění odlišující se svou vlnovou délkou a frekvencí [13].



Obr. 1.1: Znáznornění elektromagnetického vlnění [13].

Způsob šíření elektromagnetického vlnění je naznačen na obr. 1.1. Vlna je tvořena dvěma navzájem kolnými složkami, modře znázorněná složka odpovídá elektrické části E a červeně znázorněná složka odpovídá magnetické části B elektromagnetického vlnění šířícího se prostorem v určitý čas t [13].

Světlo je možné popsat pomocí dvou úhlů pohledu - vlnovou optikou nebo kvantovou fyzikou. Důvodem dvou možných vyjádření je ten, že světlo má rozsáhlé frekvenční spektrum a záření může přenášet různě velikou energii. Právě tato energie daného záření určuje, jakým způsobem se na záření bude nahlížet, jestli se blíží k vlnovému nebo částicovému chování. Tyto popisy se navzájem nevyklučují, ale záleží na výhodnosti použití vzhledem k druhu aplikace využívající světelného záření [13].

Rychlost šíření světla ve vakuu je definována konstantou $c = 299792458$ m/s, většina literatury udává zaokrouhlenou hodnotu konstanty $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. Rychlost šíření světla v optickém vlákně lze vypočítat pomocí úpravy vzorce (1.1) $v = 203389830$ m/s [13].

1.2 Základní vztahy pro světelný paprsek

Těmito následujícími vztahy je možné popsat chování obecného světelného paprsku [5].

1.2.1 Index lomu

Vyjadřuje poměr mezi rychlostí světla šířícího se vakuem a rychlostí světla šířícího se v jiném prostředí, než je vakuum [5].

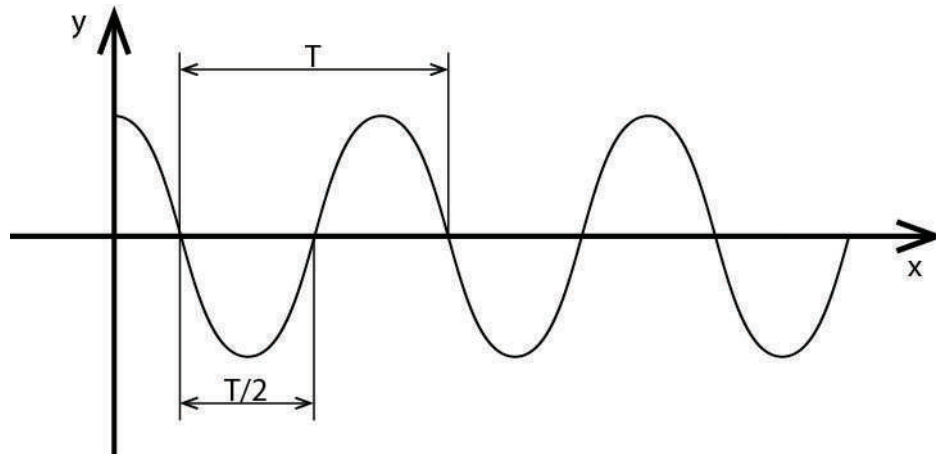
$$n = \frac{c}{v} \quad [-] \quad (1.1)$$

Jelikož se jedná o poměrovou hodnotu, nemá vlastní veličinu. Rychlost světla c se udává v jednotce [m/s] a rychlost šíření paprsku v určité látce v se také udává v jednotce [m/s], dojde k vykrácení jednotek. Z tohoto důvodu je n bezrozměrné a nabývá hodnot větších jak 1, protože v (rychlost šíření světelného paprsku v látce) nemůže být nikdy větší jak c (rychlost šíření světla ve vakuu) [5].

Hodnotu n pro určité látky je možné nalézt v matematickofyzikálních tabulkách, pro ukázkou hodnota n pro vzduch = 1,003, pro sklo = 1,52 – 1,59 (v závislosti na druhu skla), pro vodu = 1,33 a pro optické vlákno = 1,46 – 1,49.

1.2.2 Základní popis periodického vlnění

Na obr. 1.2 je jedno z možných znázornění popisu periodického signálu [5].



Obr. 1.2: Základní parametry periodické vlny [5].

Popis jednotlivých os v obr. 1.2 se volí v závislosti na způsobu využití daného znázornění. Osa y může vyjadřovat intenzitu zkoumané veličiny a osa x může vyjadřovat čas a znázorňovat tak vývoj zkoumaného signálu v čase [5].

Záleží, jakým způsobem na vlnu nahlížíme, viz předchozí kapitola. Obecně ji lze popsat takto:

Časová perioda T – značí, jak dlouhou dobu trvá v [s], než daná vlna urazí jednu svoji vlnovou délku. Veličina ω = úhlová rychlost v [rad/s] [5].

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad [s] \quad (1.2)$$

Vlnová délka λ – značí délku vlny v [m], kterou vlna urazí během jedné periody [5].

$$\lambda = c \cdot T \quad [m] \quad (1.3)$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [m] \quad (1.4)$$

Frekvence vlnění f – je udávána v [Hz] a je možné ji považovat za alternativní popsání parametrů vlnění časové periody T a vlnové délky λ , jak je patrné z následujících vzorců [5]:

$$f = \frac{1}{T} \quad [Hz] \quad (1.5)$$

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad [Hz] \quad (1.6)$$

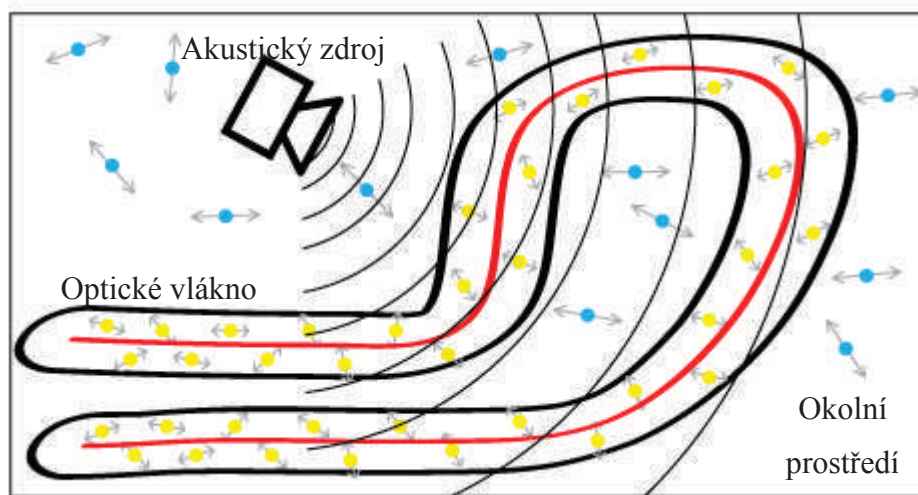
2 VIBRACE

Pojmem vibrace se rozumí mechanické kmitání tuhých těles a chvění pružných těles.

Všechny látky (pevné, kapalné, plynné) jsou složeny z atomů, které vibrují, přesněji kmitají kolem své rovnovážné osy. Čím má látka pevnější strukturu, tím je její vnitřní kmitání méně patrné.

Vibrace je možné popsat jejich frekvencí, amplitudou, rychlostí, směrem šíření a časovým průběhem [13].

2.1 Projevy kmitání v různých prostředích



Obr. 2.1: Šíření vlny prostředím.

Kmitání prostředí je možné do jisté míry ovlivnit dodáním energie, například zahřátí látky nebo jejím ochlazením. U metalických vodičů elektrické energie dochází s rostoucí teplotou ke zvětšení vnitřního odporu, nebo při dostatečném podchlazení nastává u vodičů takzvaná supravodivost, vodič má minimální odpor.

Na obr. 2.1 je znázorněno optické vlákno ve vzduchu, na které působí akustická vlna. Při tomto ději dochází k částečnému přenosu energie mezi akustickou vlnou a strukturou optického vlákna [15]. Modré a žluté body na obr. 2.1 znázorňují kmitající molekuly prostředí, červená trasa vyznačuje prostor, kterým se šíří optický paprsek ve vlákně. Působením vnější energie (akustickým signálem, teplotou) dojde ke zvýšení kinetické energie částic, a tím dochází k horšímu průchodu optického paprsku vláknem.

2.1.1 Akustická vlna

Jedná se o mechanické vlny s malou amplitudou a určitou frekvencí šířící se v pružném prostředí. V plynech a kapalinách se akustická vlna šíří jako podélné vlnění, v pevných látkách se akustická vlna může šířit jak podélné, tak i příčné vlnění [13] [14].

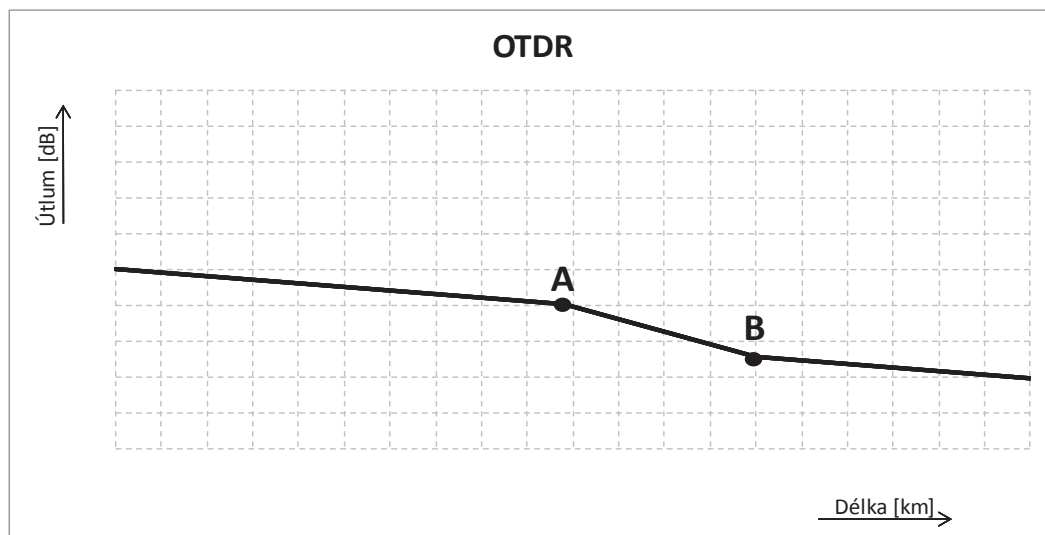
Akustické vlny je možné dělit do čtyř základních skupin:

- Infrazvuk = frekvence pod 20 Hz
- Slyšitelný zvuk = frekvence od 20 Hz do 20 kHz
- Ultrazvuk = frekvence od 20 kHz do 1 GHz
- Hyperzvuk = frekvence nad 1 GHz

2.2 Vlivy akustických vibrací na prostředí

Akustická vibrace má kinetickou energii, kterou získala při svém vzniku od zdroje akustického signálu. Touto energií poté ovlivňuje prostředí, kterým se šíří.

V literatuře [15] je zdokumentován pokus, pozorující vliv různých akustických signálů na optické vlákno. Měřením bylo prokázáno, že akustický signál o dostatečné energii je schopen pozměnit strukturu optického vlákna v místě působení akustického signálu.



Obr. 2.2: Přibližný průběh útlumu optického vlákna OTDR [15].

Na obr. 2.2 je přibližně zobrazen naměřený průběh z [15] metodou OTDR, která bude popsána v dalších kapitolách. Z tohoto průběhu je zřejmé, že pokud je akustický signál dostatečně silný, dojde k ovlivnění chování optického vlákna, a to nárůstem vnitřního útlumu.

Zvýšení útlumu je způsobeno částečným předáním energie z akustické vlny do struktury optického vlákna. Takto ovlivněné částice vlákna mají vyšší energii a více kmitají kolem své rovnovážné polohy, a tím více znemožňují průchodu světla optickým vláknem.

Měření bylo prováděno pro konstantní akustický signál působící po celou dobu měření. Provedeným měřením v [15] bylo zjištěno, že s rostoucí frekvencí akustického signálu od 20 kHz výše se energie akustického signálu lépe přenáší do struktury optického vlákna, a je tak možné tento vliv měřit klasickou metodou OTDR.

3 OPTICKÉ VLÁKNO

Optické vlákno je přenosové médium sloužící k přenášení optického paprsku mezi vysílačem a přijímačem. Pracuje na podobné myšlence jako starší metalické vedení, nicméně u optického vlákna nejsou nosiči informace elektrony, ale fotony šířící se jádrem vlákna, které může být tvořeno sklem nebo speciálním plastem.

Z důvodu změny nosiče informací mají optická vlákna daleko širší možnosti využití než metalická vedení. Oproti svým předchůdcům nejsou dobře odposlouchatelné, je možné přenést informaci na větší vzdálenost a při vhodné úpravě je lze využít i jako senzorový systém.

3.1 Dělení optických vláken

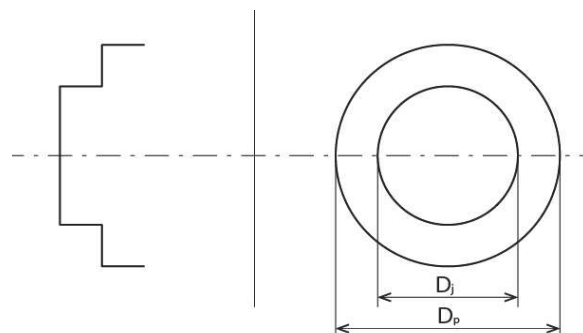
Základní dělení optických vláken je možné provádět dle samotné konstrukce optického vlákna, a to na tři hlavní typy [1] :

3.1.1 Vlákná mnohovidová s konstantním indexem lomu jádra a skokovou změnou indexu lomu pláště

Tato vlákna mají poměrně jednoduchou výrobu i následnou manipulaci.

Na první pohled je možné rozeznání, a to díky větším průměrům jak samotného jádra $D_j = 50-200 \mu\text{m}$, tak i pláště $D_p = 120-300 \mu\text{m}$. Útlum tohoto vlákna se pohybuje v rozmezí $5-20 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ [1].

Na obr. 3.1 je možné znázornění tohoto vlákna.



Obr. 3.1: Mnohovidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu [1].

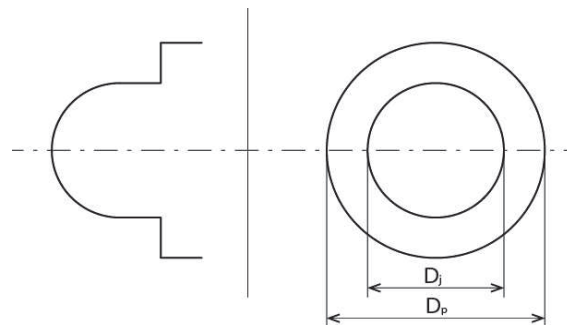
Tento druh vláken se nejvíce využívá pro komunikaci na krátké vzdálenosti, a to kvůli velkému útlumu.

3.1.2 Vlákna mnohovidová s proměnným indexem lomu v příčném řezu vláknem

Výroba tohoto druhu vlákna je složitější než výroba vlákna v kapitole 3.1.1, zejména kvůli docílení postupné změny indexu lomu.

Vlákna tohoto typu jsou normalizována podle ITU-T s parametry $D_j = 50 \mu\text{m}$ a $D_p = 125 \mu\text{m}$. Útlum takového vlákna je $2,5 - 5 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ [1].

Vlákno je naznačeno na obr. 3.2.

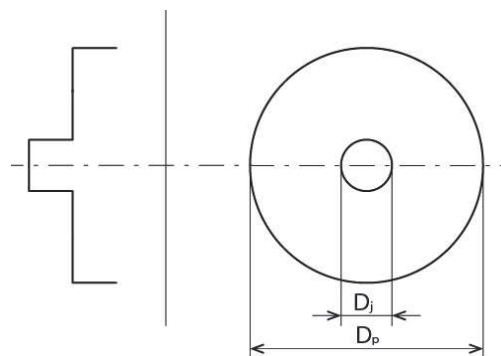


Obr. 3.2: Mnohovidové vlákno s proměnným indexem lomu [1].

3.1.3 Vlákna jednovidová s konstantním indexem lomu jádra a skokovou změnou indexu lomu pláště

Označení vlákna jako jednovidového značí, že vláknem prochází pouze jeden světelný vid.

Z tohoto důvodu musí být jádro optického vlákna přizpůsobené, a to na $D_j = 7 - 9 \mu\text{m}$ a $D_p = 125 \mu\text{m}$, které je shodné s vláknem z kapitoly 3.1.2. Hodnota útlumu u jednovidového vlákna klesá pod hodnotu $0,2 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ [1].



Obr. 3.3: Jednovidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu pláště [1].

Tento druh vlákna je nejvíce využíván pro komunikaci na dlouhé vzdálenosti, a to díky nízké hodnotě útlumu.

3.1.4 Dělení jednovlákových vláken podle doporučení ITU-T

Toto rozdělení optických vláken zohledňuje materiálové vlastnosti použité pro výrobu jednotlivých druhů optických vláken [1] [9].

Vlákno typu G.652 (a) – jedná se o standardní jednovlákové vlákno s rozměry jádra a pláště 9/125 μm , s útlumem 0,2 dB/km pro laser 1550 nm a pro laser 1310 nm s útlumem do 0,4 dB/km [1] [9].

Vlákno typu G.652 (c) – lze používat ve všech dostupných přenosových pásmech, i v pásmu 1360 – 1460 nm, kde je u klasického vlákna G.652 (a) zvýšený útlum díky iontům vody [1] [9].

Vlákno typu G.652 (d) – je možné kombinovat se všemi vlákny G.652 [1] [9].

Vlákno typu G.653 – vyvinuto pro dálkové trasy s potlačenou chromatickou disperzí, pracující pouze na vlnové délce 1550 nm. Při aplikaci vlnového multiplexu bylo zjištěno, že tato vlákna vytváří parazitní kanály a přeslechy [1] [9].

Vlákno typu G.654 – vycházejí z vláken typu G.652 a pracují na vlnové délce 1550 nm s útlumem 0,16 dB/km. Používají se výhradně pro extrémně dlouhé optické trasy bez nutnosti použití zesilovače na trase (podmořské kabely) [1] [9].

Vlákno typu G.655 – hlavní rozdíl je v posunutě nenulové disperzi pracující na vlnové délce 1550 nm a v útlumu, jehož hodnota je 0,2 dB/km. Malá disperze zajišťuje využití vláken pomocí technologie DWDM pro vysokou přenosovou rychlost 40 Gbps [1] [9].

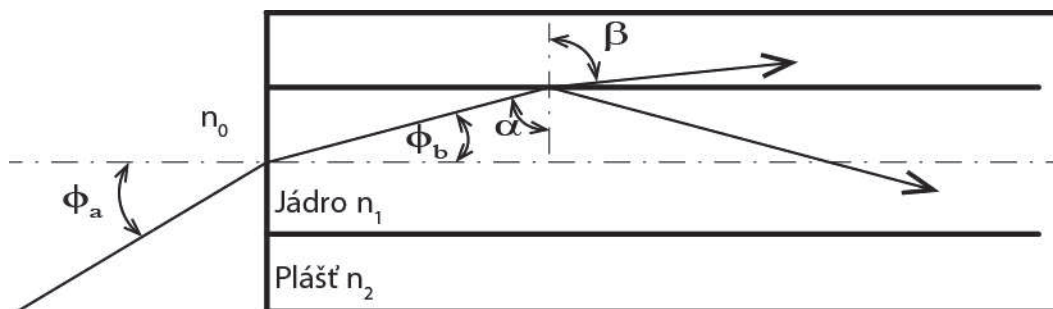
Vlákno typu G.656 – je dost podobné typu G.655, přenáší paprsky v pásmu 1460 – 1625 nm, je určeno pro systémy využívající vlnového multiplexu [1] [9].

Vlákno typu G.657.A – určené pro vnitřní kabeláže pro optické přístupové sítě [1] [9].

Vlákno typu G.657.B – optický kabel odolný mikroohybům do poloměru 5 mm [1] [9].

3.2 Podmínky šíření světelného paprsku optickým vláknem

Optické vlákno je ve své podstatě válcový vlnovod vyhotovený z nízko ztrátového materiálu pro daný druh vlnění. Optické vlákno je složeno ze dvou hlavních částí, pláště a jádra, jež slouží k přenosu optického signálu, a z dalších vrstev, určených k jejich ochraně před různými vlivy. Jádro optického vlákna má větší hodnotu indexu lomu n_1 než je hodnota indexu lomu pláště n_2 [7].



Obr. 3.4: Šíření světelného paprsku v optickém vlákně [7].

3.2.1 Totální odraz paprsku

Optický paprsek se může šířit přímo (jednovidová vlákna) nebo pomocí odrazu na rozhraní jádra a pláště (mnohovidová vlákna), a platí $n_1 > n_2$. Při šíření paprsku totálním odrazem optickým vláknem dochází k minimálním ztrátám energie paprsku.

Způsobů výpočtů parametrů, při kterých dochází k totálním odrazům v optickém vlákně, je několik - například určení pomocí mezního úhlu šíření ϕ_b nebo mezního úhlu na rozhraní jádra a pláště optického vlákna α uvedeného na obr. 3.4, pro které platí následující vzorce [5]:

$$\Phi_b = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad [^\circ] \quad (3.1)$$

$$\alpha = \arcsin\left(\sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}\right) \quad [^\circ] \quad (3.2)$$

3.2.2 Numerická apertura NA

Vyjadřuje míru schopnosti optického vlákna ze svého bezprostředního okolí navázat do svého jádra optický svazek. Tuto schopnost je možno vyjádřit následujícím vztahem [5]:

$$NA = n_0 \cdot \sin \phi_a = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \quad [-] \quad (3.3)$$

Hodnota indexu lomu n_0 označuje prostředí, ze kterého je světelný svazek do optického vlákna navázán. Úhel ϕ_a $[^\circ]$ vyjadřuje hranici, kdy paprsky dopadající maximálně pod tímto úhlem se budou dále šířit optickým paprskem a paprsky dopadající pod větším úhlem než je ϕ_a nebudou do optického vlákna vůbec navázány.

Poměrný rozdíl indexů lomu Δ – má souvislost s další možností výpočtu NA [5]:

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{\frac{n_1 + n_2}{2}} \quad [-] \quad (3.4)$$

$$NA = n_0 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta} \quad [-] \quad (3.5)$$

3.2.3 Normalizovaná frekvence V

Určuje, zda je vlákno jednovidové nebo mnohovidové. Do výpočtu je zahrnuta vlnová délka vstupního paprsku λ , průměr jádra optického vlákna a a vlastnosti NA charakterizující materiál, ze kterého je optické vlákno vyrobeno [5]:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot NA \quad [-] \quad (3.6)$$

Jestli má být vlákno jednomódové, pak hodnota normalizované frekvence $V \leq 2,405$ [5].

3.2.4 Mezní vlnová délka λ_{max}

Vyjadřuje pro konkrétní mnohovidové optické vlákno maximální možnou vlnovou délku optického paprsku, který je schopen šířit se daným optickým vláknem [5]:

$$\lambda_{max} = \frac{2\pi}{V} \cdot a \cdot NA \quad [m] \quad (3.7)$$

Pro jednovidová vlákna existuje podobný vzorec vyjadřující vlnovou délku, při které se jednovidová vlákna stávají dvou a více vidová [5]:

$$\lambda_{max} = \frac{\pi \cdot d \cdot NA}{2,405} \quad [m] \quad (3.8)$$

Velká hodnota λ_{max} značí, že se vlákno blíží k dvojevídovému stavu a narůstá tak módový šum způsobený převodem energie mezi vidy [5].

Malá hodnota λ_{max} značí, že energie přenášeného světelného paprsku zasahuje i do pláště [5].

3.3 Lineární parametry optického vlákna

Jsou takové parametry, které je možno spočítat již při samotném návrhu optické trasy, kdy je přesně známo, jaký bude použit optický kabel, jak bude trasa dlouhá a jaké budou kladeny nároky na výslednou optickou trasu.

3.3.1 Útlum optického vlákna

Vyjadřuje vliv optického vlákna na přenášený optický paprsek. Vlivem útlumu dochází ke zmenšování intenzity optického paprsku šířícího se podél optického vlákna - proto je nutno světelný paprsek po určité vzdálenosti obnovovat.

První optická vlákna, která byla využita v sedmdesátých letech pro přenos informací, dosahovala hodnoty útlumu až 20 dB/km. Dnes se tato hodnota pohybuje od 0,2 do 0,3 dB/km.

Pro úplnost jsou zde uvedeny základní rovnice pro výpočet útlumu A , který vzniká na optickém vlákně:

$$A = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right) \quad [dB] \quad (3.9)$$

Parametry P_{in} označují navázaný výkon do optického vlákna a P_{out} vystupující výkon z optického vlákna.

Pro výpočet útlumu vlákna a vztaženého na určitou délku vlákna je možno použít následující vzorec:

$$a = \frac{A}{L} = \frac{10}{L} \cdot \log\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right) \quad [dB / km] \quad (3.10)$$

Parametr L značí délku počítaného vlákna v kilometrech.

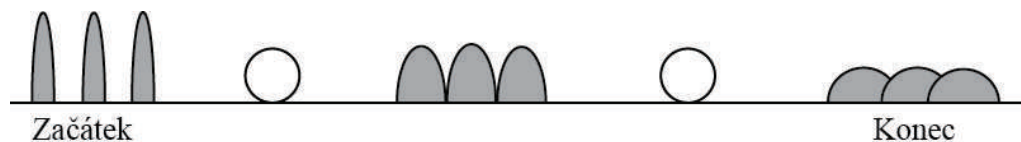
Pro získání přehledu o hodnotách udávaných v dB je zde uvedeno několik příkladů:

- 0,3 dB/km = přenesení 93,3 % energie ze začátku na konec vedení
- 1,0 dB/km = přenesení 79,4% energie ze začátku na konec vedení
- 3,0 dB/km = přenesení 50,1% energie ze začátku na konec vedení
- 10,0 dB/km = přenesení 10% energie ze začátku na konec vedení

3.3.2 Disperze

Jedná se o hlavní zkreslující veličinu působící na procházející světelný paprsek optickým vláknem, která má za následek postupné zploštění ve výkonové ose a prodloužení vstupního impulsu v časové ose v závislosti na délce optického vlákna.

Přibližné naznačení vlivů disperze na přenášený optický signál je naznačeno na obr. 3.5. V druhé polovině obrázku jsou patrné překryvy procházejících impulsů, což má za následek zvýšení celkového zkreslení výstupního optického signálu.



Obr. 3.5: Vliv disperze na přenášený optický signál [2].

Disperzi v optických vláknech je možné dělit na pět druhů [1][2]:

Materiálová disperze je způsobena závislostí indexu lomu materiálu použitého k výrobě optického vlákna (nejvyužívanější je sklo SiO_2) na vlnové délce záření, které má procházet vlákem. Z tohoto důvodu se každá vlnová délka vstupující do optického vlákna šíří různou rychlostí [2].

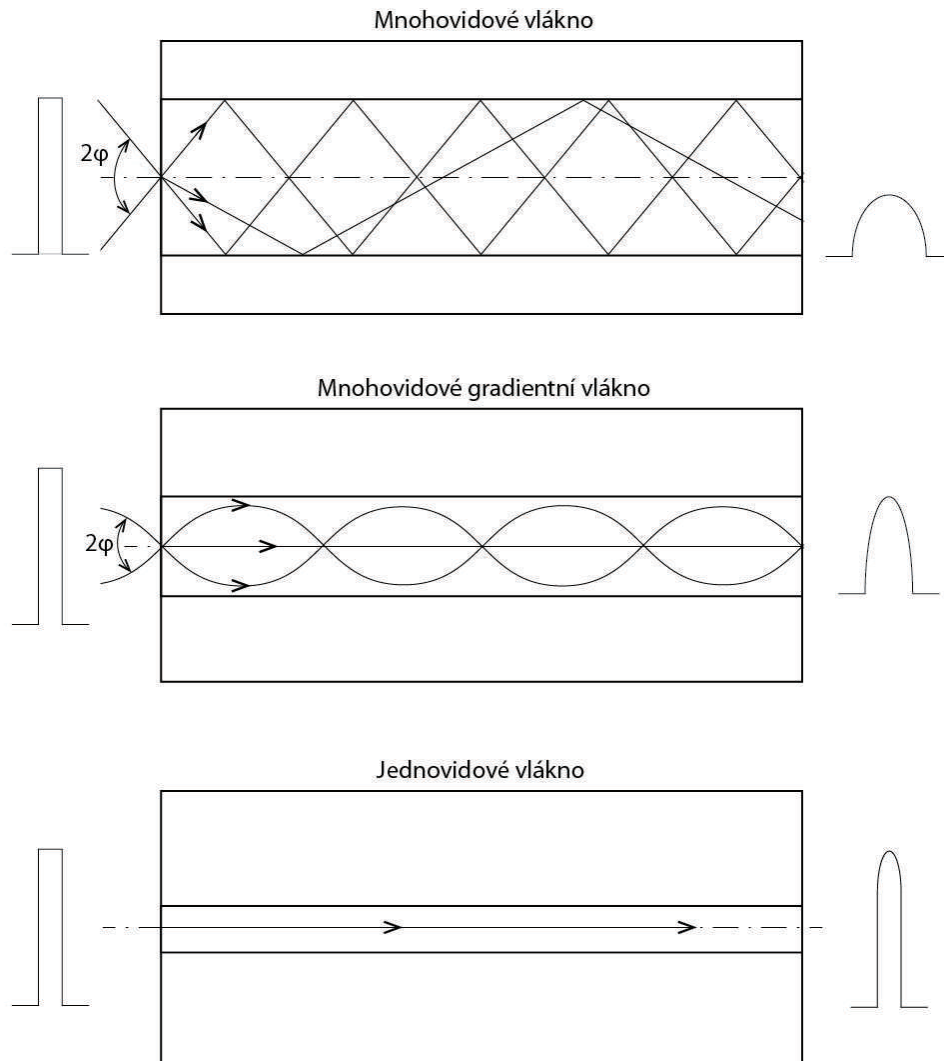
Vlnová disperze je způsobena geometrickými vlastnostmi optického vlákna, přesněji poměrem poloměru jádra optického vlákna a vlnové délky signálu. To znamená, že se projevuje každá nepřesnost jádra vzniklá při samotné výrobě, a jádro tak není po celé své délce přesně kruhové [2].

Chromatická disperze vznikne spojením materiálové a vlnové disperze, z toho plyne, že má na světelný impuls šířící se optickým vlákem stejné účinky jako materiálová a vlnová disperze. Je přímo uváděna pro jednovidová vlákna.

Velikost chromatické disperze optického vlákna definuje koeficient chromatické disperze $D(\lambda)$ [2]:

$$D(\lambda) = \frac{dt_g(\lambda)}{d(\lambda)} \quad \left[\frac{ps}{nm \cdot km} \right] \quad (3.11)$$

Vidová disperze je znázorněna na obr. 3.6. Spočívá v různé rychlosti šíření jednotlivých vidů optickým vlákem. Z uvedeného obrázku je zřejmé, že při zvětšujícím se odklonu paprsku od osy optického vlákna (mnohovidové vlákno) dochází k prodloužení jeho trasy oproti paprsku šířícímu se podél osy optického vlákna (jednovidivé vlákno). Vidová disperze se projevuje nejvíce u mnohovidových vláken [2].



Obr. 3.6: Šíření světelného impulzu různými druhy vláken [1].

Polarizační vidová disperze – PMD (Polarization Mode Dispersion) Projevuje se neustále a je závislá na mnoha parametrech, například na teplotě okolí, tlaku, vlhkosti, způsobu uložení vlákna a na mnoha dalších parametrech a vlivech, které se neustále mění, a to i při laboratorním měření, kdy by měly být podmínky pro dvě sobě jdoucí měření shodné, ale hodnota polarizační vidové disperze vyjde odlišná [1].

Příčina vzniku polarizačně vidové disperze spočívá v šíření samotného vidu optickým vláknem. Na obr. 3.7 je znázorněno šíření jednoho vidu pomocí dvou navzájem kolmých polarizačních rovin, jelikož světlo je elektromagnetické záření, které je kombinací příčného a postupného vlnění magnetického a elektrického pole [1].

V důsledku kruhové nesymetrie jádra, vzniklé při výrobě a působením dalších vlivů nebo nevhodným zacházením při pokládce optického kabelu, dojde ke zpoždění v jedné rovině šíření, čímž polarizační vidová disperze vzrůstá [1].

PMD se projevuje zkreslením přeneseného signálu nebo rozšířením impulzu. Je možné ji vyjádřit pomocí vzorců, a to pro krátké vzdálenosti do 10 km [1]:

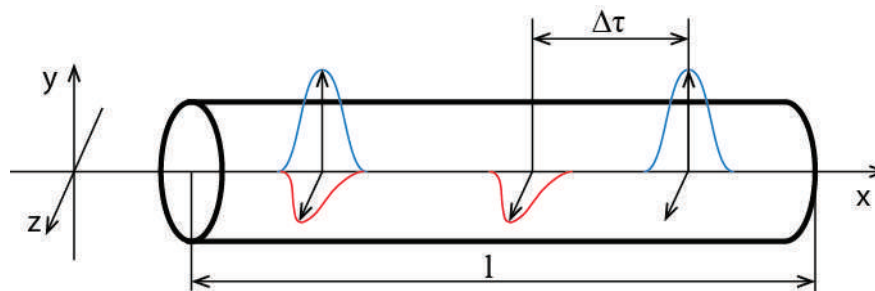
$$PMD = \frac{\Delta\tau}{l} \quad [ps \cdot km^{-1}] \quad (3.12)$$

V daném vzorci l označuje délku trasy a $\Delta\tau$ zpoždění signálu.

Pro dlouhé vzdálenosti $> 10km$ pak platí následující vzorec [1]:

$$PMD = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{l}} \quad [ps \cdot km^{-1}] \quad (3.13)$$

Oba vzorce pro výpočet PMD jsou pouze informativní, slouží pro získání přibližné představy o hodnotě PMD pro danou trasu. Přesnou hodnotu získáme až samotným změřením konkrétním trasy.



Obr. 3.7: Ukázka polarizační vidové disperze [1].

Daleko podrobněji je problematika PMD popsána v literatuře [10].

3.3.3 Ohybové ztráty

Vznikají porušením podmínek pro šíření optického paprsku v optickém vlákne [5].

Jednou z podmínek je zachování totálního odrazu paprsku ve vlákne, který je popsán v kapitole 3.2.1. Při ohybu optického vlákna, který je větší než maximální poloměr ohybu pro dané vlákno, dochází k deformaci jádra a paprsky procházející optickým vláknem dopadají na rozhraní jádra a pláště pod jiným úhlem, než který je potřebný k zachování totálního odrazu, a část paprsku se odrazí do pláště. Takto dochází k oslabování procházejícího optického paprsku [5].

K dalšímu způsobu vzniku ztrát při ohybu optického vlákna dochází pomocí fotoelastického jevu. Tento jev popisuje změnu indexu lomu daného prostředí jako závislost na působícím tlaku. Při ohybu vzniká na vnitřní straně smyčky tlak a na vnější straně tahové napětí. Takto se potom změní index lomu pláště i jádra a změní se tak i mezní úhel pro šíření paprsku pomocí totálních odrazů [5].

Ohybové ztráty je možné dělit na dva druhy:

- makroohyby
- mikroohyby

Je možné určit maximální poloměr ohybu R_{max} pro jednotlivé druhy optických vláken pomocí následujících vzorců.

Pro mnohovidové vlákno platí [5]:

$$R_{max} \cong \frac{3 \cdot n_1^2 \cdot \lambda}{4 \cdot \pi \cdot \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)^3}} \quad [m] \quad (3.14)$$

Pro jednovidové vlákno platí [5]:

$$R_{max} \cong \frac{20 \cdot \lambda}{\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)^3}} \cdot \frac{1}{2,748 - 0,996 \cdot \frac{\lambda}{\lambda_{max}}} \quad [m] \quad (3.15)$$

Optické ztráty mohou být i užitečné, zejména při návrhu módových filtrů, jež slouží k odstranění vyšších energetických módů.

3.3.4 Rayleighův rozptyl

Vzniká tepelným kmitáním krystalové mřížky optického vlákna, kdy toto kmitání nelze odstranit ani ochlazením vlákna na absolutní nulu, při kterém dojde k zastavení jednotlivých atomů v krystalické mřížce. Procházející světlo se začne ohýbat kolem takto vzniklých útvarů a dojde k jeho rozptýlení.

Rayleighův rozptyl je možné popsat Rayleighovým rozptylovým koeficientem [5]:

$$\gamma_R = \frac{8 \cdot \pi^3}{3 \cdot \lambda^4} \cdot n^8 \cdot p^2 \cdot \beta_c \cdot KT_F \quad [m^{-1}] \quad (3.16)$$

Hodnota p značí fotoelektrický koeficient, K je Boltzmannova konstanta, β_c označuje isothermální stlačitelnost při fiktivní teplotě 1400 K pro SiO_2 T_F . Rayleighův rozptyl je přímo úměrný osmé mocnině indexu lomu prostředí, ve kterém se paprsek šíří, a klesá se čtvrtou mocninou vlnové délky procházejícího paprsku.

Útlum způsobený Rayleighovým rozptylem α_R je možné vyjádřit následujícím vztahem [12]:

$$\alpha_R = \frac{C_1}{\lambda^4} \quad [dB] \quad (3.17)$$

Velikost C_1 označuje koeficient Rayleighova rozptylu, pro křemenné sklo odpovídá $C_1 = 0,802 \cdot 10^{-21}$ [12].

Rayleighův spontánní rozptyl závisí na množství a velikostech oblastí s vyšší nebo nižší hustotou materiálu, které vznikají při výrobě. Po ochlazení optického vlákna je pozice a velikost těchto oblastí přesně dána, a tak se následný rozptyl na těchto oblastech frekvenčně nemění, samozřejmě při použití jiného zdroje záření bude jiná frekvence Rayleighova rozptylu, ale v čase by se neměla zásadně měnit [12].

3.3.5 Mieho rozptyl

Vzniká na nehomogenitách vyskytujících se v optickém vlákně, jejichž velikost je srovnatelná s vlnovou délkou procházejícího paprsku.

Vznik těchto nehomogenit může být způsoben nedokonalou válcovou strukturou vlákna, nepatrnými změnami průměru jádra, tahovým napětím ve vlákně, mikroskopickými bublinkami ve struktuře jádra atd. Působení Mieho rozptylu se výrazně zvyšuje tehdy, když geometrická nepravidelnost optického vlnovodu překročí $1/10$ vlnové délky světla [11].

Mieho rozptyl lze částečně odstranit zdokonalením výrobního procesu samotného optického vlákna. Velikost rozptýleného signálu závisí na množství daných nehomogenit v optickém vlákně.

3.4 Nelineární jevy vznikající v optickém vlákně

Vznikají při velké hustotě světelného výkonu ve vlákně, kdy dochází k vzájemnému ovlivnění paprsku a vlákna, a to převážně na trasách, kde je použit vlnový multiplex a optické zesilovače [4].

Takové prostředí je nelineární a lze jej obecně popsat následujícím vztahem [4]:

$$P = N \cdot p \quad (3.18)$$

Je-li hodnota elektrické polarizace P a hodnota intenzity elektrického pole v daném prostředí (optickém vlákně) vysoká, vzniká dipólový moment p indukcí elektrického pole. Samotný vznik nelinearit může být způsoben jak dipólovým momentem, tak i hustotou dipólů N [4].

Vznik nelinearit pomocí dipólového momentu lze dokázat pomocí Lorenzova zákona [4]:

$$p = -e \cdot x \quad (3.19)$$

V uvedeném vztahu e označuje elektrický náboj a x posun částice.

Uvedme příklad: Vložíme-li atom zkoumaného prostředí do elektrického pole o intenzitě E , dojde k vychýlení atomu od trvalé osy kmitání o vzdálenost x . Pokud vazební síla působící proti tomuto pohybu má stejnou velikost, jedná se o prostředí lineární. Zvýšíme-li elektrickou intenzitu na hodnotu vyšší, než je hodnota intenzity uvnitř atomu, stane se prostředí nelineární [4].

3.4.1 Brillouinův rozptyl SBS (Stimulated Brillouin Scattering)

Brillouinův rozptyl se vyskytuje v optickém vlákně dvojího typu.

První je spontánní Brillouinův rozptyl, který vzniká v každém optickém vlákně působením akustických vln na samotné vlákno. Hodnota takového rozptylu je o 30 dB nižší než hodnota Rayleighova rozptylu [8].

Stimulovaný Brillouinův rozptyl vzniká při působení optického paprsku o nadkritické hodnotě výkonu (mW) pro dané vlákno, a dále při působení akustických a mechanických vibrací. V místě působení všech veličin dojde ke změně indexu lomu optického vlákna a v tomto místě dojde k oddělení fotonu od šířícího se světelného signálu. Tento foton pak pokračuje v opačném směru, než ve kterém postupoval původní světelný signál. Tímto způsobem rozptýlený signál je jinak frekvenčně posunut než signál původní. Přesněji vznikne několik vln, jedna pokračuje dál na konec vlákna a druhá se vrací zpět na začátek vlákna, ostatní vlny šířící se jiným směrem jsou utlumeny samotným optickým vláknem (důvod tohoto jevu je uveden v kapitole 3.2).

Tímto způsobem vytvořený signál postupuje zpět k vysílači, ovlivňuje stabilitu zdroje záření a zhoršuje celkový poměr šumu k užitečnému signálu.

Při překročení určité prahové hodnoty světelného výkonu ve vlákně může dojít prostřednictvím Brillouinova rozptylu k odražení většiny výkonu postupné optické vlny v optickém vlákně, vzniká stimulovaný Brillouinův rozptyl. Tento jev je nejvíce významný pro signály s úzkou šířkou spektra.

Brillouinův rozptyl je posunut kmitočtově k o 10 GHz nižším hodnotám [6]. Přesný frekvenční posun Brillouinova rozptylu ν_B je možné vyjádřit následujícím vzorcem:

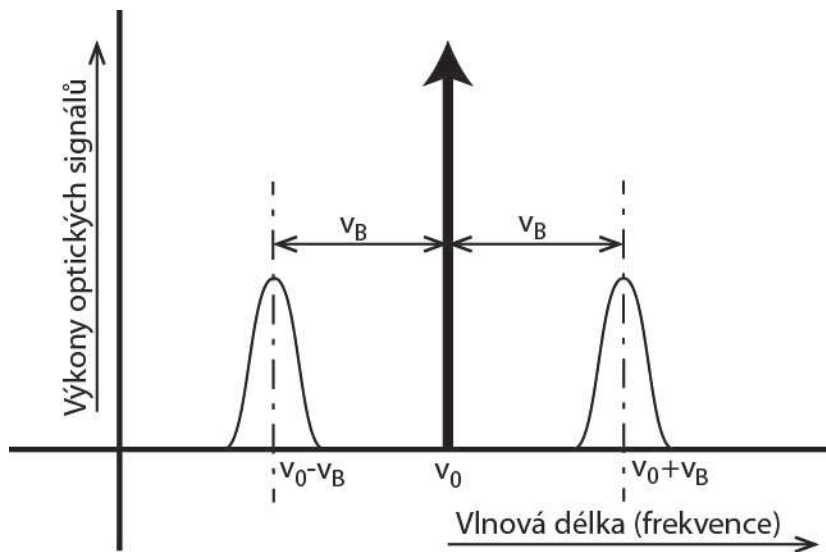
$$\nu_B = 2 \cdot \frac{n \cdot V_A}{\lambda_0} \quad [Hz] \quad (3.20)$$

Hodnota parametru n značí index lomu konkrétního prostředí, ve kterém dochází k šíření rozptylu (jádro optického vlákna). Parametr λ_0 značí hodnotu vlnové délky původního optického paprsku, který vyvolal Brillouinův rozptyl.

Parametr V_A vyjadřuje rychlost šíření akustického signálu v daném prostředí a je možné jej vyjádřit tímto vztahem [8]:

$$V_A = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad [m/s] \quad (3.21)$$

Parametr K vyjadřuje modul objemové stlačitelnosti a ρ značí hustotu materiálu, kterým se akustická vlna šíří. Rychlost šíření zvukové vlny ve vzduchu je přibližně 347 m/s, ale v optickém vlákne o hustotě $\rho = 2,21 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ a tlaku $K = 7,37 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$ je rychlost šíření $V_A = 5775 \text{ m/s}$ [8].



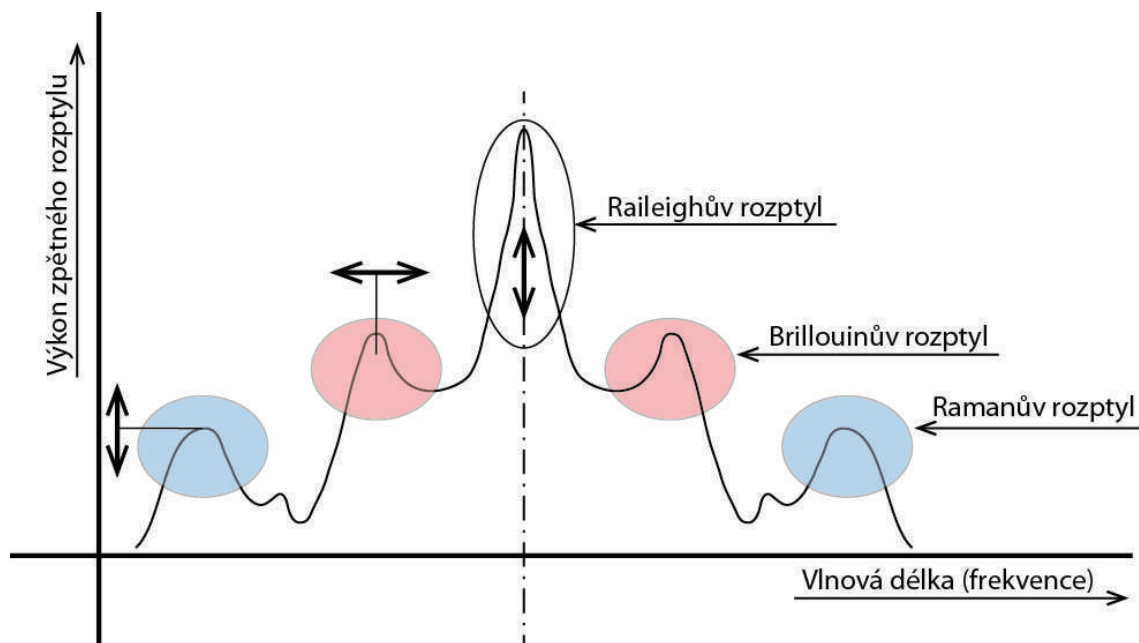
Obr. 3.8: Brillouinův posuv [8].

Na obr. 3.8 je znázorněn Brillouinův posuv o vzdálenosti v_B od původního optického signálu o vlnové délce v_0 .

Hodnotu kritického výkonu, kdy se začíná projevovat Brillouinův rozptyl, lze vyjádřit jako výkon signálu, při kterém dochází ke zpětnému rozptylu:

$$P_{SBS} = (4,4 \cdot 10^{-3}) \cdot d^2 \cdot \lambda^2 \cdot \alpha_{dB} \cdot \nu \quad [W] \quad (3.22)$$

Platí, že P_{SBS} [W] značí hodnotu kritického výkonu navázaného do optického vlákna o průměru jádra d [μm] a s měrným útlumem α_{dB} [dB], s pracovní vlnovou délkou λ [μm] a s šířkou spektra ν [GHz]. Stimulovaný Brillouinův rozptyl se začíná projevovat od 5 mW výkonu vstupního paprsku.



Obr. 3.9: Vliv Brillouinova rozptylu na přenášený signál [8].

Brillouinův rozptyl je frekvenčně pohyblivý v závislosti na druhu a intenzitě působení vnější fyzikální veličiny. Je možné říct v závislosti na provedeném měření v literatuře [8], že pro změnu teploty od -40 °C do $+100\text{ °C}$ odpovídá změna Brillouinova rozptylu frekvenci od $12,72\text{ GHz}$ do $12,9\text{ GHz}$. Pro změnu délky optického vlákna od 0% do $0,8\%$ odpovídá změna frekvence rozptylu od $12,8\text{ GHz}$ do $13,2\text{ GHz}$.

3.4.2 Ramanův rozptyl SRS (Stimulated Raman Scattering)

Stejně jako Brillouinův rozptyl, také Ramanův rozptyl vzniká dvojího typu. První typ je možné označovat jako spontánní Ramanův rozptyl, který vzniká vzájemným působením světelného paprsku a kmitáním molekul ve struktuře optického vlákna. Energie tohoto vzájemného působení je daleko větší než energie akustické vlny, což má za následek vznik Brillouinova rozptylu.

Jednoduše je možné říct, že Ramanův rozptyl vzniká při vzájemné interakci fotonů z vysílaného impulzu a částic optického vlákna. Vzniká rozptýlené záření s odlišnou vlnovou délkou, než kterou má vysílaný paprsek.

Ramanův rozptyl je posunut kmitočtově k o 13 THz nižším hodnotám [6].

Hodnotu kritického výkonu lze vypočítat obdobně jako u Brillouinova rozptylu, a to pomocí následujícího vzorce [6]:

$$P_{SRS} = (5,9 \cdot 10^{-2}) \cdot d^2 \cdot \lambda \cdot \alpha_{dB} \quad [W] \quad (3.23)$$

Platí, že P_{SRS} [mW] značí hodnotu kritického výkonu navázaného do optického vlákna o průměru jádra d [μm], s měrným útlumem α_{dB} [dB], a s pracovní vlnovou délkou λ [μm].

Při zobrazování Ramanova rozptylu je potřeba odfiltrout minimálně Rayleighův rozptyl, protože ten je 10^5 až 10^{12} krát větší než Ramanův rozptyl.

3.4.3 Křížová fázová modulace XPM (Cross-Phase modulation)

Ovlivňuje fázi optického paprsku v závislosti na interakci s jiným světelným paprskem vyskytující se ve stejném optickém vlákne [5].

Projevuje se u systémů využívajících vlnový multiplex. Optický paprsek s větším optickým výkonem moduluje paprsek s menším optickým výkonem, a to v závislosti na velikosti disperze ve vlákne. Čím je větší disperze, tím se tento vliv zmenšuje, naopak největší bude u vláken s nulovou disperzí.

Pro dvoukanálový systém je možné použít vztah vyjadřující fázový posuv Φ [4]:

$$\Phi = \gamma \cdot L_{ef} \cdot (P_1 + P_2) \quad (3.24)$$

Nelineární koeficient šíření γ je možné vypočítat z rovnice [4]:

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot n' \cdot \frac{1}{\pi \cdot \omega_0^2} \quad (3.25)$$

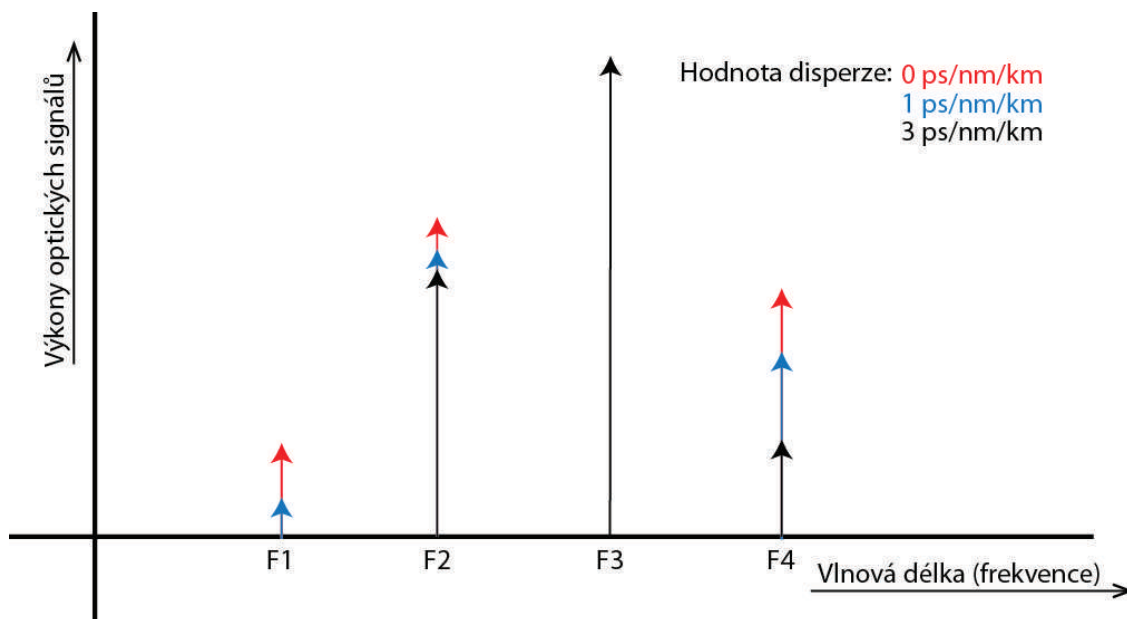
Pro nelineární index lomu n' platí vztah [4]:

$$n' = \frac{3}{8} \cdot n \cdot X_e^{(3)} \quad (3.26)$$

Efektivní délka L_{ef} označuje délku, na které se zkoumaná nelinearita projevuje [4]:

$$L_{ef} = \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha L}) \quad (3.27)$$

Pro lepší názornost je uveden příklad působení XMP v závislosti na velikosti disperze na obr. 3.10.



Obr. 3.10: Vliv křížové fázové modulace [4].

Obr. 3.10 znázorňuje spektrální rozložení několika optických signálů procházejících optickým vláknem. Do daného optického vlákna s disperzí 3 ps/nm/km jsou navázány dva optické signály F2 a F3, signál F4 vznikl díky působení křížové fázové modulace. Z obrázku je patrné, že pro menší hodnotu disperze vznikají další složky F1 a mění se výkon F2 a F4, přitom hodnota výkonu silnějšího optického paprsku ze dvou původních zůstává stejná a dochází tak k ovlivnění slabšího optického paprsku.

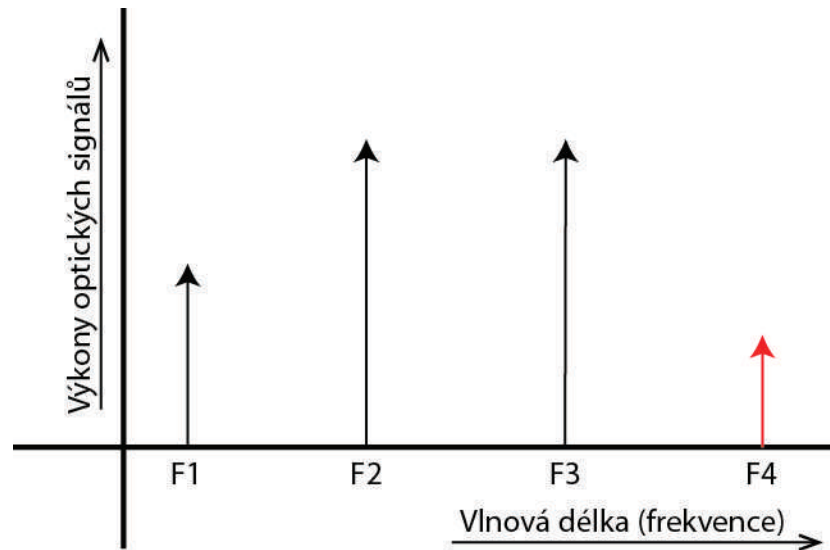
Popsaný postup vychází z provedeného měření v literatuře [4].

3.4.4 Čtyřvlnné směšování FWM (Four-Wave Mixing)

U čtyřvlnného směšování vlivem interakce tří a více signálů s různými vlnovými délkami vznikají signály nové o nových vlnových délkách. Čtyřvlnné směšování nezávisí na přenosové rychlosti, ale na velikosti rozestupů a velikosti výkonů jednotlivých optických signálů přenášených daným optickým vláknem. Tento jev je možné částečně potlačit také pomocí posunutí pracovních délek jednotlivých optických paprsků k vyšším vlnovým délkám.

Je nutné s čtyřvlnným směšováním počítat při velmi hustém vlnovém multiplexu, a to převážně na optických trasách, kde byly použity optická vlákna s nulovou nebo velice nízkou chromatickou disperzí [2]. Jedná se o jistý druh optické parametrické oscilace.

Pro lepší názornost působení čtyřvlnného směšování je uveden následující příklad. Do optického vlákna jsou navázány 3 světelné paprsky o různých vlnových délkách (F1, F2, F3). Prostředí optického vlákna způsobí vznik čtvrté vlnové délky (F4), tento jev je označován jako čtyřvlnné směšování a je znázorněn na obr. 3.11.



Obr. 3.11: Vliv čtyřvlnného směšování [4].

Hodnotu frekvence nového signálu lze vypočítat pomocí následujícího vzorce [4]:

$$F4 = F2 + F3 - F1 \quad [Hz] \quad (3.28)$$

Množství vzniklých složek při tomto jevu je možné vyjádřit takto [4]:

$$M = \frac{N^2}{2} \cdot (N - 1) \quad (3.29)$$

Parametr M značí počet nově vzniklých složek a parametr N značí množství vstupních signálů. Při vstupu tří signálů vznikne až 9 různých nových složek. Vznikem těchto nových složek dochází k přenosu energie mezi jednotlivými složkami, tím se snižuje odstup signálu od šumu.

Pomocí čtyřvlnného směšování je možné měřit množství nelinearit vznikajících v určitém zkoumaném vedení, nebo jej lze využít ke kompenzaci disperze vznikající v optických vláknech [4].

Další využití FWM vychází ze schopnosti vytvořit světelný paprsek o jiné vlnové délce, než který je navázán do optického vlákna, což je využíváno v optických konvertorech.

4 OPTICKÉ VLÁKNOVÉ SENZORY - OVS

Využívání OVS se datuje už na konec šedesátých let minulého století [3], kdy byl jejich nástup značný. Od této doby již proběhlo několik vln zájmu o tuto problematiku. V dnešní době neexistuje fyzikální veličina, kterou by pomocí vláknových senzorů nešlo změřit. Jedním z důvodů, proč nedošlo k hromadnému rozšíření, byla finanční náročnost.

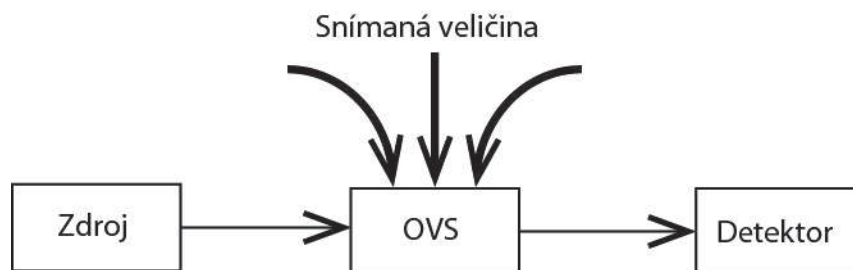
Nicméně postupem doby se vývoj posunul, náklady klesly a postupně se OVS rozšiřují i do provozu. Nenahraditelné jsou v hydrofonech nebo gyroskopech, protože i ty nejlepší klasické snímače nedosahují takových parametrů jak OVS.

Mezi základní vlastnosti OVS patří [3]:

- vysoká citlivost na měřený parametr
- vysoký izolační odpor
- jiskrová bezpečnost (do 7 mW)
- odolnost proti agresivnímu prostředí

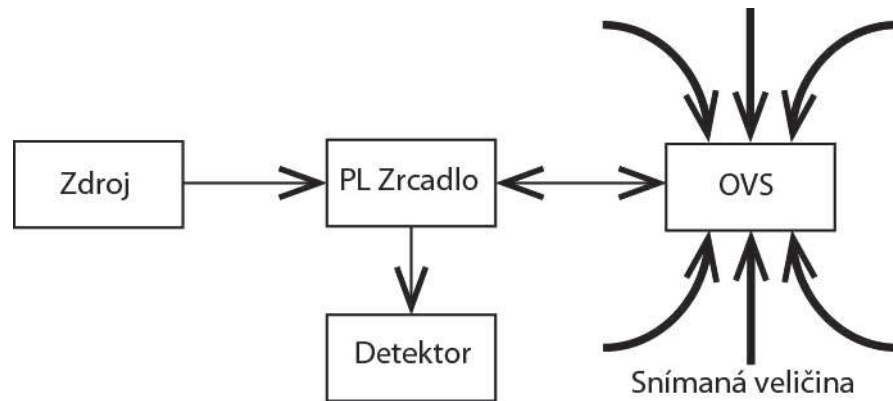
4.1 Obecné zapojení OVS

Optický vláknový senzor je možné zapojit různě, v závislosti na přesném druhu OVS a způsobu měření zvolené veličiny. Obecně jsou tato zapojení naznačena na obr. 4.1 a obr. 4.2.



Obr. 4.1: Blokové zapojení OVS 1 [3].

Při zapojení optických vláknových senzorů podle obr. 4.1 dochází k přímému ovlivňování procházejícího paprsku zkoumanou veličinou a ve snímači je měřena změna optického paprsku v závislosti na velikosti působící měřené veličiny.



Obr. 4.2: Blokové zapojení OVS 2.

Druhé zapojení znázorněné na obr. 4.2 je typické pro měřící metody nevyužívající přímo optický signál ze zdroje, ale zpětných rozptylů. Ty se šíří zpět ke zdroji záření, proto je zde zařazeno PL (polopropustné) zrcadlo, které má za úkol odklonit zpětné optické signály do příslušného snímače. V závislosti na charakteru měření mohou být využita i jiná zařízení než polopropustné zrcadlo, např. optický cirkulátor.

Zdroj optického záření je volen v závislosti na zvolené aplikaci - buď luminiscenční dioda, jako nekoherentní zdroj záření, nebo koherentní zdroj záření - laserová dioda. Hlavní parametry určující zdroj jsou [3]:

- vlnová délka generovaného záření λ
- šířka pásma $\Delta\lambda$
- velikost optického výkonu mW
- celková stabilita
- kontinuální nebo spínaný režim
- potřebná modulace

Detektor optického záření je řešen pomocí fotodiody, PIN diody nebo lavinové diody, volba se provádí podle [3]:

- požadované citlivosti ve zkoumaném světelném pásmu
- hodnoty odstupu signálu od šumu
- zisku

OVS (optický vláknový snímač) je volen podle [3]:

- druhu snímané veličiny
- způsobu modulace
- provedení

4.2 Dělení optických vláknových snímačů

Rozdělení optických vláknových snímačů není jednoduché, protože existuje celá řada parametrů, podle kterých je možno provádět dělení. Nejprve bude provedeno dělení OVS podle využití optického vlákna:

- **Senzory, kde vlákno slouží jako samotný detektor**
- **Senzory, kde vlákno slouží pouze k přenášení informací**

První skupina bude dále podrobněji rozebrána, protože tento druh OVS bude použit v návrhu měřicí soustavy.

Druhá skupina zahrnuje velkou škálu různých senzorů, nicméně pro jejich obsáhlost a nevyužití těchto poznatků v plné míře pro účely této práce nebudou podrobně rozebírány. Podrobnější informace o těchto optických vláknových snímačích je možno získat v literatuře [5].

Další z možných způsobů dělení optických vláknových snímačů je možné podle vlivů snímaných fyzikálních veličin:

- mechanických (tah, tlak, vibrace)
- teplotních
- elektrických (intenzita elektrického pole)
- magnetických (intenzita magnetického pole)
- radiačních
- chemických
- biologických

Dělení OVS je možné provádět také podle způsobu ovlivnění procházejícího světelného paprsku měřicím vláknem:

- amplitudové (intenzitní)
- fázové
- polarizační

4.2.1 Amplitudové optické vláknové senzory

Jsou jedny z nejrozšířenějších senzorů využívajících optická vlákna. Při působení měřené fyzikální veličiny dochází k ovlivnění amplitudového modulátoru, a ten pak ovlivňuje procházející měřicí optický signál [3].

Amplitudové modulace je možné rozdělit do několika skupin:

- změnou tlumení
- změnou přechodu a odrazu světla
- porušením okrajových podmínek šíření světla
- generujícím zářením

Senzory využívající změnu tlumení využívají přímo optické vlákno nebo vložené optické prostředí, na které působí měřená veličina. Dochází k dodatečnému nárůstu útlumu.

Nejrozšířenější senzory této skupiny jsou senzory radioaktivního záření, při kterém dochází k poškození optického vlákna, a tak i k nárůstu tlumení daného vlákna. Je možné jimi měřit dávky radiace od 10^{-3} až do 10^6 rad.

Jak velký vznikne útlum v optickém vlákně určují parametry radiačního záření, konstrukce a samotné složení měřicího optického vlákna a druh optického signálu, který prochází vláknem.

Senzory využívající změnu přechodu a odrazu světla využívají vzájemné světelné vazby mezi dvěma konci optického vlákna. Základní princip těchto senzorů spočívá v upevnění jednoho konce do pevné (nehybné) polohy, protější konec optického vlákna je volně uchycen přesně proti prvnímu vlákně. Měřená veličina působí na pohyblivý konec vlákna a ten se vychyluje, tak dochází ke změně intenzity procházejícího optického paprsku.

V závislosti na druhu a způsobu použití těchto senzorů je možné tento základní princip dále rozvíjet, a to použitím více pevně uchycených vláken. Tímto způsobem je možné měřit působení měřené veličiny, směr působení a další parametry.

Tento princip se využívá u optických vláknových mikrofónů.

Senzory využívající porušení okrajových podmínek šíření světla využívají především podmínky absolutního odrazu světelného paprsku šířícího se optickým vláknem.

Nejznámější senzory této skupiny pracují na principu mikroohybů, kdy dochází k deformaci optického vlákna, což je popsáno v kapitole 3.3.3.

Méně rozšířené senzory této skupiny využívají optické vlákno s odstraněným pláštěm, takže hodnota indexu lomu okolí jádra je neznámá, proto se i amplituda přenášeného paprsku bude měnit v závislosti na prostředí, které bude kolem jádra (vzduch, voda, olej, ...).

Senzory využívající generace záření využívají indukované záření v optickém materiálu působením optických, tepelných, radiačních a dalších vlivů.

Tento druh nepotřebuje ke své funkci zdroj světelného měřícího signálu, protože působením zmíněných vlivů vzniká světelné záření přímo v optickém vlákně nebo ve vhodném materiálu umístěném na konci vlákna.

4.2.2 Fázové optické vláknové senzory

Patří mezi nejcitlivější senzory a využívají fázovou modulaci světelné vlny, která se šíří optickým vláknem. Fáze optického signálu může být změněna prostřednictvím délky vlnovodu, indexu lomu a průřezu optického vlákna.

Změnu fáze světelné vlny je možné zjistit interferometrickými metodami. Optické vláknové interferometry je možné rozdělit do několika skupin.

- Dvojamenný jednovidový interferometr, nejznámější jsou Machův – Zehnderův nebo Michelsonův interferometr. Spočívají ve vzájemném porovnávání fází světelných vln, kdy jedna vlna přichází ze sensorového optického vlákna, na které působí měřená veličina, a druhé vlny, která přichází z referenčního optického vlákna. Patří mezi nejrozšířenější interferometry.
- Jednovláknový interferometr s obousměrnou optickou vazbou – Sagnacův interferometr. Porovnává fázi dvou světelných vln, které se šíří proti sobě v cívice optického vlákna.
- Mezividový interferometr, který je založen na interferenci dvou a více vidů světelného paprsku šířícího se jedním optickým vláknem. U tohoto druhu interferometrů je možné použít mnohavidových vláken, nevýhodou je komplikované vyhodnocení interferenčních obrazců.

Metoda POTDR (Polarization Time Domain Reflectometry) umožňuje zjištění změny fáze optického signálu. Základem této metody je použití polarizovaného světelného paprsku a jednovidového optického vlákna. Přesnější popis je uveden v následující kapitole 4.3.2.

4.2.3 Polarizační optické vláknové senzory

Využití optického vlákna v těchto senzorech může být opět dvojího druhu. Optické vlákno je přímo citlivou částí (senzorem) nebo slouží pouze jako spojovací prostředek mezi zdrojem záření, vhodným optickým polarizačním modulátorem a snímací částí.

U tohoto druhu senzoru je možné využít hned několika fyzikálních jevů, které manipulují s fází signálu.

- **Faradayův magnetický jev** = dochází k otočení roviny polarizace působením magnetického pole.
- **Elektrogyreční jev** = vzniká při působení elektrického pole na krystaly, ve kterých se šíří polarizovaný světelný paprsek, míra otočení roviny polarizace je úměrná intenzitě působícího elektrického pole a délce optické dráhy, po kterou dochází k působení elektrického pole na procházející optický paprsek.
- **Kerrův jev** = se projevuje při šíření světla vhodným izotropním prostředím, které je v elektrickém poli.
- **Foto elastický jev** = při tomto jevu vzniká další dvojlom v určitých transparentních materiálech při působení deformace v jednom směru.

Z uvedených jevů, které mají vliv na polarizaci optického signálu, je možné usoudit, že polarizaci optického signálu lze ovlivnit pomocí magnetického pole, tlaku, elektrického pole, atd.

Faradayův jev je využíván u senzorů proudů, kdy je optické vlákno navinuto do cívky, jejímž středem prochází měřený kabel. Velikost procházejícího proudu vodičem vytváří odpovídající magnetické pole, a tak dochází k ovlivnění optického paprsku procházejícího měřicí cívkou.

Mezi výhody těchto senzorů patří i jistá nezávislost amplitudového šumu zdroje záření. Pro přesnost měření $\pm 0,15 \%$ se úhel polarizace mění v rozsahu $5,5^\circ$, proto velice záleží na přesnosti snímacího zařízení.

4.3 Rozprostřené vláknové senzory

Tento druh optických vláknových senzorů je založen na reflektometrických metodách využívajících zpětného rozptylu vznikajícího v optických vláknech [3].

Jako snímací část, na kterou působí zjišťovaná fyzikální veličina, slouží optické vlákno. Podle druhu zvolené aplikace se volí odpovídající druh optického vlákna.

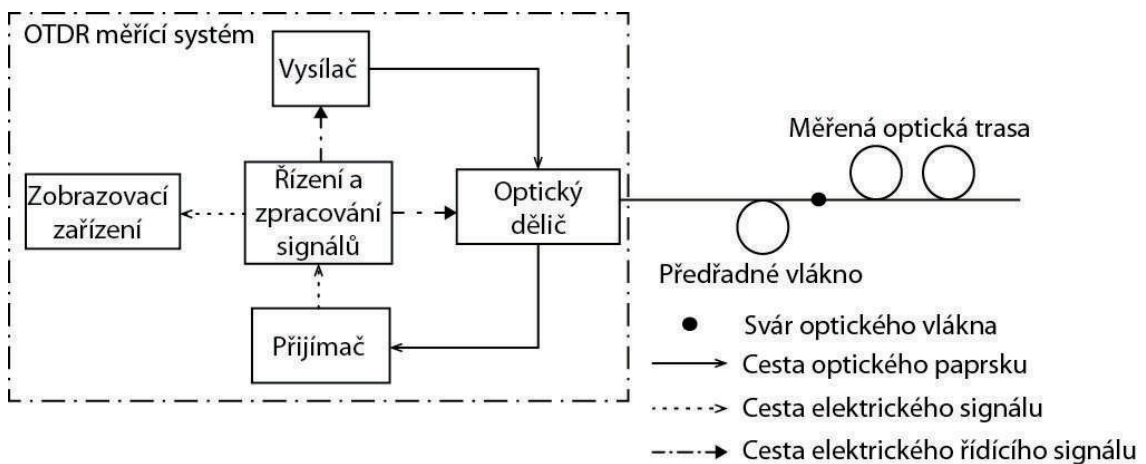
4.3.1 OTDR (Optical Time Domain Reflectometry)

Nejrozšířenější metodou měření zpětného rozptylu v časové oblasti je OTDR (Optical Time Domain Reflectometry). Své uplatnění tato metoda našla při měření nových, ale i stávajících optických komunikačních tras. Pomocí této metody lze určit místa na optickém vedení, kde dochází k útlumu světelného paprsku šířícího se optickým vláknem. Tlumení může být způsobeno spojovacími konektory, sváry optického vlákna, nebo působením vnějších veličin na toto vlákno. Lze takto přesně identifikovat a rychle opravit případné závady na optické trase, než prohledávat postupně celé vedení trasy, což mnohdy není ani reálné, protože vedení je zakopáno.

V optických vláknech se skleněným jádrem vznikají zpětné odrazy a zpětně rozptýlené signály následkem Rayleighova, Brillouinova a Ramanova rozptylu, a to

díky malým změnám indexu lomu v jádře vlákna. Takovéto změny indexu lomu v jádře vznikají krátkodobě při navázání optického paprsku o nadkritické hodnotě výkonu do optického vlákna, nebo již při samotné výrobě vlákna - při chladnutí skla z taveniny. Vznikají oblasti ve vlákne s různou hustotou skla, díky tomuto jevu se intenzita zpětného rozptylu mění s teplotou.

Základní blokové schéma je naznačeno na následujícím obr. 4.3.



Obr. 4.3: Blokové zapojení OTDR [12].

Blokové schéma na obr. 4.3 popisuje základní vnitřní zapojení měřicího systému OTDR. Jako vysílač je použit laser, který umožňuje vysílat impulzy různých délek (desítky ns až desetiny sekund) s průměrnou frekvencí jednotky kHz. Zvolená šířka měřicího impulzu závisí na délce vedení, protože s rostoucí délkou vedení musí být i delší měřicí impulz. Nevýhoda příliš dlouhých měřicích impulzů je ta, že se snižuje celková přesnost měření.

Optický dělič je optické zařízení, které propouští z vysílače do měřené optické trasy měřicí signál, ale nepropustí zpět odražené a rozptýlené signály, nýbrž je odkloní do přijímače.

V přijímači je optický signál vhodně převeden na signál elektrický, který je dále zpracováván a zobrazen na zobrazovacím zařízení. V závislosti na druhu a propracovanosti OTDR měřicího systému mohou být zobrazeny i podrobné statistiky udávající parametry jednotlivých událostí na měřeném optickém vlákne.

Každý měřicí přístroj využívající metodu OTDR obsahuje tzv. mrtvou zónu, která udává minimální vzdálenost od přístroje, na které není možné přesné měření. Mrtvá zóna vzniká Fresnelovým odrazem při navázání měřicího optického signálu do optického vlákna. Z tohoto důvodu je za měřicí systém OTDR umístěno předřadné vlákno, které plní funkci ochrany měřicího zařízení, a to pro případ, kdy by měřicí vlákno bylo vážně porušeno hned na prvních metrech a celý vstupní signál by se tak odrazil a směřoval by do detektoru. Dalším důvodem umístění předřadného vlákna je překlenutí mrtvé zóny, aby měřené vlákno bylo přesně měřeno hned od svého začátku.

Pro přesnější měření konkrétního optického vlákna je doporučováno provádět měření na obou koncích zkoumaného vlákna a naměřené výsledky zprůměrovat [12].

4.3.2 POTDR (Polarization Time Domain Reflectometry)

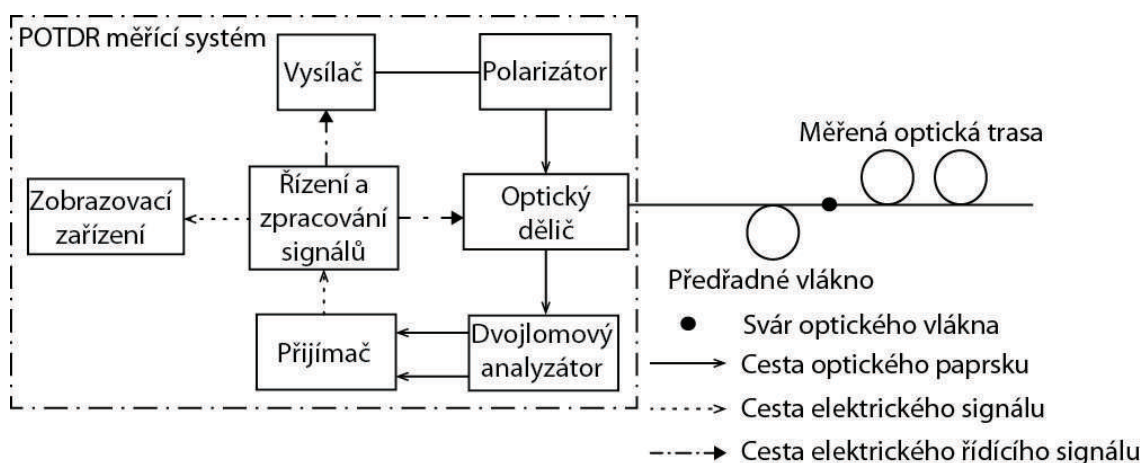
Měřicí metoda POTDR vychází z měřicí metody OTDR, kdy základní blokové zapojení na obr. 4.4 je oproti metodě OTDR rozšířeno o dva bloky.

Daleko lepší citlivost, než kterou nabízí metoda OTDR, umožňuje metoda založená na polarizační reflektometrii v časové oblasti, označovaná jako POTDR (Polarization Time Domain Reflectometry). Hlavní princip metody spočívá v měření polarizace zpětně rozptýleného signálu, kdežto metoda OTDR měřila intenzitu zpětně rozptýleného signálu.

Princip této metody spočívá v polarizaci optického impulzu z úzkospektrálního DFB (Distributed feedback) laseru, navázaného do jednovidového optického vlákna, kdy je uvažováno, že polarizace šířícího se měřícího impulzu měřeným optickým vláknem se zásadně nemění.

Zpětně rozptýlený signál je přiveden na dvojlomový analyzátor, kde je signál rozdělen na dva navzájem ortogonální polarizované signály. Snímaná fyzikální veličina mění polarizační vlastnosti optického vlákna, a tak se mění i polarizace zpětně rozptýleného optického signálu [1].

Základní blokové schéma je naznačeno na následujícím obr. 4.4.



Obr. 4.4: Blokové zapojení POTDR.

Rozdíl v blokovém zapojení oproti předcházející měřicí metodě OTDR je v použití dvou nových bloků.

Polarizátor přesně definuje polaritu měřícího signálu, kdy se nastavuje na hodnotu 45° mezi rovinami y a z, je-li rovina x souběžná s osou jádra optického vlákna.

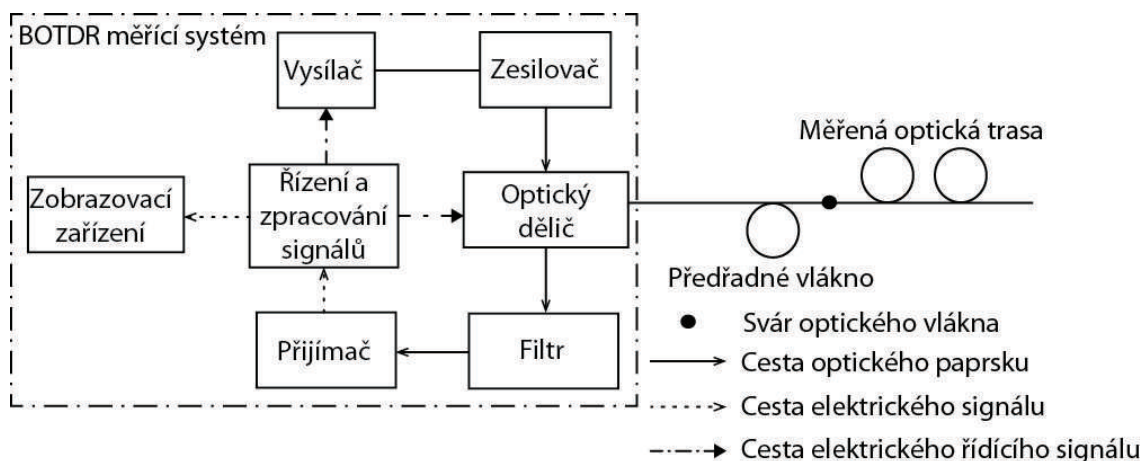
Dvojlomový analyzátor pouze rozloží příchozí optický signál na dva navzájem ortogonální polarizované signály, které jsou samostatně zpracovány v přijímači. Takto jsou získány dva signály, které se a porovnají s původním měřícím signálem.

4.3.3 BOTDR (Brillouin Time Domain Reflectometry)

Tato měřicí metoda taktéž vychází z metody OTDR. Rozdílem je ovšem specifikace měřeného rozptylu. Tato metoda využívá stimulovaného Brillouinova rozptylu vznikajícího při nadkritické hodnotě vstupního výkonu do konkrétního vlákna.

Podrobnější teorie o vzniku a vlastnostech Brillouinova rozptylu byla uvedena v předchozí kapitole 3.4.1.

Základní blokové zapojení měřicí metody BOTDR je naznačeno na obr. 4.5.



Obr. 4.5: Blokové zapojení BOTDR.

Na první pohled je z obr. 4.5 patrné, v čem se měřicí metoda liší od předchozích.

Za vysílačem je připojen zesilovač, který hraje hlavní roli pro maximální měřenou délku optického vlákna, v závislosti vlastního útlumu vlákna. Protože stimulovaný Brillouinův rozptyl nastává pouze při nadkritické hodnotě výkonu pro konkrétní vlákno, musí být měřený signál dostatečně zesílen, aby tato hodnota nadkritického výkonu byla naměřena i na konci měřeného optického vlákna.

Dalším rozdílem v blokovém zapojení je použití filtru na vstupu přijímače. Filtr se zde používá obecně u všech zmíněných měřicích systémů. V tomto systému filtr není naladěný na blízké okolí měřeného impulsu, ale na rozsah frekvencí odpovídajících zpětnému Brillouinovu rozptylu. Kdyby tomu tak nebylo, na detektor by mohl přijít signál vytvořený prostřednictvím Rayleighova rozptylu, který je několikanásobně silnější než Brillouinův rozptyl. Došlo by tak ke zkreslení měřených parametrů.

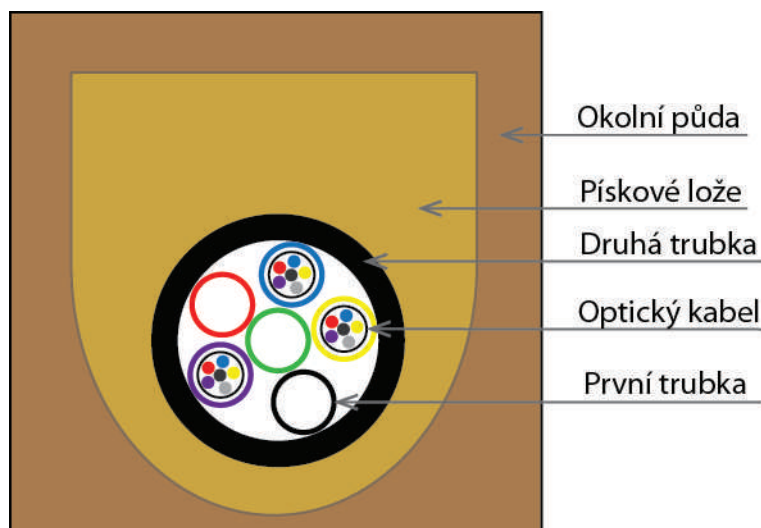
5 ULOŽENÍ OPTICKÉHO KABELU

Nejen vlastnosti měřicí soustavy určují přesnost získaných dat, velký vliv na tento proces má již samotné uložení měřicího optického kabelu v měřeném prostředí.

Uložení kabelu na velkou vzdálenost (desítky kilometrů) tak, aby nedocházelo k samovolnému poškození vlákna, je závislé na druhu aplikace, ve které má být měřicí vlákno použito. Pokud má být vlákno umístěno v zemi, je možné rozdělit tento postup na dva následující způsoby.

5.1 Pevné uložení svazku optických vláken

Toto uložení je typické pro svazky telekomunikačních optických kabelů, kdy je v jedné trase nataženo hned několik optických vláken. Přibližné znázornění je na obr. 5.1.



Obr. 5.1: Uložení svazku optických kabelů

Na obr. 5.1 jsou znázorněny optické kabely, které jsou vedeny v soustavě chránicích trubek, a celé toto uspořádání je uloženo v zemi v pískovém loži.

Optické kabely mohou obsahovat až stovky optických vláken, a v závislosti na druhu optického kabelu mohou obsahovat tahové prvky, různá vyztužení pomocí kevlarových vláken a další části zajišťující mechanickou odolnost optického kabelu.

První trubka slouží jako zafukovací prostředí, kterým je možné protáhnout optické kabely na velkou vzdálenost.

Druhá trubka slouží jako mechanická ochrana, a zároveň díky své nepoddajnosti při pokládce zabezpečuje, že nedojde k nadměrnému mechanickému zatížení nebo zlomení jednotlivých optických vláken v zatáčkách, vývodech a různých odbočnicích na hlavní trase.

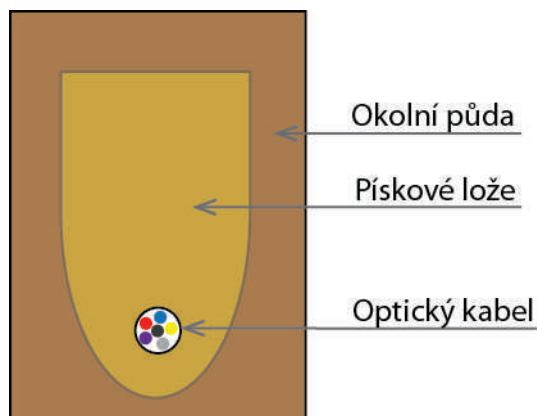
Pískové lože slouží jako ochrana před mechanickým poškozením optické trasy prostřednictvím různých kamenů a velkých pevných částí nacházejících se v půdě. Zároveň plní funkci indikační, kdy při zemních pracích jiných oborů (kanalizace, elektrikáři, plynáři a další) může dojít ke křížení tras a pískem zbarvená zem upozorní dělníky, že v blízkosti již je nějaké vedení a v konkrétním místě by měli pracovat obezřetněji. Předejde se tak porušení, nebo dokonce přerušení celé optické trasy.

Výhody tohoto způsobu uložení jsou zřejmé z předchozího obrázku. Optická vlákna jsou několikanásobně chráněna před destruktivním působením vnějších vlivů (tlak, vlhkost, hlodavci a další ...). Jako měřící vlákno může být použito kterékoliv funkční optické vlákno ve svazku a není tak zapotřebí znovu vykopávat celou optickou trasu a pokládat nové vedení, dojde tak k ušetření nákladů potřebných k zakopání vedení.

Nevýhody tohoto způsobu uložení vyplývají z použití několikanásobné ochrany, protože měřená veličina (teplota, tlak) musí nejprve působit na všechny složky ochrany, než se dostane k měřicímu vláknu. Měřená veličina je buď velice pohlcena, nebo u tepelného působení dojde ke zpoždění reakce optického vlákna na zvýšení teploty a následně, když teplota opět klesne, optické vlákno ještě určitou dobu bude díky setrvačnosti prostředí udávat chybné hodnoty.

5.2 Pevné uložení jednoho optického vlákna

Způsob uložení je znázorněn na obr. 5.2, kde je položen optický kabel přímo do pískového lože.



Obr. 5.2: Uložení optického kabelu

Optický kabel se skládá z několika optických vláken a dalších krycích vrstev, které závisí na druhu použitého optického kabelu. Při měření je pak vybráno jedno vlákno s nejlepšími parametry pro konkrétní měření.

Pískové lože slouží k ochraně optického kabelu a k optické indikaci, stejně jako v předchozí kapitole.

Výhody takto uloženého optického kabelu spočívají v co možná největším možném kontaktu měřicího vlákna s měřenou veličinou. Její vliv není brzděn žádnou dodatečnou ochranou a pískové lože umožní těsné obklopení měřicího kabelu, tak i

působící vibrace i změna teploty není zpomalována a naměřené výsledky odpovídají více skutečnosti.

Nevýhody položení optického kabelu přímo do pískového lože jsou následující - téměř minimální mechanická odolnost a ochrana před destruktivními vlivy, které mohou působit na vlákno. Kvůli slabé mechanické ochraně je daleko snazší optický kabel zcela přerušit.

6 NÁVRH VLASTNÍHO ŘEŠENÍ

Tato kapitola je zaměřena na návrh dvou měřících systémů využívajících standardní optická vlákna používaná v telekomunikacích, jež zde budou použity jako rozprostřené optické vláknové senzory.

6.1 Základní útlumy optických vláken

Na začátek jsou zde uvedeny základní útlumy prvků vyskytujících se na měřicí optické trase [12].

Prvek	ISO/IEC	ITU
Svár	0,3 dB	0,15 dB
Konektor	0,75 dB	0,5 dB
SM 1310 nm	inside 1 dB/km; outside 0,5 dB/km	0,33 dB/km
SM 1550 nm	inside 1 dB/km; outside 0,5 dB/km	0,2 dB/km
MM 850 nm	3,5 dB/km	2,5 - 3 dB/km
SM 1300 nm	1,5 dB/km	0,6 - 1 dB/km

6.2 Řešení pomocí polarizovaného Rayleighova rozptylu

Na dvou následujících stránkách jsou na obr. 6.1 a obr. 6.2 uvedeny dva měřící systémy využívající polarizovaného Rayleighova rozptylu. Ten byl popsán v předchozí kapitole 3.3.2.

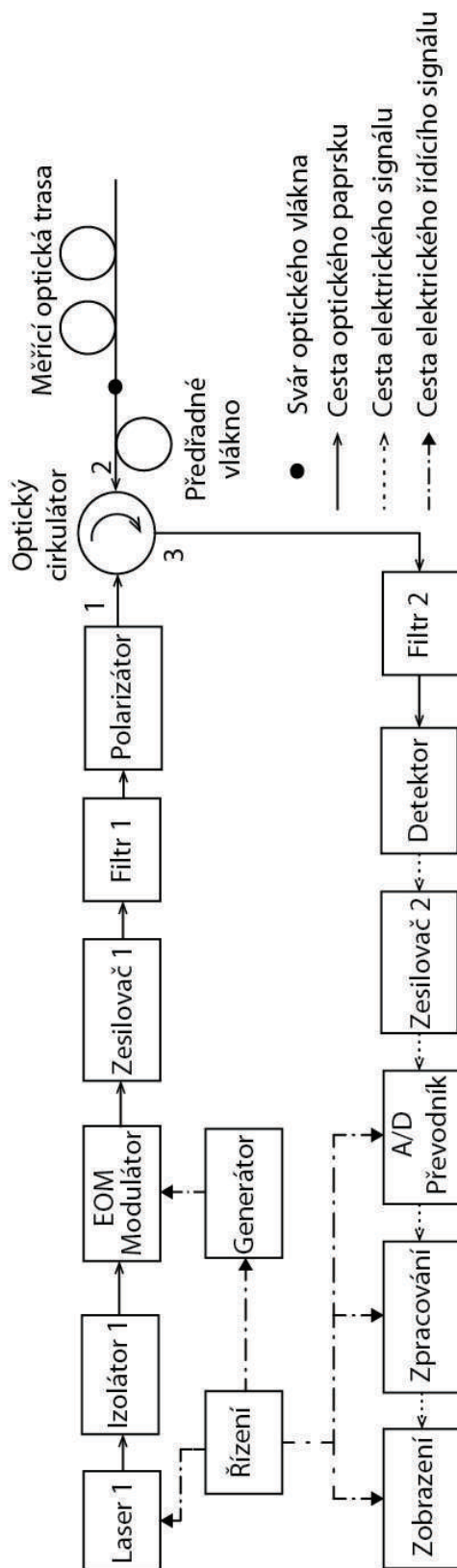
Zvolení dvou druhů zapojení měřících systémů má za úkol porovnat přesnost měření při použití a vynechání dvojlomového analyzátoru. Předpokládaný vliv by se měl projevit nejvíce pro měřené veličiny nacházející se na konci měřícího optického vlákna. Přesněji by se měla měnit změřená pozice pro jeden vliv působící na konkrétní místo měřeného vlákna pro oba měřící systémy. Důvod této chyby by měl spočívat v chybném určení času šíření zpětného rozptylu.

6.2.1 Popis hlavních bloků POTDR zapojení

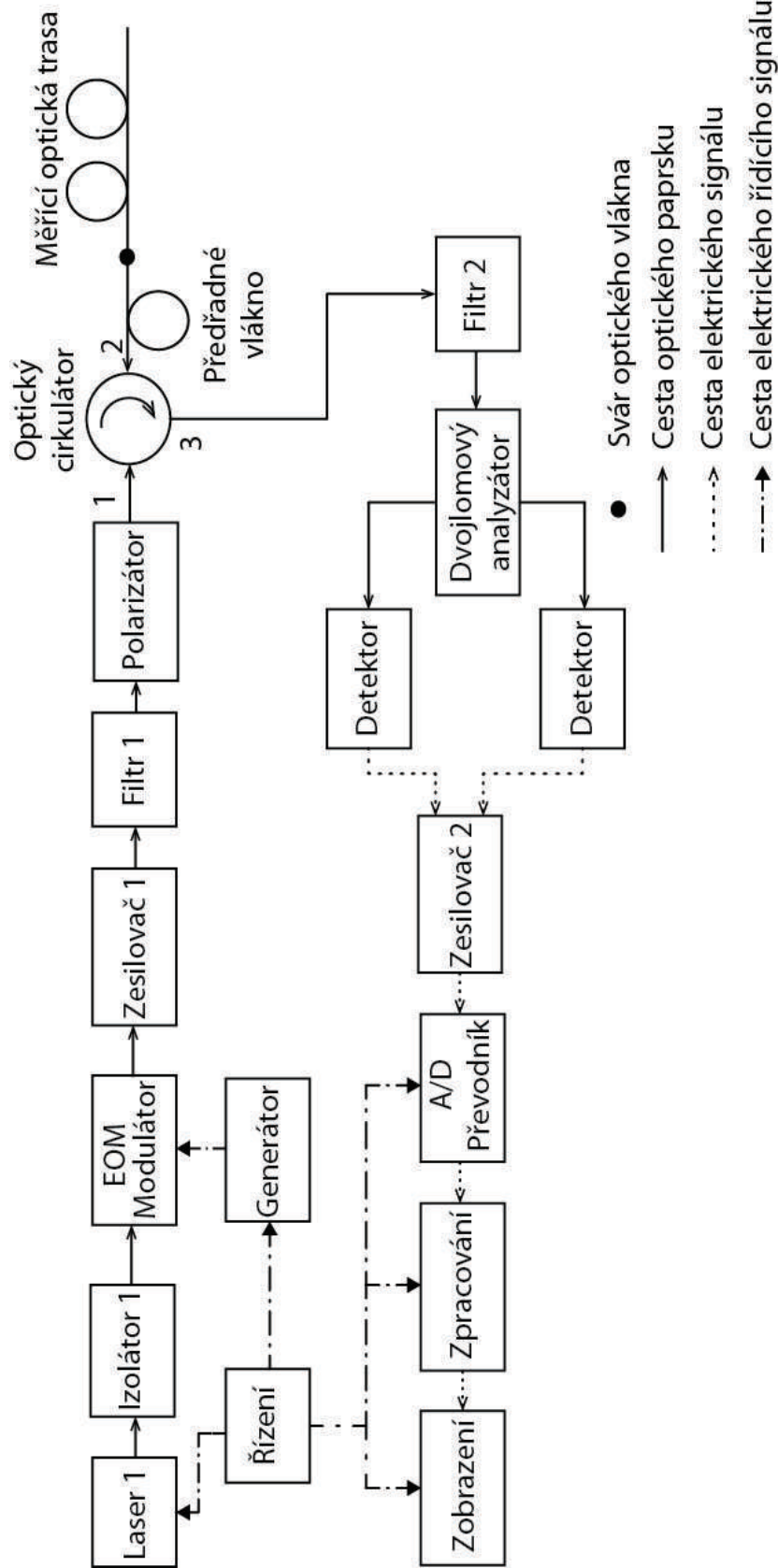
Laser DFB pracuje na vlnové délce 1550 nm s velmi úzkou šířkou vyzařovaného spektra ($\ll 0,1\text{nm}$) zajištěnou difrakční mřížkou umístěnou přímo ve struktuře laseru. Šířka impulzu se zajistí EOM modulátorem, kdy nesmí klesnout pod úroveň 10 ns, tato doba odpovídá životnosti fotonu v optickém vlákne [8].

Jako filtry jsou využívány Braggovské mřížky, které slouží pro potlačení všech nežádoucích vlnových délek, které by mohly ovlivňovat vlastní měření.

6.2.2 Blokové zapojení měřící soustavy Rayleighova rozptylu



Obr. 6.1: Blokové zapojení k měření Rayleighova rozptylu 1.



Obr. 6.2: Blokové zapojení k měření Rayleighova rozptylu 2.

6.2.3 Popis funkce a měření navržených měřících soustav využívající Rayleighova rozptylu

Obr. 6.1 a obr. 6.2 znázorňují základní bloková zapojení měřícího systému využívajícího polarizovaného optického paprsku.

Úkolem bloku **Laser 1** je vytvoření laserového paprsku na vlnové délce 1550 nm.

Blok **Izolátor 1** slouží k ochraně zdroje laserového záření (**Laser 1**) před laserovým zářením procházejícím z měřící soustavy k bloku **Laser 1**.

EOM Modulátor má za úkol modulovat optický paprsek z bloku **Laser 1**. Jedná se o elektro-optický modulátor řízený elektrickým signálem, který určuje frekvenci výstupního sledu optických impulzů. Na frekvenci optických impulzů závisí rozlišovací schopnost a možný dosah měřící soustavy.

K zesílení optického signálu na požadovanou úroveň, aby byl optický paprsek schopen doputovat na konec měřícího optického vlákna, slouží blok **Zesilovač 1**.

Jako ochrana před vnikem jiných vlnových délek než požadované vlnové délky 1550 nm je do měřící soustavy zapojen blok **Filtr 1**.

Polarizátor slouží k určení přesně definované optické polaritě laserového paprsku, který slouží k měření pozorovaných veličin působících na optické vlákno.

Optický cirkulátor je optické zařízení umožňující převod optického signálu mezi svými vstupy. Optický signál vstupující do vstupu 1 je převeden na výstup 2. Z výstupu 2 je převeden vzniklý odražený optický signál na měřící optické trase na výstup 3. Z výstupu 3 není převeden žádný optický signál na vstup 1.

Předřadné vlákno slouží pouze jako ochrana před plným odrazem měřícího optického signálu do detekční části, aby nedošlo k jejímu poškození. K takovéto události by mohlo dojít při přerušení **Měřící optické trasy** na jejím začátku.

Prvním blokem v detekční části je **Filtr 2**, který má stejný úkol jako **Filtr 1**, to znamená propustit pouze optický signál na vlnové délce 1550 nm.

Detektor je optické zařízení převádějící optický na elektrický signál. Tento převod je pro další zpracování takto získaných dat nezbytný.

Zesilovač 2 slouží k případnému zesílení elektrického signálu získaného z **Detektoru** na požadovanou hodnotu pro převod na digitální veličinu.

A/D Převodník má za úkol převod spojitého elektrického signálu na určitou digitální proměnnou, která bude dále zpracovávána.

Bloky **Zpracování** a **Zobrazení** slouží k správné reprezentaci naměřené informace. Zde je definován druh výstupu (graf, výpis hodnot, vyhlášení poplachu ...) a jejich následné zobrazení.

Hlavní blok těchto blokových zapojení je **Řízení**, má za úkol správu a dohled nad bloky **Laser 1**, **Generátor**, **Zobrazení**, **Zpracování**, **A/D převodník**. Zajišťuje celkovou synchronizaci a spouštění jednotlivých bloků.

Blok **Generátor** slouží k vytváření řídicího elektrického signálu pro **EOM Modulátor** v závislosti na nastavení bloku **Řízení**.

6.3 Řešení pomocí polarizovaného Brillouinova rozptylu

Na dvou následujících stránkách jsou na obr. 6.3, obr. 6.4 a obr. 6.5 uvedeny tři měřicí systémy využívající Brillouinova rozptylu. Ten byl popsán v předchozí kapitole 4.3.3.

V prvním případě na obr. 6.3 je pomocný laser umístěn úplně na konci měřicího vedení. Mělo by tak dojít ke zpřesnění měření, zejména Brillouinových rozptylů vznikajících ke konci měřicího vedení.

Druhý případ znázorněný na obr. 6.4 by umožňoval vytvořit kompaktní měřicí systém bez nutnosti připojovat další zařízení na konec měřicího optického vlákna.

Vzájemným porovnáním naměřených hodnot pro konkrétní měřicí vlákno by bylo možné určit, do jaké míry je výhodné jedno nebo druhé navržené řešení měřicího systému.

6.3.1 Popis hlavních bloků BOTDR zapojení

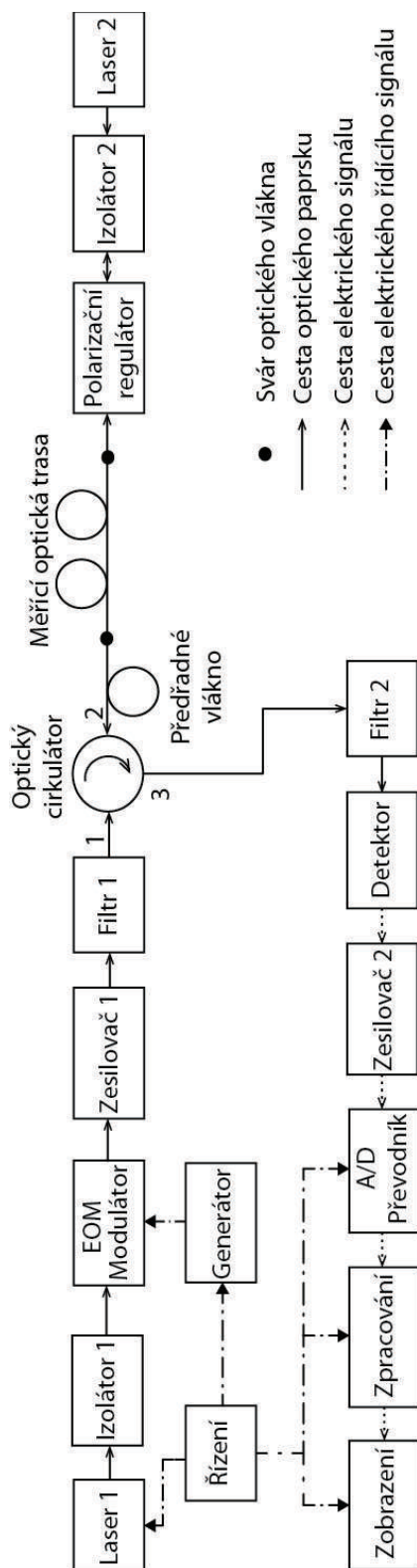
Laser 1 je DFB pracující na vlnové délce 1550 nm s co nejmenší spektrální šířkou vyzařovaného optického signálu. Použité izolátory slouží pouze jako ochrana před zničením laseru nějakou chybou v samotném zapojení. EOM modulátor určuje přesnou šířku vysílaného impulzu, externí modulátor byl použit z důvodu větší spektrální čistoty výstupního signálu, než je tomu u přímo modulovaných laserů. Optický zesilovač zesílí optický signál až na úroveň 500mW. Filtry opět plní funkci propustí, které potlačí všechny nežádoucí složky vyskytující se v optickém signálu. Optický cirkulátor plní funkci oddělovače zdroje měřicího signálu a měřicího optického vlákna. Umožňuje přechod ze vstupu 1 na vstup 2, a zároveň z vstupu 2 na výstup 3. Jiným směrem se optický signál nemůže šířit. Vložený útlum pro jednotlivé přechody se pohybuje kolem 0,9 dB a izolace v opačném směru (vstupu 2 na vstup 1) je průměrně > 50 dB, záleží na zvoleném cirkulátoru.

Předřadné vlákno slouží jako pokrytí mrtvé zóny měřicího systému, aby bylo možné měřit měřené vlákno hned od svého začátku, a zároveň slouží jako ochrana před plným odrazem vzniklým porušením nebo narušením hned na prvních metrech měřicího vlákna.

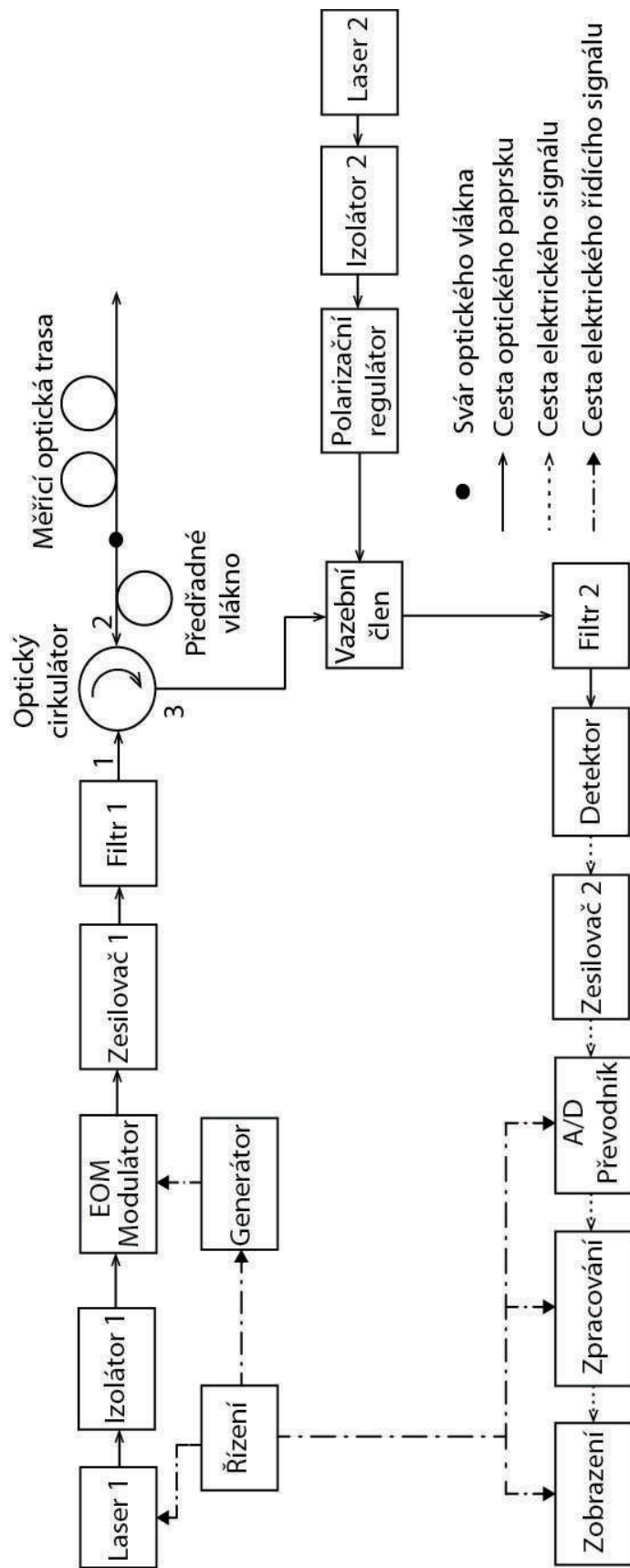
Polarizační regulátor slouží k přesnému nastavení polarizace laseru 2 tak, aby došlo k co největšímu zesílení Brillouinova zpětného rozptylu. Ten je zesilován laserem 2, který vysílá optický paprsek s dost širokým spektrem, aby obsáhl všechny frekvence, na kterých vzniká pro konkrétní optické vlákno stimulovaný Brillouinův rozptyl.

Detekční část je daleko problematičtější než u předchozího měřicího systému, protože se zde neměří intenzita zpětného rozptylu, ale frekvence tohoto rozptylu. Proto je zapotřebí určit v čase, jakou frekvenci daný rozptyl nabývá. Je možné rozdělit příchozí optický signál na soubor jednotlivých optických vláken, kde právě jedno optické vlákno bude odpovídat konkrétní vlnové délce Brillouinova rozptylu, a kde bude zakončeno fotodetektorem.

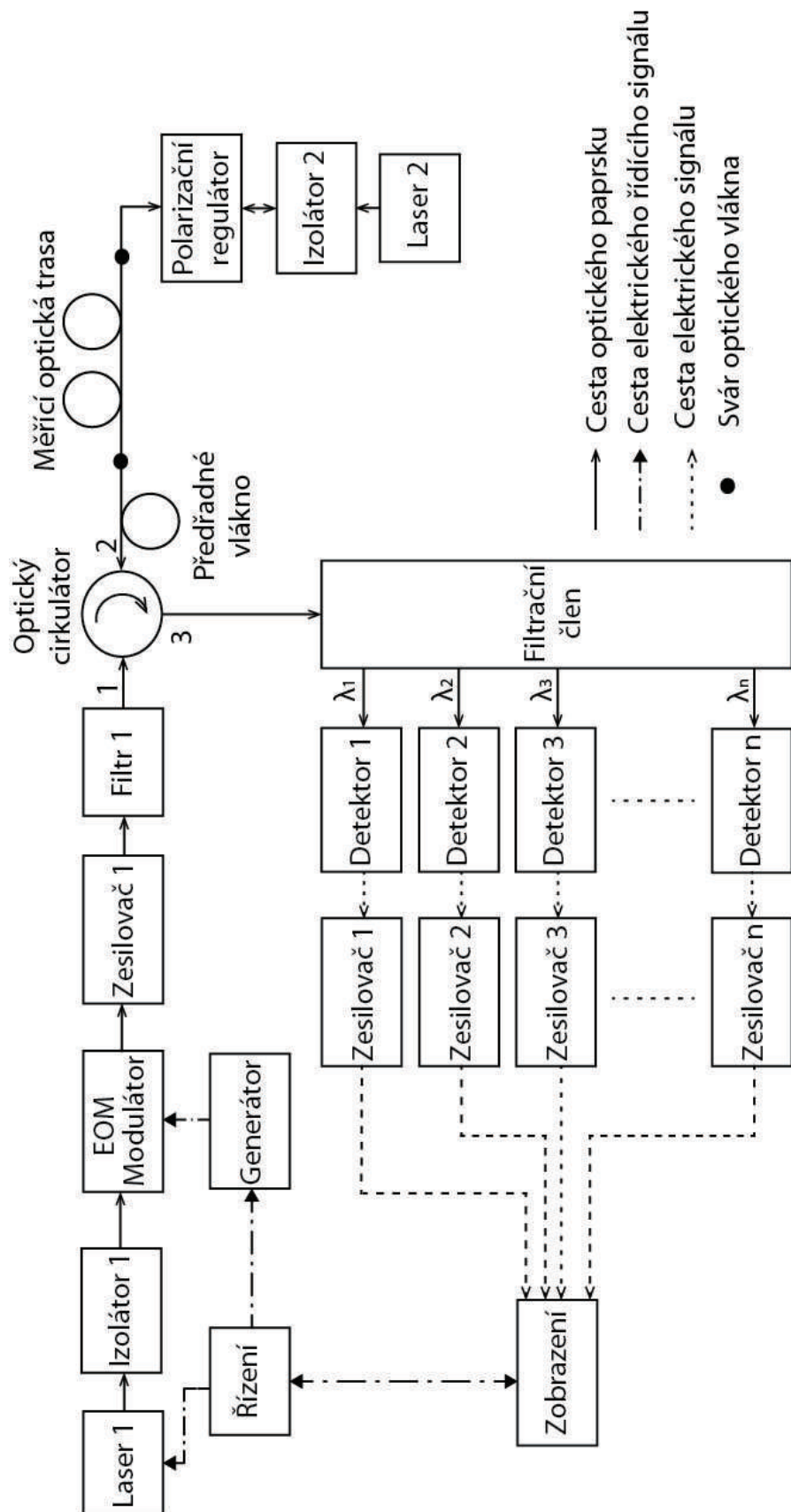
6.3.2 Blokové zapojení měřící soustavy pro zjištění Brillouinova rozptylu



Obr. 6.3: Blokové zapojení k měření Brillouinova rozptylu 1.



Obr. 6.4: Blokové zapojení k měření Brillouinova rozptylu 2.



Obr. 6.5: Blokové zapojení k měření Brillouinova rozptylu 3.

6.3.3 Srovnání navržených blokových měřících systémů

V předchozí kapitole 6.3.2 bylo uvedeno několik měřících blokových zapojení využívajících Brillouinova rozptylu.

Základní princip funkce bloku je obdobný jako v kapitole 6.2.3 a rozdíly již byly uvedeny v kapitole 6.3.1.

První dva navržené měřící blokové systémy zobrazené na obr. 6.3 a obr. 6.4 jsou téměř totožné, liší se pouze v umístění pomocného Laseru 2. Celková složitost a náročnost kladená na jednotlivé bloky je však stejná.

Z tohoto důvodu byl vytvořen měřící blokový systém zobrazený na obr. 6.5. Tento systém se liší od předcházejících systémů ve své detekční části.

Je zde použit Filtrační člen, jehož úkolem je přichodící optický paprsek rozdělit do předem definovaných vlnových délek a ty pak samostatně odeslat na určitý výstup.

Hlavní myšlenka tohoto řešení vychází z vlastnosti Brillouinova rozptylu, který je tímto blokovým měřícím systémem využíván. Tato vlastnost spočívá ve změně frekvence (vlnové délky) vzniklého Brillouinova rozptylu v závislosti na druhu a velikosti vnějšího působení na Měřící optickou trasu.

Při zmapování možných působení a určení, jakým způsobem bude docházet k ovlivňování vznikajícího Brillouinova rozptylu, např. navrženými měřícími systémy znázorněnými na obr. 6.3 a obr. 6.4. Bude možné určit hlavní vlnové délky, na kterých se bude vyskytovat Brillouinův rozptyl, a ty potom nastavit do Filtračního členu.

V okamžiku vzniklé události dojde k detekci optického signálu na určitém detektoru, který je určen vstupní vlnovou délkou vycházející z Filtračního členu.

Možnosti zobrazení takto získaných dat jsou však daleko více omezeny než u předchozích měřících systémů, protože v tomto případě jsou měřeny jen určité předem definované části optického spektra a ne celé optické spektrum.

Hlavní výhodou tohoto blokového měřícího systému zobrazeného na obr. 6.5 jsou nižší pořizovací náklady na detekční část než u předcházejících dvou zapojení, kdy byl za potřebí dostatečně přesný spektrální analyzátor pracující na těchto vlnových délkách.

6.4 Výpočet přibližného dosahu měřicího systému

Pokud jsou známy základní parametry měřicí soustavy, je možné vypočítat přibližnou délku měřicího optického vlákna.

Jako základní matematický vzorec je použit vzorec (3.9) pro útlum a vzorec (3.10) vyjadřující útlum vztažený na určitou délku:

$$A = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right) \quad [dB] \quad (3.9)$$

$$a = \frac{A}{L} = \frac{10}{L} \cdot \log\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right) \quad [dB/km] \quad (3.10)$$

Matematickou úpravou je možné získat ze vzorce (2.9) matematický zápis vyjadřující velikost výkonu na výstupu P_{out} , při známém útlumu A a při velikosti vstupního výkonu P_{in} .

$$A = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right) \Rightarrow P_{out} = P_{in} \cdot 10^{\frac{-A}{10}} \quad [W]$$

Optický zesilovač má výkon 500 mW, útlum cirkulátoru je - 0,9 dB, útlum optického sváru je - 0,15 dB a útlum jednovidového optického vlákna je $a = 0,2$ dB/km. Při těchto parametrech musí být výstupní výkon na konci měřicího vlákna roven 5 mW, aby zde vznikl stimulovaný Brillouinův rozptyl.

Výstupní výkon, který je navázán do měřicího vlákna, je možné vyjádřit takto:

$$P_{out} = P_{in} \cdot 10^{\frac{-A}{10}} \Rightarrow P_{out} = 500 \cdot 10^{\frac{-0,9-0,15}{10}} = 392,62 \quad [mW]$$

Pro vyjádření možné délky měřicího optického vlákna nejdříve vyjádříme útlum trasy:

$$A = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{5}{392,62}\right) = -18,95 \quad [dB]$$

Z vypočítané hodnoty -18,95 dB je možné jednoduchým výpočtem vyjádřit možnou délku měřicího optického vlákna l :

$$l = \frac{|A|}{a} = \frac{|-18,95|}{0,2} = 94,75 \quad [km]$$

Při zvolených parametrech je možné použít měřicí vlákno dlouhé $l = 94,75$ km.

6.4.1 Základní výpočty vlastností Brillouinova rozptylu

K výpočtu frekvenčního posuvu Brillouinova rozptylu je použit vzorec (3.20).

$$v_B = 2 \cdot \frac{n \cdot V_A}{\lambda_0} \quad [Hz] \quad (3.20)$$

Výpočet bude proveden pro dva okrajové stavy, kdy hodnota indexu lomu n bude nabývat hodnot 1,4 a 1,5. Veličina $V_A = 5775$ m/s a $\lambda_0 = 1550$ nm.

$$v_{B1} = 2 \cdot \frac{n \cdot V_A}{\lambda_0} = 2 \cdot \frac{1,4 \cdot 5775}{1550 \cdot 10^{-9}} = 1,043225806 \cdot 10^{10} \quad [Hz]$$

$$v_{B2} = 2 \cdot \frac{n \cdot V_A}{\lambda_0} = 2 \cdot \frac{1,5 \cdot 5775}{1550 \cdot 10^{-9}} = 1,117741935 \cdot 10^{10} \quad [Hz]$$

Frekvenci hlavního optického paprsku je možné vypočítat pomocí úpravy vzorce (1.4), kdy $\lambda = \lambda_0 = 1550$ nm a $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [m] \quad (1.4)$$

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8}{1550 \cdot 10^{-9}} = 1,9354839 \cdot 10^{14} \quad [Hz]$$

Hodnoty vlnových délek, na kterých se projeví Brillouinův rozptyl, je možné vyjádřit za pomoci vzájemného odečtení získaných výsledků a převedení na vlnovou délku pomocí vzorce (1.4.)

$$f_1 = 1,9354839 \cdot 10^{14} - 1,043225806 \cdot 10^{10} = 1,93537955 \cdot 10^{14} \quad [Hz]$$

$$f_2 = 1,9354839 \cdot 10^{14} - 1,117741935 \cdot 10^{10} = 1,935372126 \cdot 10^{14} \quad [Hz]$$

$$\lambda_1 = \frac{c}{f_1} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,93537955 \cdot 10^{14}} = 1,55008355 \cdot 10^{-6} \quad [m]$$

$$\lambda_2 = \frac{c}{f_2} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,935372126 \cdot 10^{14}} = 1,55008949 \cdot 10^{-6} \quad [m]$$

Díky takto vypočítaným údajům je zřejmé, v jakém rozmezí vlnových délek se bude pohybovat Brillouinův rozptyl v závislosti na změně indexu lomu optického vlákna díky působení vnější veličiny.

7 SIMULACE

Z důvodu vysokých nákladů spojených s pořízením vhodných měřicích systémů ke zkoumání jevů na reálném optickém vlákně, kterými se tato práce zabývá, byla zvolena počítačová simulace prostřednictvím softwaru OptSim a MATLAB.

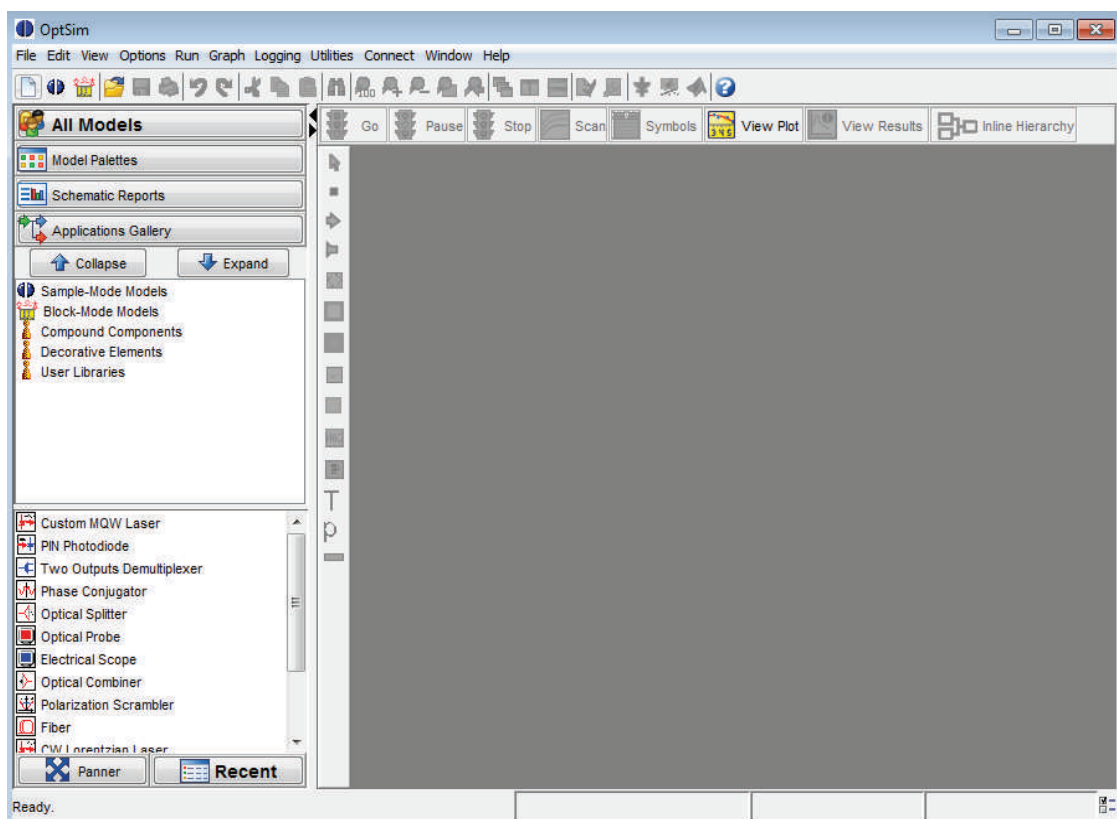
Navržené simulace přesně neodpovídají měřicím systémům navrženým v minulé kapitole, ale snaží se přizpůsobit prostředí softwaru OptSim k zobrazení a další práci se stimulovaným Brillouinovým rozptylem.

7.1 OptSim v. 5.2

Jedná se o specializovaný software vyvinutý společností RSoft Design Group verze 5.2, určený k simulaci a zefektivnění rozsáhlých optických telekomunikačních tras.

Tímto softwarem je možné propočítat přesné parametry navrhované sítě s možností ověření chování zkoumaného systému na různé vnější i vnitřní faktory. Díky takto provedené simulaci sítě je možné odhalit případné nedostatky v návrhu, které by se mohly projevit až po nějaké době od uvedení sítě do provozu.

7.1.1 Hlavní obrazovka OptSim v. 5.2

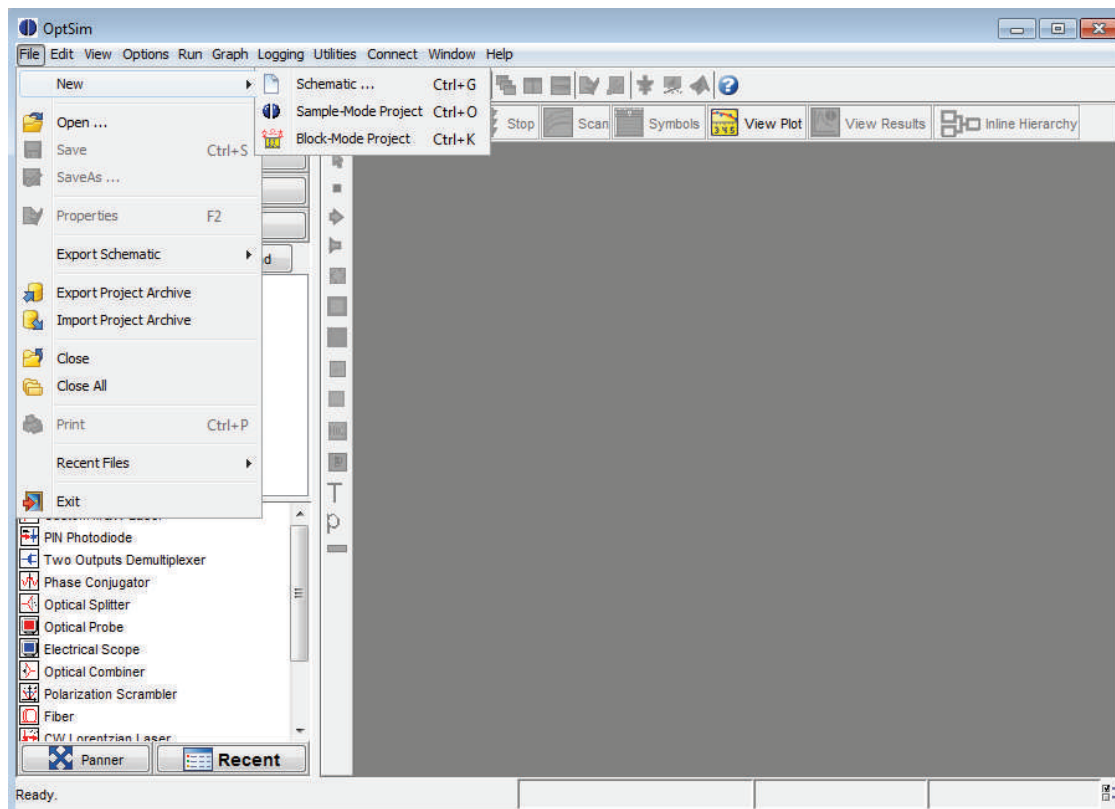


Obr. 7.1: Hlavní obrazovka OptSim v. 5.2.

Na obr. 7.1 je znázorněna hlavní obrazovka softwaru OptSim v. 5.2, která se zobrazí hned po spuštění. Velká část nabídky je šedá a zpřístupní se teprve tehdy, až je založen nový projekt nebo otevřen již dříve vytvořený projekt.

Tento software obsahuje mnoho ukázkových projektů, zaměřených na nejrůznější možnosti práce v jeho rámci. Podrobné informace o tomto softwaru a jeho simulacích je možné získat na stránkách výrobce www.rsoftdesign.com nebo v nápovědě v programu zmíněného softwaru.

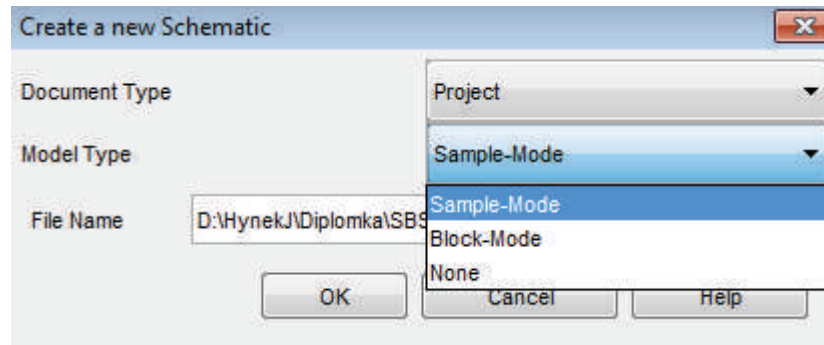
7.1.2 Vytvoření nového projektu



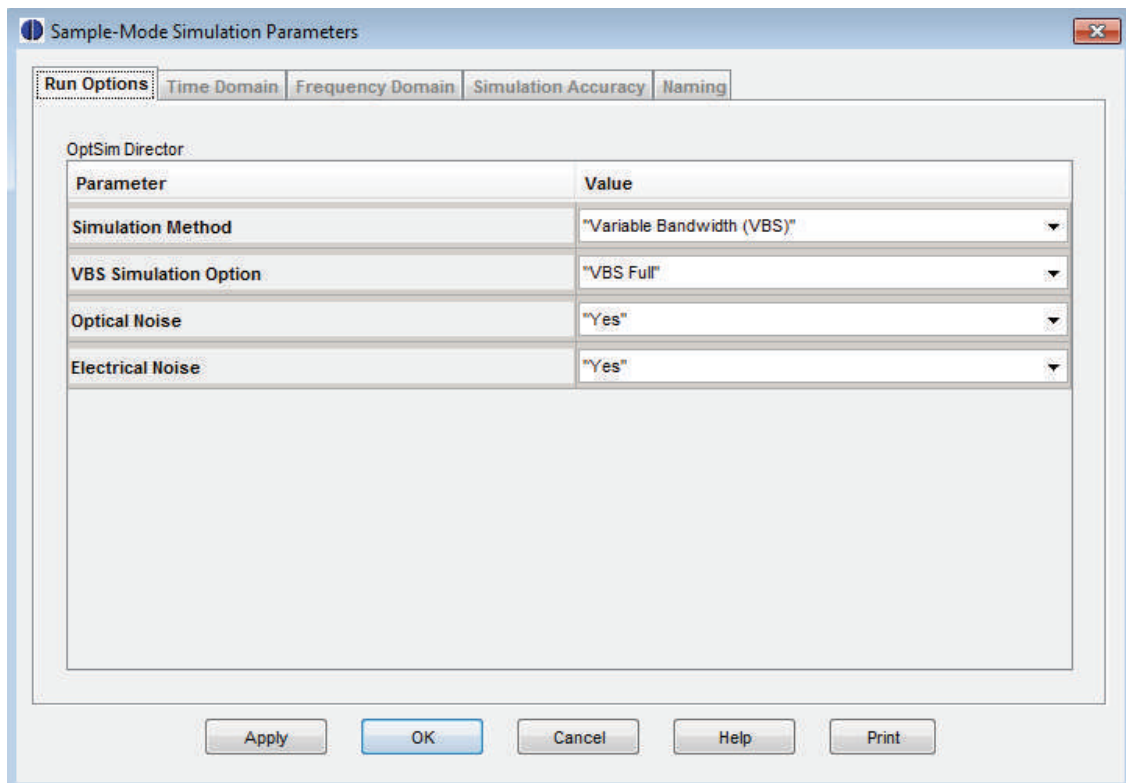
Obr. 7.2: Nový projekt.

Software OptSim v. 5.2 pracuje ve dvou základních režimech - Sample-Mode a Bloc-Mode. Volba vhodného simulačního modu závisí na charakteru simulace a na druhu výstupních dat.

Samotné vytvoření nového projektu je intuitivní, jak je naznačeno na obr. 7.2, kdy ve dvou krocích dojde k založení nového projektu.



Obr. 7.3: Volba druhu nového projektu.



Obr. 7.4: Nastavení simulace.

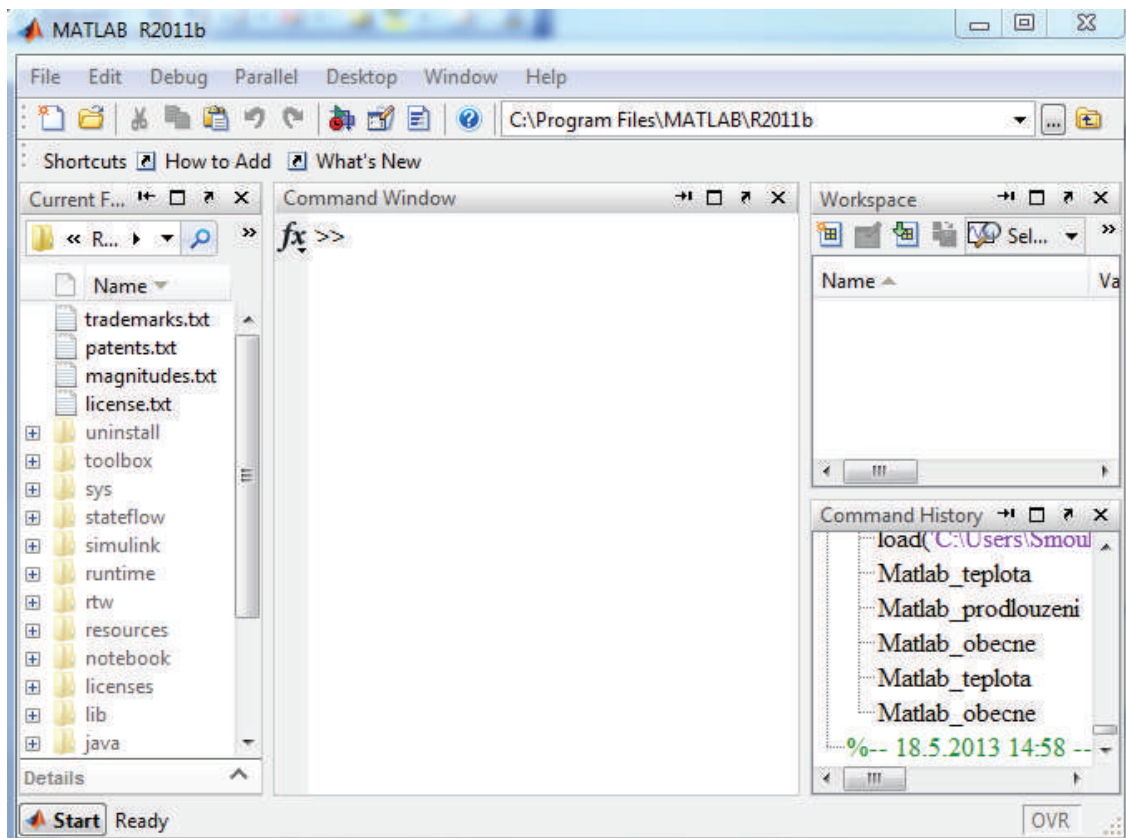
Obr. 7.3 popisuje první krok vytvoření simulace, kde se volí druh dokumentu a simulace a zároveň pozice ukládání simulace a jejich výsledků. Po potvrzení tlačítkem OK se zobrazí okno na obr. 7.4, ve kterém je možné nastavit parametry samotné simulace, jako je třeba doba trvání simulace a další. Po potvrzení tlačítkem OK se zobrazí hlavní pracovní okna podobná obr. 7.1, ale šedé nabídky jsou funkční a k dispozici je bílá (dříve šedá) pracovní plocha, na kterou je formou přetahování možné skládat funkční bloky, spojovat je a vytvořit tak požadovanou simulační strukturu.

7.2 MATLAB

Jedná se o specializovaný matematický software vyvinutý společností MathWorks, určený k matematickým výpočtům, zpracování souboru dat, simulaci chování funkcí a grafickému zobrazení výstupních dat.

Prostřednictvím tohoto softwaru je uživatel schopen počítat nejrůznější matematické operace a může zde psát i celé matematické programy, které na svém vstupu načtou určitá data, zpracují je a zobrazí výsledek, případně spustí další matematický program.

7.2.1 Hlavní obrazovka MATLAB



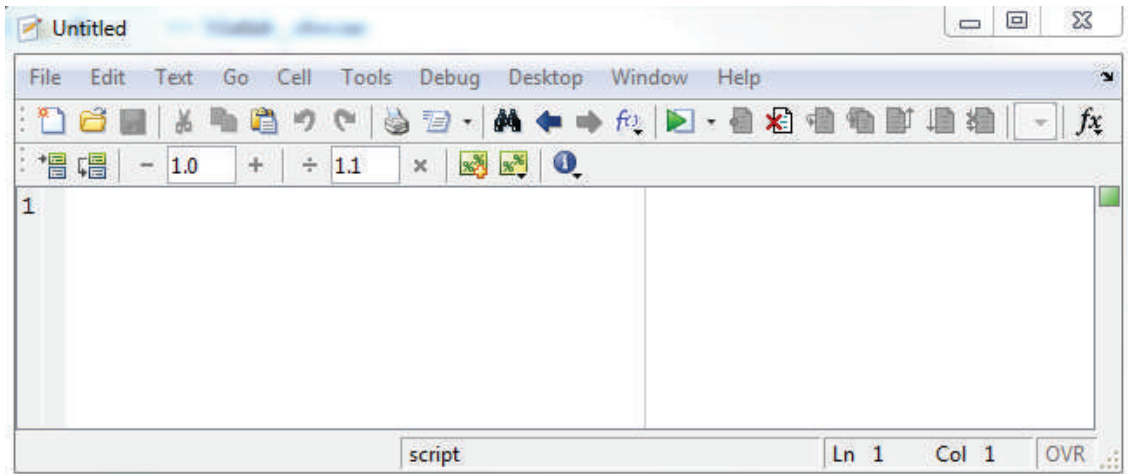
Obr. 7.5: Hlavní obrazovka MATLAB.

Na hlavní obrazovce MATLABu, která je znázorněna na obr. 7.5, je patrné, že pracovní plocha je rozdělena do několika prostorů. V levé části okna je zobrazena struktura adresářů, díky které je možné procházet soubory na disku uživatele. V pravé straně jsou dvě pomocná okna, kdy první zaznamenává použité příkazy a druhé naposledy spuštěné projekty.

Matematické operace je možné zapisovat přímo do hlavní obrazovky a každou operaci potvrzovat (při potvrzení operace se hned zobrazí výsledek), nebo napsat script, který obsahuje více po sobě jdoucích matematických operací, a poté volat pouze název scriptu a nevypisovat stále ty samé matematické operace.

7.2.2 Vytvoření nového scriptu

Opět je to velice intuitivní, podobně jako v softwaru OptSim. Volbou položky File → New → Script, nebo klávesovou zkratkou Ctrl + N.



Obr. 7.6: Nový script.

Otevře se nové pracovní okno zobrazené na obr. 7.6, do kterého se zadávají potřebné funkce a matematické operace.

7.2.3 Základní operace

Zde bude uvedeno a popsáno několik základních funkcí použitých při tvorbě kódu, který má za úkol zpracovat data přijatá ze softwaru OptSim a opět je upravit do formátu tak, aby s nimi mohl software OptSim dále pracovat.

Software OptSim vygeneruje soubor proměnných obsahující různá data, s každou proměnnou se musí zacházet zvlášť. Blíže bude tento proces popsán v kapitole 7.3.3.

```
savefile='surovadata.mat';  
save (savefile);
```

Funkce `savefile` umožní uložit všechny proměnné přijaté i vytvořené ve scriptu do souboru `surovadata.mat`. Tento soubor je tímto příkazem automaticky vytvořen ve stejném adresáři, kde je zároveň uložen samotný script. Je zde použit z důvodu možnosti dalšího zpracování získaných dat mimo software OptSim.

```
spect = fftshift(fft(Opt_in));  
Opt_out = ifft(fftshift(spect));
```

Metodou `fftshift(fft(Opt_in))` je proměnná převedena pomocí Furierovy transformace z časové oblasti do frekvenční oblasti signálu, a je tak možné pracovat s frekvenčním spektrem zkoumaného signálu. Pro zpětný převod slouží metoda `ifft(fftshift(spect))`.

```

figure(Graf)
Graf = Graf + 1;
subplot(1,2,1)
plot(xline, (abs(spect))/1000)
title('Absolute part')
ylabel('Optical power [dBm] \rightarrow ');
xlabel('Frequency [THz] \rightarrow');

```

Grafickým výstupem v softwaru MATLSB může být velké množství grafů a modelů. Příkaz `plot` vykreslí klasický 2D graf se souřadnicemi x a y . Proměnné v kulatých závorkách označují hodnoty grafu pro osu x a pro osu y .

Příkazy `title`, `ylabel`, `xlabel` slouží pro vytvoření popisů jednotlivých os i celého grafu, aby byl graf lépe pochopitelný.

Příkaz `figure` označuje číslo nově otevřeného okna s grafem. V případě, že tento parametr není nastaven a má se vykreslit více grafů, tak dojde k vykreslení všech grafů do jednoho nového okna a bude vidět pouze poslední vykreslený graf.

Příkaz `subplot` umožňuje zobrazit více grafů do jednoho nově otevřeného okna. Nastavením parametrů v kulaté závorce je možné ovlivnit rozložení grafů v nově otevřeném okně.

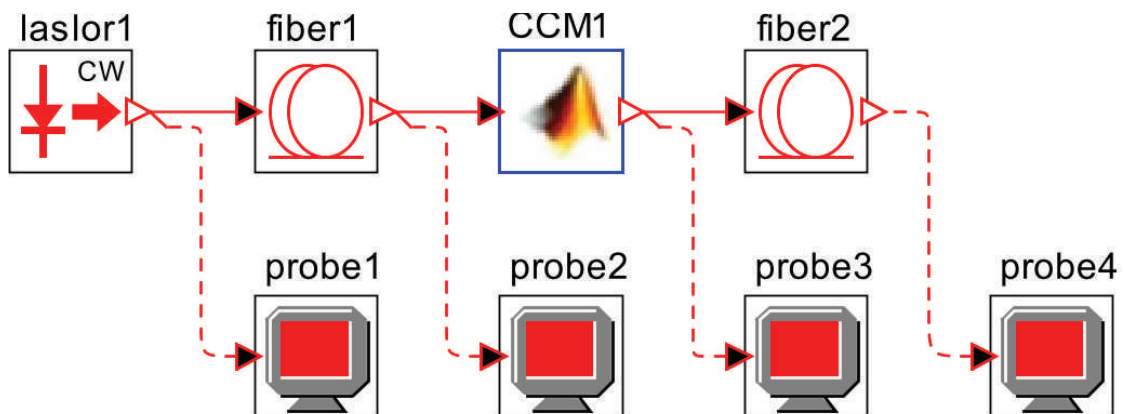
Kompletní kódy bloků jsou uvedeny v příloze A.

7.3 Vlastní simulace

Protože OptSim neumožňuje simulaci reflektometrických metod, které v této práci byly navrženy, byl vytvořen speciální modul, kterému je možné měnit parametry, a tak simulovat vznik stimulovaného Brillouinova rozptylu v optickém vlákně, a dále s těmito daty pracovat v softwaru OptSim nebo MATLAB.

Byly vytvořeny tři bloky simulující vznik stimulovaného Brillouinova rozptylu v závislosti na změně indexu lomu jádra, teploty a prodloužení optického vlákna. Tyto bloky jsou dále podrobněji popsány.

7.3.1 Základní zapojení



Obr. 7.7: Testovací zapojení.

Na obr. 7.7 je znázorněno blokové zapojení navržené v softwaru OptSim, za účelem ověření správné funkce nově vytvářených bloků.

Návrh má simulovat optickou trasu složenou ze zdroje optického paprsku a optického vlákna, na kterém v jeho polovině dojde ke zkoumané události, a dá tak vzniknout stimulovanému Brillouinovu rozptylu.

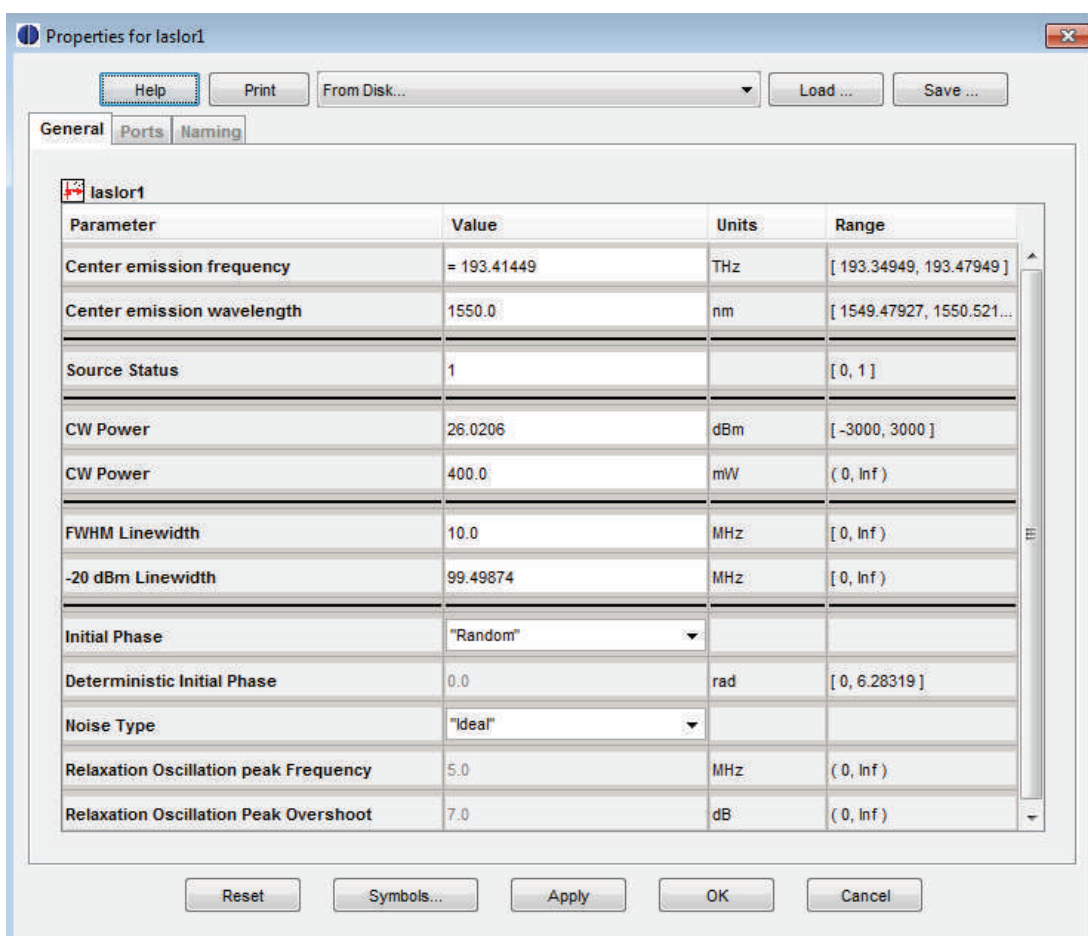
Ostatní bloky slouží pouze pro monitorování optického paprsku a pro zjištění, jak se změní průchodem jednotlivými bloky.

7.3.2 Popis funkce použitých bloků

Zde budou jen velice stručně popsány bloky použité v testovacím zapojení na obr. 7.7. Podrobné informace ke všem blokům v softwaru OptSim jsou dostupné v nápovědě OptSimu, jak již bylo zmíněno dříve.

Blok **laslor1** – slouží jako generátor (zdroj) optického paprsku pro celý systém. Je možné v tomto bloku měnit celou řadu parametrů, a tak se co nejvíce přiblížit k reálným parametrům dostupných optických laserů. Mezi základní parametry patří vlnová délka nebo optický výkon vysílaného optického paprsku.

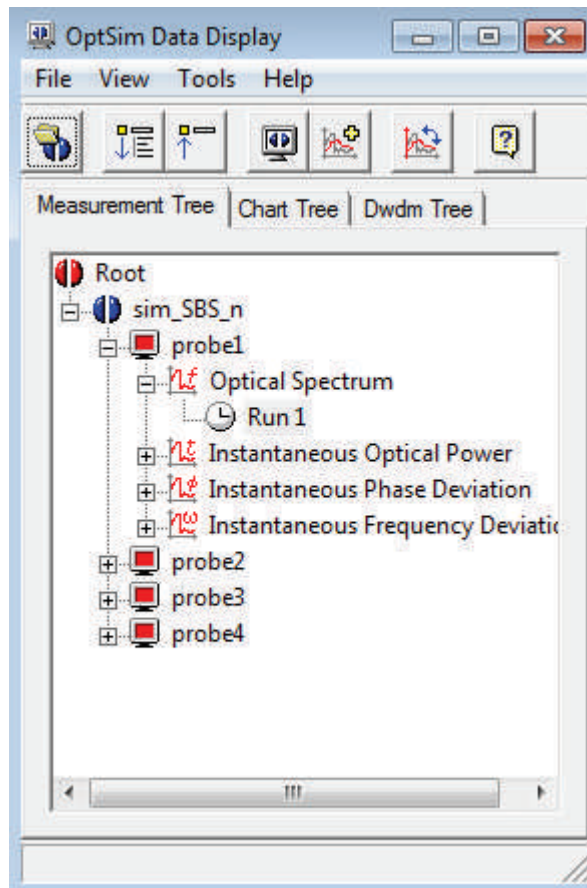
Na následujícím obr. 7.8 je znázorněno okno možných nastavení bloku **laslor1**, takováto podobná nastavovací okna mají všechny bloky v prostředí OptSim.



Obr. 7.8: Nastavení bloku laslor1.

Bloky **fiber1** a **fiber2** – zastupují optické vlákno, kterým se šíří optický paprsek. Mezi hlavní parametry patří samotná délka vlákna, v tomto případě 2 x 50 km, a útlum optického vlákna 0,2 dB/km. V těchto blocích je opět možné nastavit další parametry specifikující konkrétní aplikaci, podobně jako u předcházejícího bloku.

Bloky **probe1** až **probe4** – slouží pouze jako monitorovací nástroje umožňující pozorovat chování a změny optického paprsku průchodem jednotlivými bloky. Tyto bloky nijak neovlivňují parametry simulace nebo jinak nezanášejí chyby do celkového výsledku. Na obr. 7.9 je znázorněna nabídka pozorovatelných veličin u optického paprsku.



Obr. 7.9: Pozorovatelné průběhy modulem probe.

Modul **CCM1** – dává uživateli softwaru OptSim možnost vytvořit si vlastní moduly se svými podmínkami a nastaveními. Tímto způsobem je teoreticky možné vytvořit jakýkoliv modul, který uživatele napadne. Podrobný návod, jak vytvořit vlastní modul, je popsán v následující kapitole.

7.4 Blok CCM

Tento blok je odlišný od ostatních bloků v softwaru OptSim. Umožňuje uživateli vytvořit zcela nový blok pomocí matematických rovnic a pravidel funkčních v prostředí MATLAB.

Je možné tento blok popsat jako prostor, ve kterém platí rovnice a příkazy odpovídající prostředí softwaru MATLAB. Rozdíl od plnohodnotného prostředí MATLAB je, že uživatel nemá možnost kontrolovat posloupnost matematických operací a úpravu jednotlivých proměnných postupně, a nemůže tak najít případnou chybu v kódu. Při simulaci chybného kódu nedojde k žádnému varování, simulace se provede až po poslední funkční blok, v našem případě fiber1, a zde optický signál skončí. Za blokem CCM1 už nelze žádný optický signál detekovat.

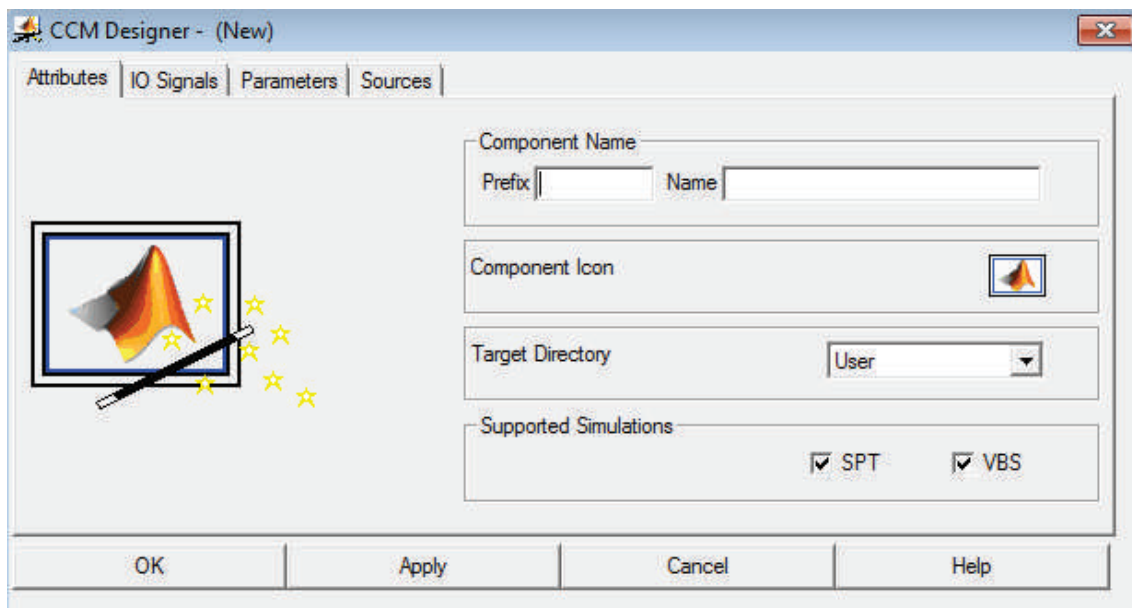
Jako nejeфекtivnějším řešením se ukázalo uložení všech dostupných dat z OptSimu do jednoho souboru suroadata.mat, postupem popsáním v kapitole 7.2.3.

Takto získaná data je možné nahrát do plnohodnotného softwaru MATLAB. Získáme tak přesný přehled, s jakými hodnotami pracujeme, jakých nabývají hodnot a v jakém formátu se musí zpracovávat, případně jaký musí být výstup, aby s takto získanými informacemi mohl software OptSim dále pracovat.

7.4.1 Vytvoření bloku CCM

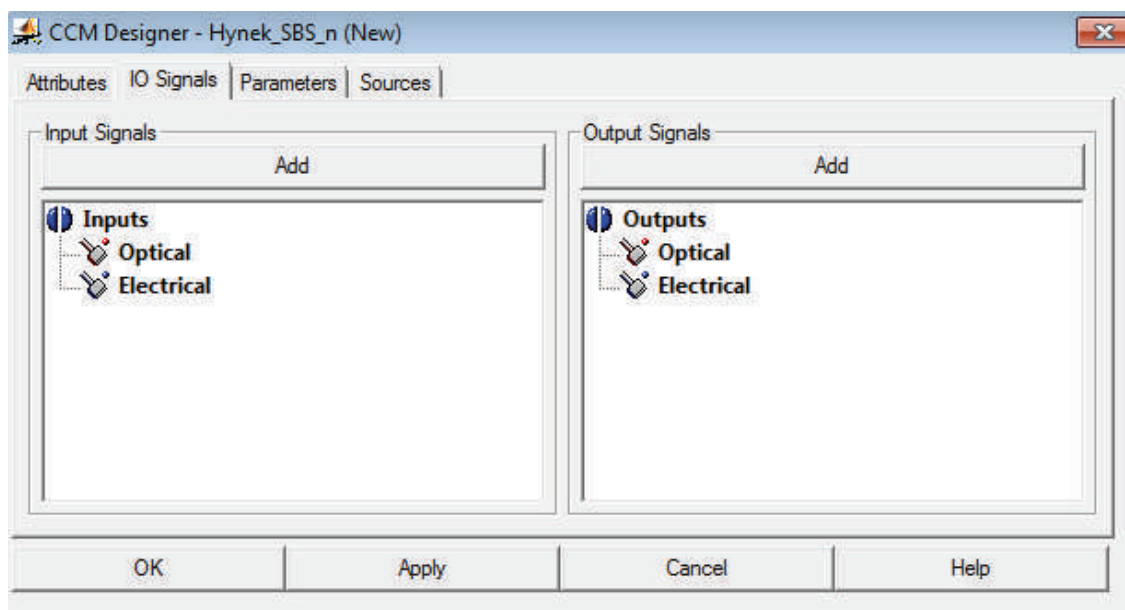
Blok je uložen ve stejné databázi jako předcházející použité bloky. Při jeho přetažení z databáze do pracovní plochy nelze tento blok přímo připojit do simulačního systému. Nejdříve je potřeba pro tento blok napsat kód, který mu definuje jeho funkci a účel.

V hlavním okně softwaru OptSim znázorněném na obr. 7.1 je zapotřebí kliknout na ikonu CCM Designer, zobrazenou na následujícím obr. 7.10.



Obr. 7.10: Profil modulu CCM.

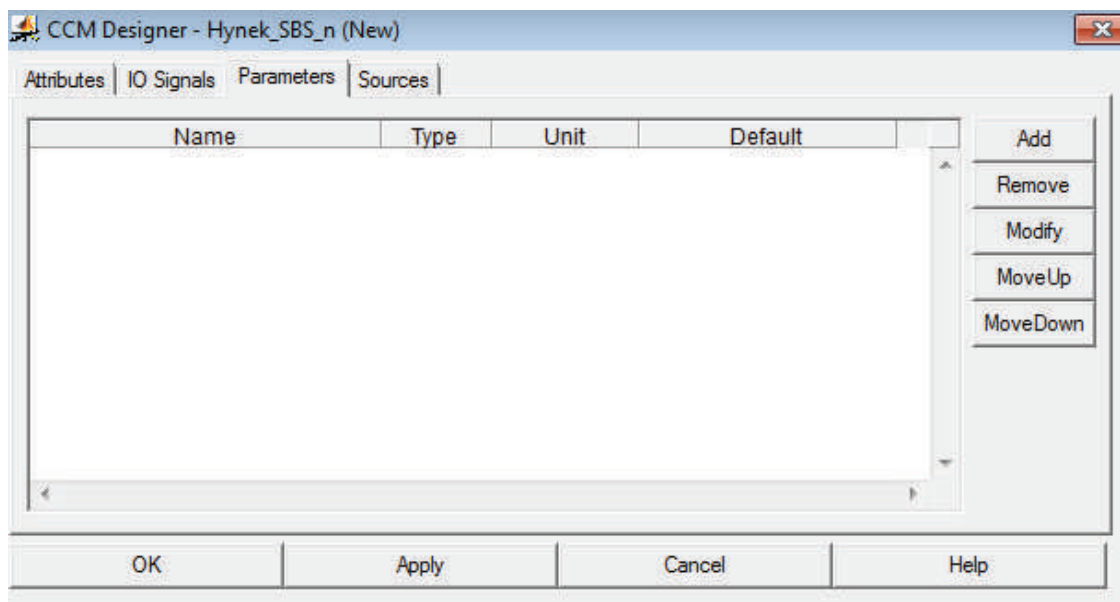
Zde se zadají základní údaje o nově vytvářeném modelu (jméno, typ simulace ...). Po vyplnění parametrů je dobré nic nepotvrzovat, ale přepnout na další záložku, jak je zobrazeno na následujícím obr. 7.11.



Obr. 7.11: Nastavení vstupů a výstupů.

Na této kartě se definují označení vstupních a výstupní optických a elektrických veličin, pod kterými budou vystupovat jako soubor čísel v prostředí MATLAB.

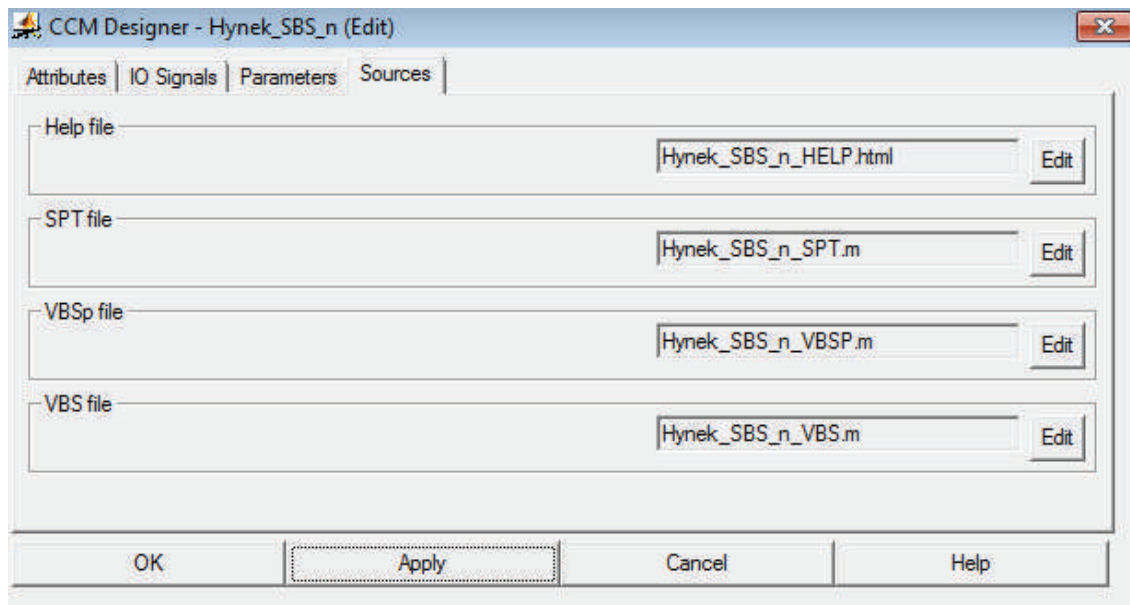
Je potřebné zachovat formát výstupních dat, jinak s nimi OptSim není schopen nijak pracovat.



Obr. 7.12: Nastavení parametrů.

Další záložka slouží k nastavení proměnných, které bude chtít uživatel v průběhu jednotlivých simulací měnit. Například bude-li uživatel využívat vzorce pracující s vlnovou délkou laseru, je dobré tuto hodnotu nezadávat přímo do matematického výpočtu, ale pomocí proměnné, kterou jednoduše změní stejným postupem, jako by změnil vlnovou délku laseru. V případě, kdy by uživatel měnil vlnovou délku zdroje a neměl by rovnici takto upravenou, musel by vždy vstoupit do vnitřního matematického kódu bloku, a tam tu hodnotu upravit.

Pokud jsou všechny vstupy a výstupy a případné proměnné nadefinovány, je vhodné klepnout na tlačítko Apply. V tento okamžik vygeneruje OptSim tři soubory odpovídajícím třem druhům simulací, jak je znázorněno na obr. 7.13.



Obr. 7.13: Přístup k matematickému kódu.

V této záložce je zobrazen přístup ke čtyřem vygenerovaným souborům obsahujícím informace o jménech označující vstupy a výstupy a proměnné veličiny.

V případě, kdy je požadovaným výsledkem spektrum signálu nebo nějaký časový průběh, je potřeba vhodně doplnit poslední soubor v políčku VBS file klepnutím na ikonku Edit.

Otevře se nové pracovní okno, podobné script oknu v MATLABU, popsané v kapitole 7.2.2, kde jsou v komentáři popsány všechny využitelné proměnné, včetně uživatelem přidaných, a na konci tohoto dokumentu je prostor pro uživatelský kód.

Sem je vhodné nakopírovat ověřený matematický kód z MATLABU, soubor uložit a potvrdit tlačítkem OK.

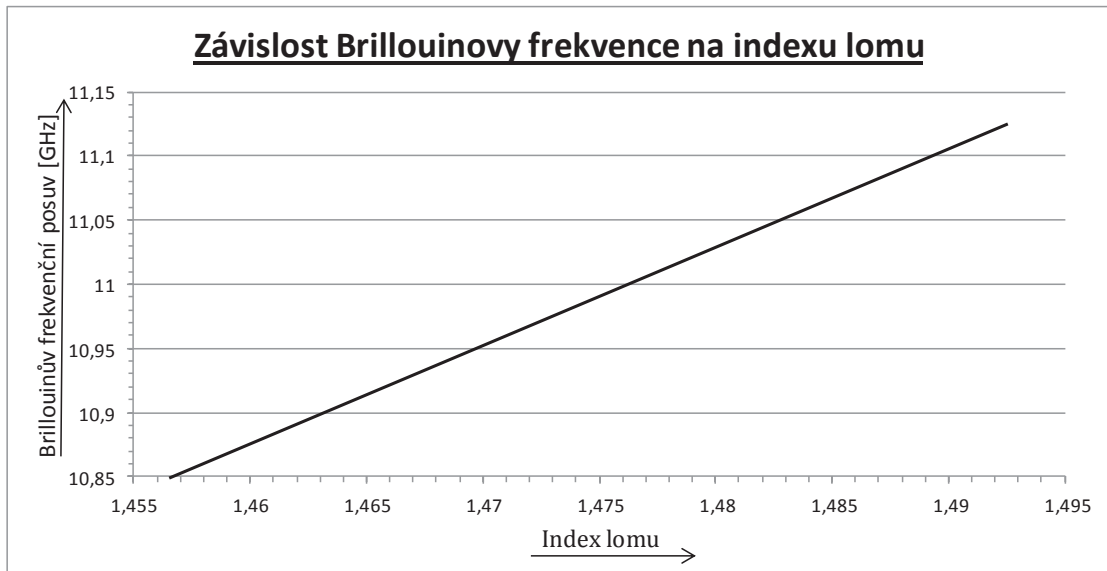
V tuto chvíli je možné se vrátit do testovacího zapojení, poklepat na modul CCM a zvolit profil, který byl vytvořen, a potvrdit výběr.

Po potvrzení získá modul CCM počet definovaných vstupů a výstupů podle profilu a je možné jej připojit do testovacího systému.

7.4.2 Profil SBS_n

Byl vytvořen za účelem výpočtu stimulovaného Brillouinova rozptylu v závislosti na změně indexu lomu optického vlákna.

Je vycházeno ze všeobecných vzorců uvedených v kapitole 3, pod označením (3.20) a (3.21), grafické znázornění této závislosti je patrné na obr. 7.14.



Obr. 7.14: Závislost Brillouinovy frekvence na indexu lomu.

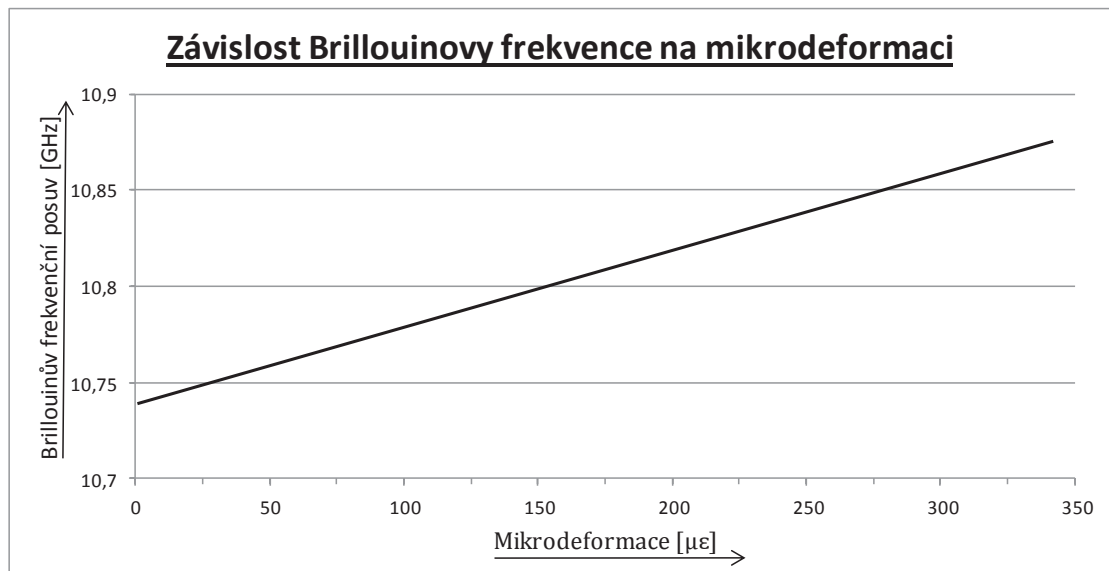
```
va = sqrt((7.37e10)/(2.21e3));  
freq_shift = ((2*((n*va)/Lamda_0*10^-9))/10^-6);
```

Hodnota v_a odpovídá vzorci (3.21) a freq_shift vzorci (3.21). Tímto způsobem je vypočítán frekvenční posuv Brillouinova rozptylu od původního signálu. Parametry n a Lamda_0 jsou proměnné definované uživatelem před začátkem simulace.

7.4.3 Profil SBS_mikrodeformace

Byl vytvořen za účelem výpočtu stimulovaného Brillouinova rozptylu v závislosti na změně mikrodeformace optického vlákna.

Hodnoty pro vytvoření tohoto simulačního profilu byly převzaty z měření provedených v literatuře [16], grafické znázornění této závislosti je patrné na obr. 7.15.



Obr. 7.15: Závislost Brillouinovy frekvence na mikrodeformaci [16].

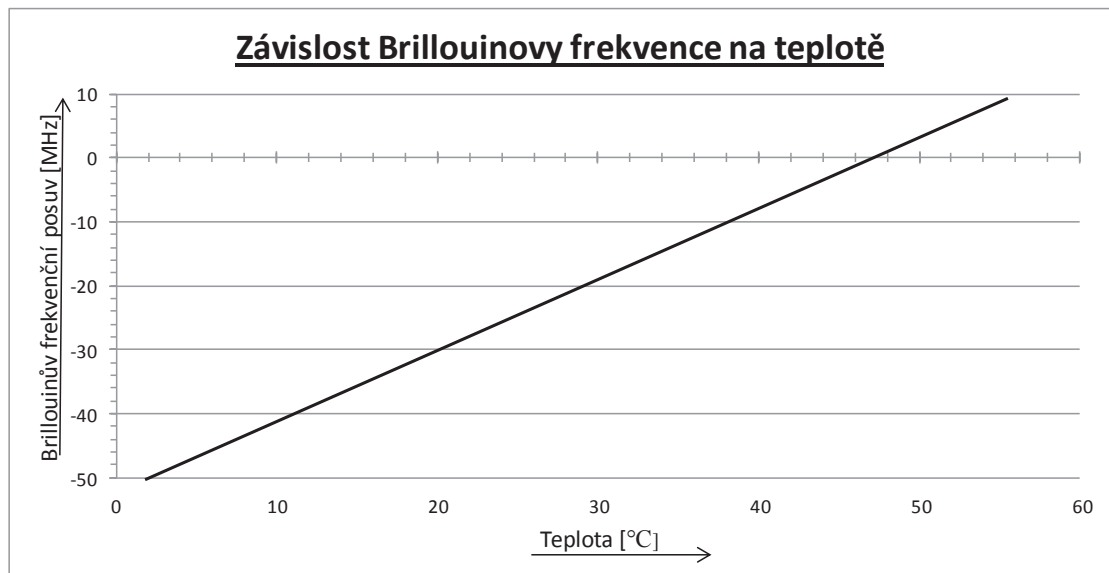
```
freq_shift = ((1*Microstrain+(193325/7))*(3500000/9))*10^-12;
```

Hodnota `Microstrain` vyjadřuje míru prodloužení vlákna, které definuje uživatel při nastavování parametrů simulace.

7.4.4 Profil SBS_teplota

Byl vytvořen za účelem výpočtu stimulovaného Brillouinova rozptylu v závislosti na změně teploty optického vlákna.

Hodnoty pro vytvoření tohoto simulačního profilu byly převzaty z měření provedených v literatuře [16], grafické znázornění této závislosti je patrné na obr. 7.16.



Obr. 7.16: Závislost Brillouinovy frekvence na teplotě [16].

```
va = sqrt((7.37e10)/(2.21e3));  
temperture_shift = (((sqrt(2))*Temperature/2)-5*sqrt(2))*sqrt(2))*  
10^-6;  
freq_shift = ((2*((n*va)/Lamda_0*10^-9))/10^-6) + temperture_shift;
```

Jsou zde použity stejné vzorce jako v kapitole 7.4.2. K takto získanému frekvenčnímu posuvu je přičtena hodnota `temperture_shift` vyjadřující závislost teploty na změně frekvence. Uživatel zadá hodnotu `Temperature` označující teplotu v místě měření a parametry `n` a `Lamda_0`.

7.4.5 Společná část kódu

Všechny tři navržené profily mají stejnou zbývající část kódu, která se stará o správné zpracování dat. Hlavní části kódu zde budou podrobněji rozebrány k přesnému pochopení činnosti programu.

```
spect = fftshift(fft(Opt_in));
xstep = (upper_frequency - lower_frequency)/(num_samples-1);
xline = lower_frequency : xstep : upper_frequency;
num_moved = ceil(freq_shift / xstep);
```

První blok kódu slouží ke zpracování proměnných (`Opt_in`, `upper_frequency`, `lower_frequency`, `num_samples`) automaticky vygenerovaných softwarem OptSim. Proměnná `Opt_in` je tvořena komplexními čísly a je hlavním nositelem informace o optickém paprsku vstupujícím do bloku CCM. Pro následnou práci s hodnotami je potřeba tuto proměnnou převést do frekvenčního spektra pomocí Fourierovy transformace.

Jméno této hlavní proměnné je shodné s označením vstupu bloku CCM, které je definováno uživatelem na Obr. 7.11.

Ostatní proměnné jsou stálé a uživatel je může anebo nemusí využívat - záleží na druhu vytvářené aplikace.

```
database = zeros(1,num_samples); % database of sources
```

Tímto příkazem je vytvořeno pomocné pole o stejné délce jako hlavní proměnná `Opt_in`, a je naplněno nulovými hodnotami.

```
for i = 1:num_samples
    if(abs(spect(i))>threshol) % find position of source
        database(i) = (abs(spect(i))) - threshol; % count overlap
        database(i) = (database(i)) / 2;
        spect(i) = threshol*exp(1i*angle(spect(i)));
    end
end
```

Pomocí for-cyklu je postupně procházena celá proměnná `spect` a její hodnoty jsou porovnávány s konstantní proměnou `threshol`, jelikož tyto modely nejsou zaměřeny na výpočet energie stimulovaného Brillouinova rozptylu (SBS), ale pouze na výpočet jeho frekvenčního posuvu.

Energie SBS je odvozena jako poloviční rozdíl od uživatelem nastavené proměnné `threshol`. Protože optické vlákno není aktivní prvek, je od původní energie odečtena dvojnásobná energie SBS. Takto je zabezpečen převod energie z hlavního optického signálu na nově vznikající optický signál SBS.

```

for i = 1 : num_samples
    if(database(i)~=0) % if signal reaches threshold
        spect(i-num_moved) = spect(i-num_moved) + database(i) *exp
(1i*angle(spect(i-num_moved)));
        spect(i+num_moved) = spect(i+num_moved) + database(i) *exp
(1i*angle(spect(i+ num_moved)));
    end
end
end

```

Druhým for-cyklem je postupně procházena proměnná `database` a v případě nalezení nenulové hodnoty je tato hodnota přesunuta o vypočítaný frekvenční posuv na obě strany spektra a přičtena k původní hodnotě signálu.

```
Opt_out = ifft(fftshift(spect));
```

Všechny profily jsou zakončeny zpětným převodem hlavní proměnné na komplexní číslo. Tento krok je nutný, jinak by software OptSim nebyl dále chopen s vycházejícím optickým signálem z bloku CCM pracovat.

Název výstupní proměnné, kterou bude považovat software OptSim za výstupní proměnnou bloku CCM, opět definuje uživatel na Obr. 7.11.

Kompletní kódy bloků jsou uvedeny v příloze B.

7.5 Výstup simulací

Výstupem simulace jsou grafy spekter optického paprsku procházejícího optickým vláknem, ve kterém vznikne stimulovaný Brillouinův rozptyl v závislosti na změně teploty, indexu lomu a prodloužení optického vlákna.

V navržených profilech je zabudován příkaz pro vykreslení optického spektra pomocí MATLABu, je tak možné provést vzájemné srovnání získaných výsledků simulace.

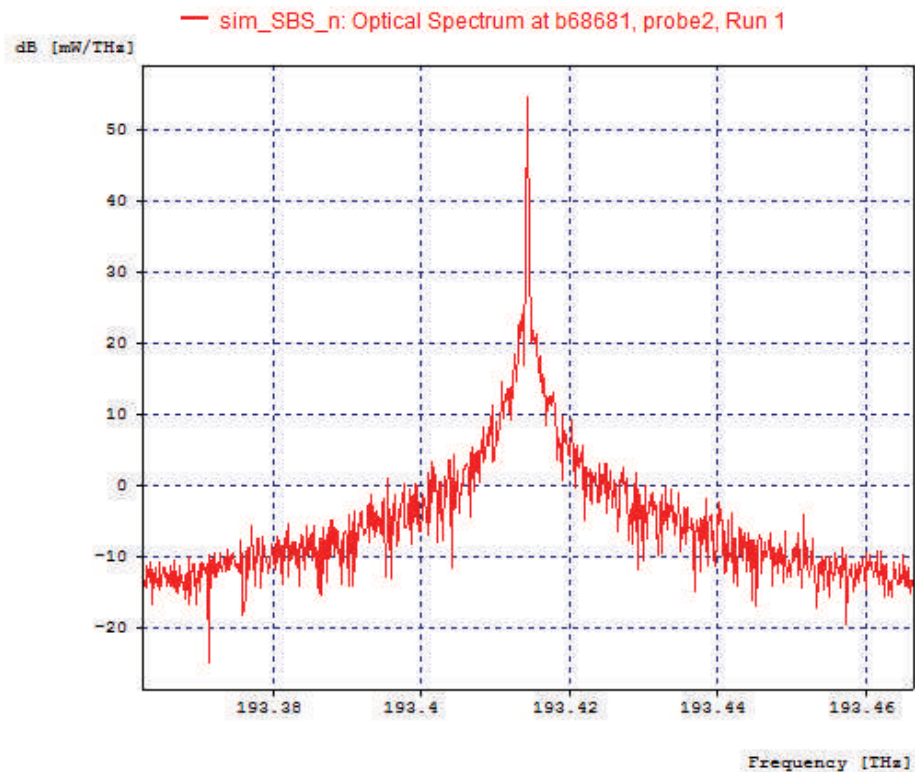
V následujících podkapitolách jsou zobrazeny grafické výstupy bloku `probe2`, `CCM1`, `probe3` a `probe4` odpovídající zapojení zobrazenému na obr. 7.7.

Blok `probe` umožňuje spektrum optického signálu zobrazit ve třech variantách, z tohoto důvodu jsou zde uvedeny všechny tři grafy a graf vykreslený MATLABem vykresluje surová data, se kterými se pracuje ve výpočtech bloku `CCM1`.

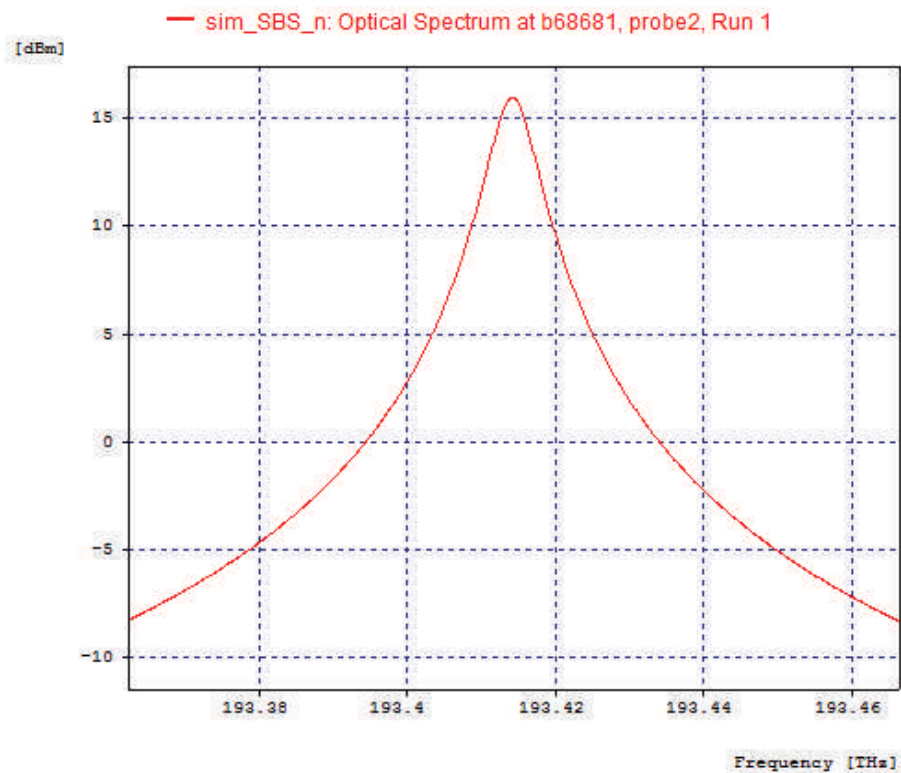
Zobrazené grafy odpovídají profilu bloku `CCM1 SBS_n`, grafy ostatních profilů jsou velice podobné a rozdíl je patrný při velkém přiblížení, v tomto případě zaniká ale možnost zobrazení celého spektra a samotný graf se stává nepřehledný.

Prostřednictvím příložených souborů je možné tyto grafy zobrazit v softwarech OptSim nebo MATLAB a přímo si zkoumaný graf vyvolat a podrobně prozkoumat.

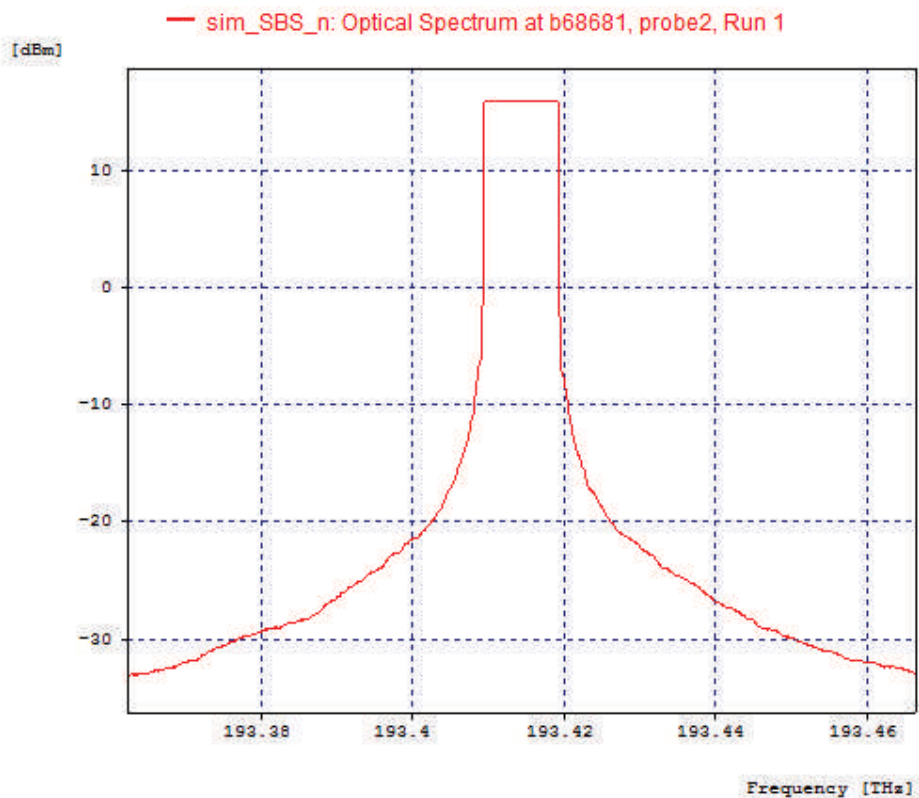
7.5.1 Porovnání grafů OptSim a MATLAB na vstupu CCM



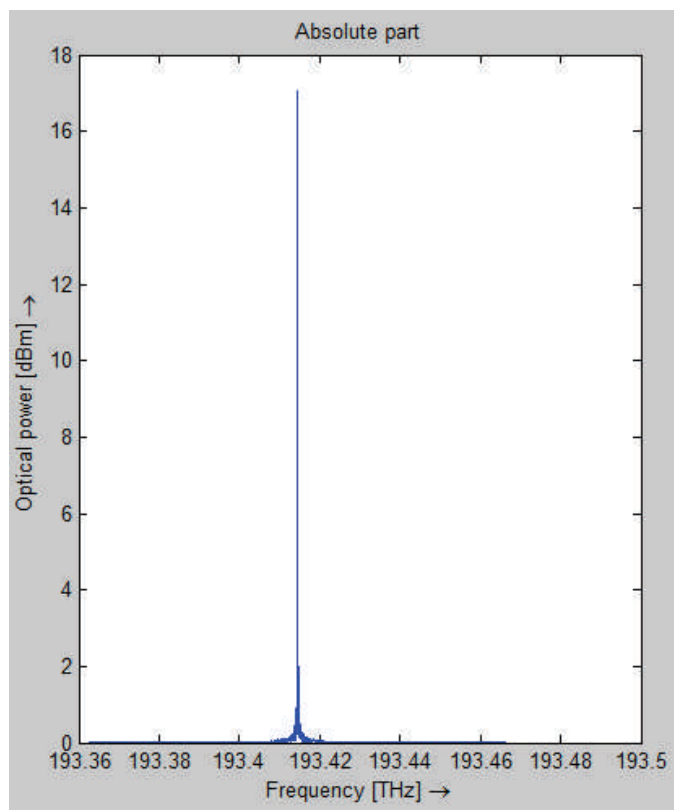
Obr. 7.17: Graf modu probe2 – klasické zobrazení.



Obr. 7.18: Graf modu probe2 – Lorentzian zobrazení.

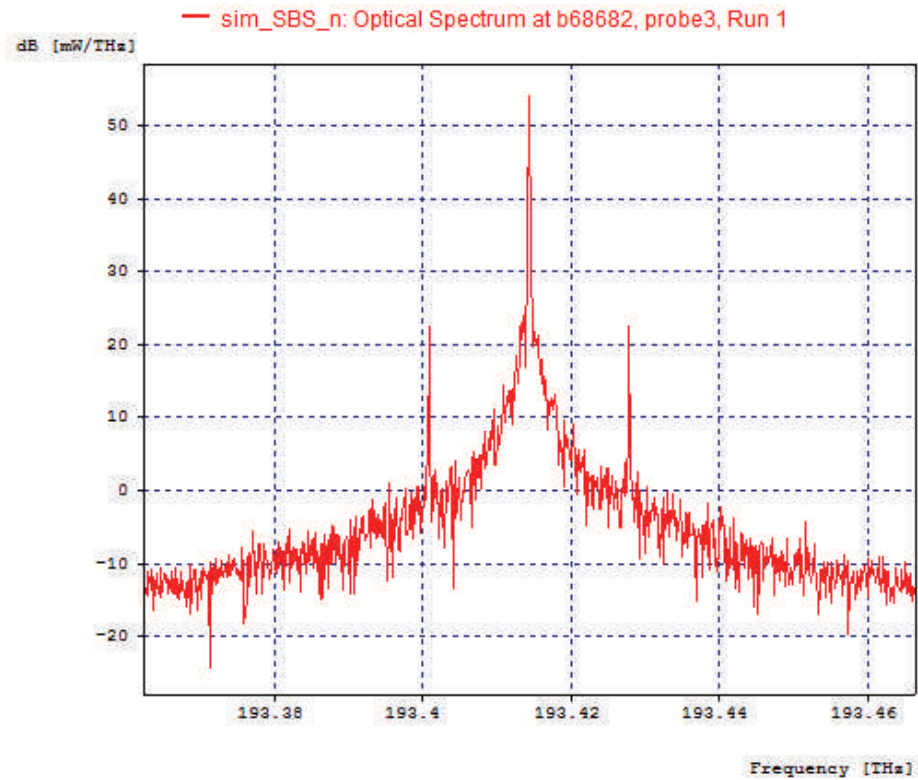


Obr. 7.19: Graf modu probe2 – Rectangular zobrazení.

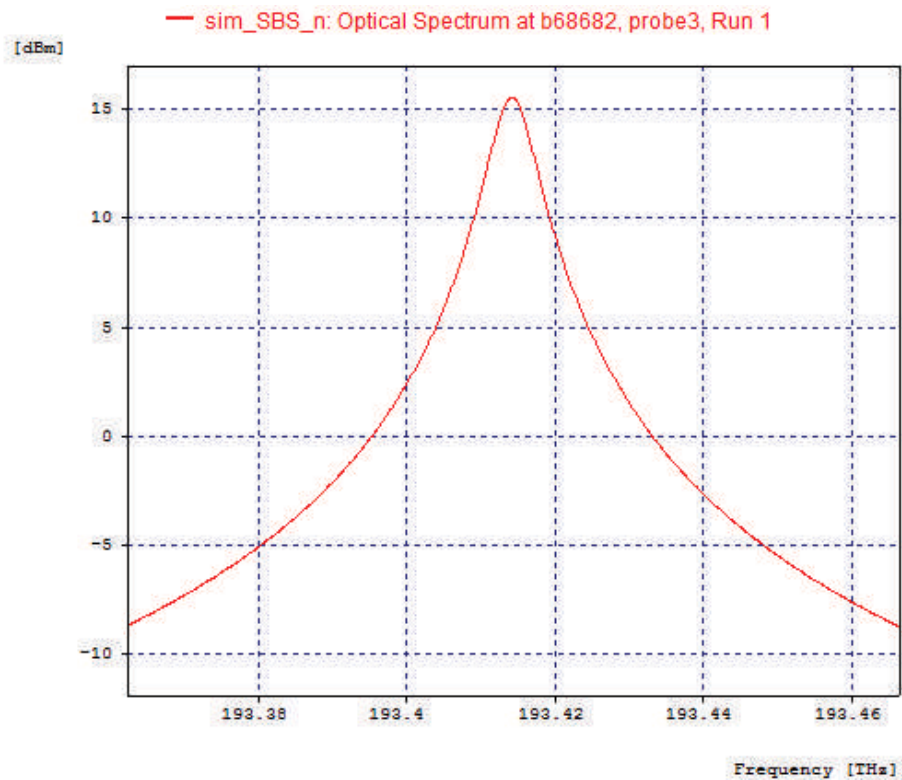


Obr. 7.20: Graf modu CCM1 – MATLAB vstupní signál.

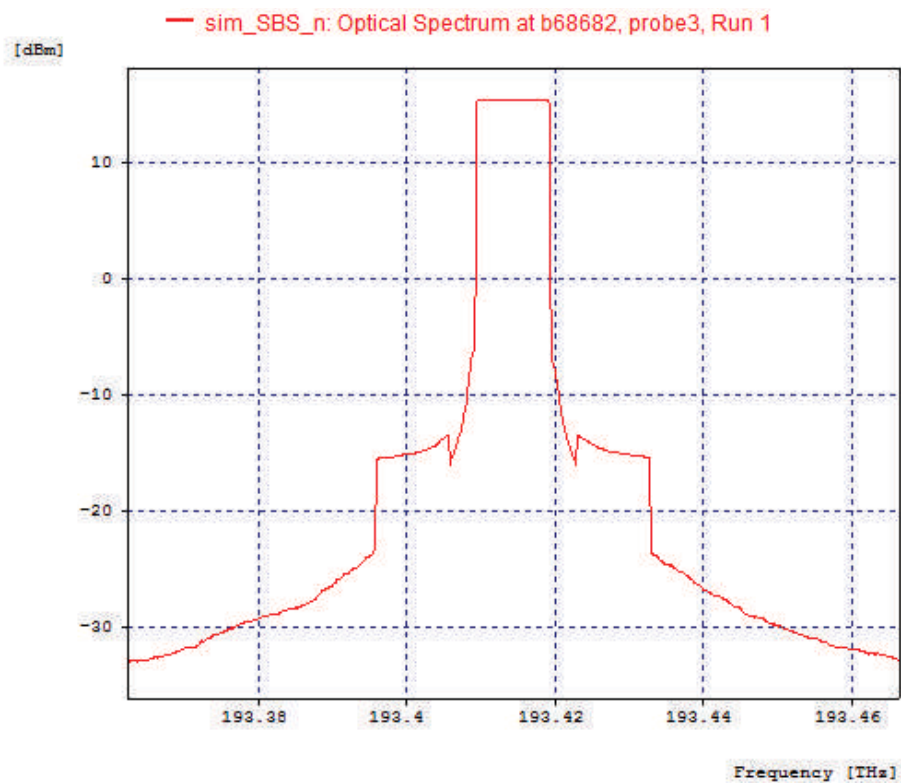
7.5.2 Porovnání grafů OptSim a MATLAB na výstupu CCM



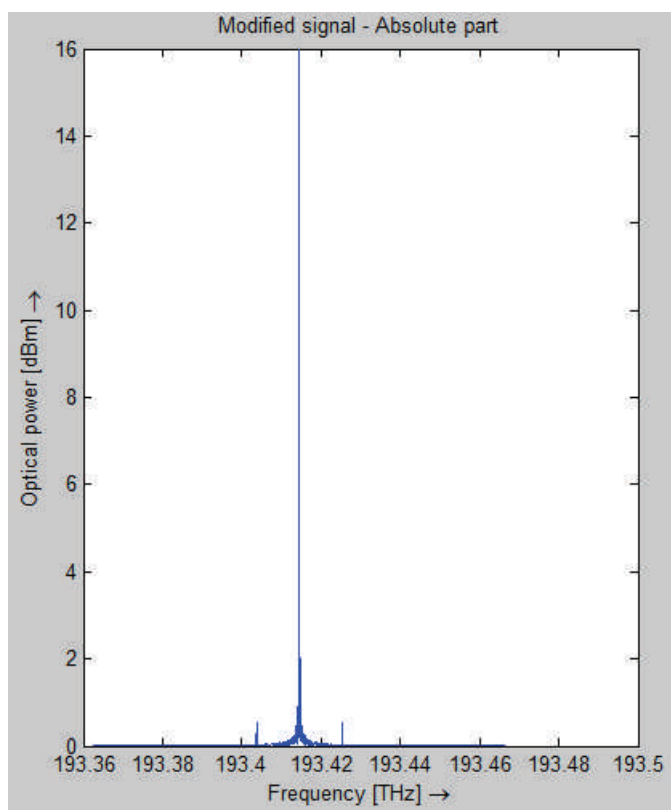
Obr. 7.21: Graf modu probe3 – klasické zobrazení.



Obr. 7.22: Graf modu probe3 – Lorentzian zobrazení.

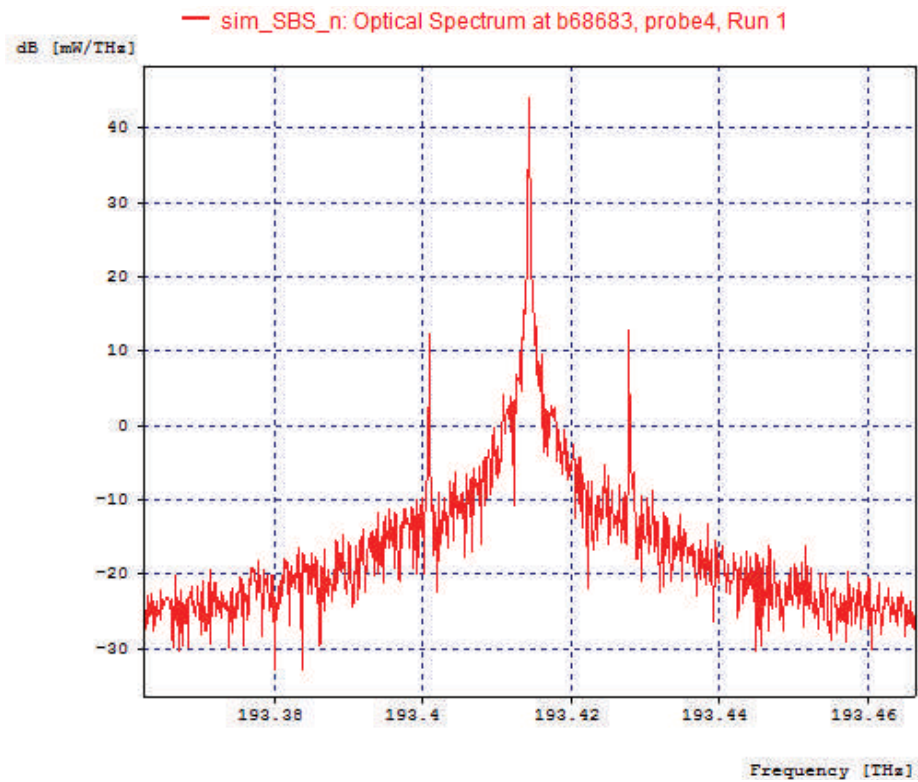


Obr. 7.23: Graf modu probe2 – Rectangular zobrazení.

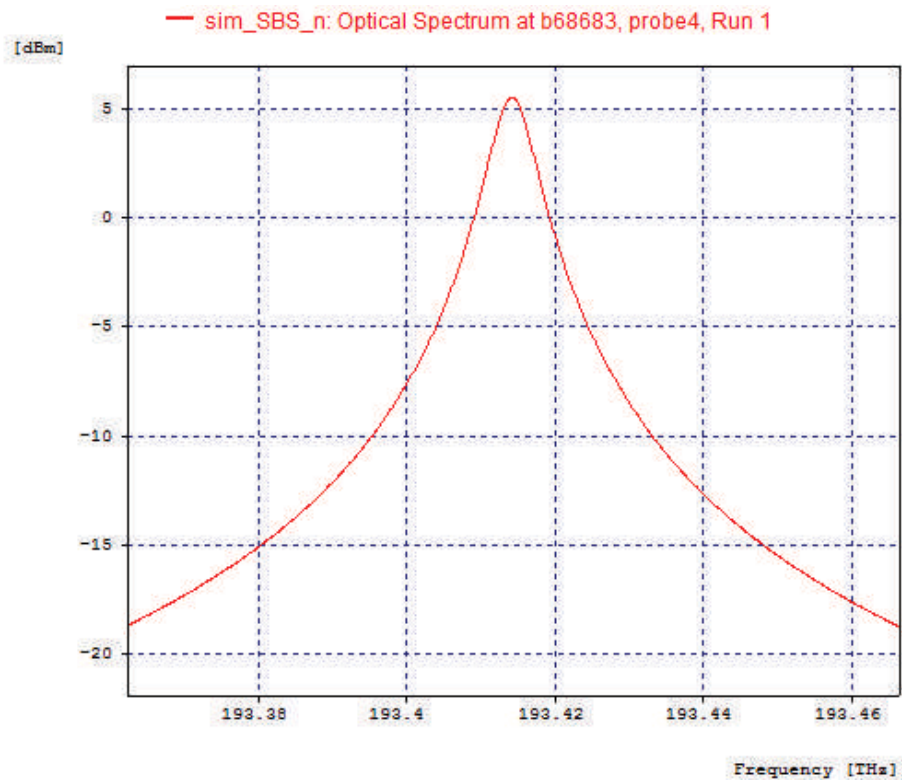


Obr. 7.24: Graf modu CCM1 – MATLAB výstupní signál.

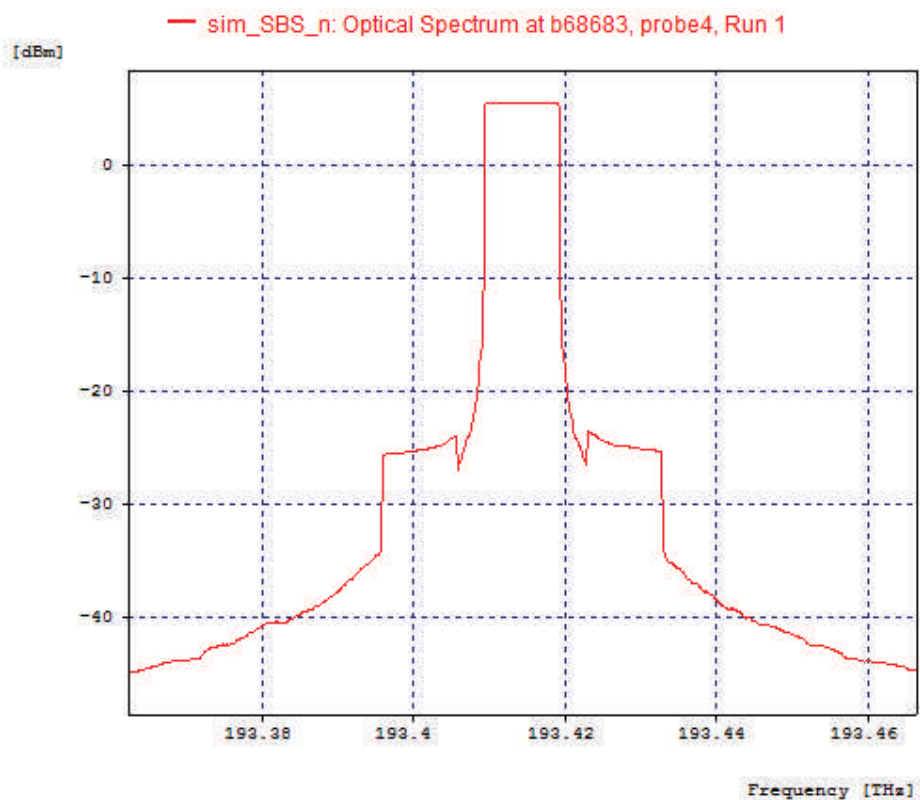
7.5.3 Konec optické trasy



Obr. 7.25: Graf modu probe4 – klasické zobrazení.



Obr. 7.26: Graf modu probe4 – Lorentzian zobrazení.



Obr. 7.27: Graf modu probe4 – Rectangular zobrazení.

ZÁVĚR

Tato práce slouží jako teoretický základ pro návrh měřicího systému, který bude schopen získat data o působení teploty a tlaku ze standardních telekomunikačních kabelů.

Postupně zde byly probrány základní vlastnosti současných optických vláken. Podrobněji byly zkoumány lineární a nelineární vlivy vznikající v optických vláknech a jejich možnost využití při měření fyzikálních veličin.

Na základě zjištěných vlastností byly zvoleny dvě měřicí metody využívající Rayleighova a Brillouinova rozptylu. U těchto metod je hlavní výhodou možnost zjištění, na jakém místě měřicího optického vlákna dochází k působení zkoumané veličiny, což byl jeden z požadavků zadání této práce.

Detekce měřeného rozptylu pro systém využívající Rayleighova rozptylu je řešena pomocí měření změny polarizace paprsku přímého a zpětného odrazu na jedné vlnové délce. Byly navrženy dvě měřicí bloková zapojení znázorněná na obr. 6.1 a obr. 6.2., jež se vzájemně liší v detekční části, kdy druhá varianta je složitější, ale měla by být přesnější.

Druhý navržený měřicí systém využívá stimulovaný Brillouinův rozptyl. Při využití tohoto druhu rozptylu není tak důležitá intenzita rozptylu (slouží pouze k přesnějšímu rozpoznání detektorem), než samotná frekvence konkrétního zpětného rozptylu. Tato frekvence závisí na působení měřené fyzikální veličiny, což je podrobně popsáno v kapitole 3.4.1. Byly navrženy tři měřicí bloková zapojení znázorněná na obr. 6.3, obr. 6.4 a obr. 6.5. První dva návrhy se liší v umístění pomocného laseru 2, který má za úkol zvýšit intenzitu zpětného rozptylu pro následnou detekci. Třetí návrh je jednodušší než předcházející a vychází ze znalosti vlnových délek, na kterých se pro konkrétní měřicí systém může stimulovaný Brillouinův rozptyl projevit.

Z důvodu, že je možné během jednoho měření zjistit hned několik rozptylů o stejné frekvenci, zde hraje velkou roli čas mezi registracemi jednotlivých rozptylů, ze kterých je potom možné určit pozici působení zkoumané fyzikální veličiny.

Nedílnou součástí těchto navržených systémů je i způsob uložení měřicího vlákna, kdy nejlepších výsledků je možné docílit pomocí uložení samostatného měřicího optického vlákna do pískového lože v zemi, čímž může docházet k přímému působení zkoumané veličiny, a výsledek tak není zkreslován žádnými dodatečnými ochranami optického vlákna.

Samotná simulace byla upravena na návrh speciálního modulu a jeho profilů, které jsou schopny simulovat vznik stimulovaného Brillouinova rozptylu v prostředí software OptSim v. 5.2.

V práci je popsán podrobný návod týkající se vytvoření takového bloku a jeho profilů, který může být využit pro vytvoření jakékoliv úpravy optického paprsku, nejen pro vznik stimulovaného Brillouinova rozptylu. Pomocí tohoto návodu je takto vytvořený blok možné použít jako plnohodnotný funkční blok softwaru OptSim. Je možné je různě řadit a spojovat jako jakýkoliv jiný již tvůrci softwaru OptSim

vytvořený blok.

Byly vytvořeny tři základní simulační profily pro software OptSim umožňující simulaci vzniku stimulovaného Brillouinova rozptylu v závislosti na indexu lomu, teplotě nebo mikrodeformaci optického vlákna. Uživatel si navrhne vlastní zapojení optické trasy se všemi potřebnými prvky a v místě, kde předpokládá, že by měl vzniknout stimulovaný Brillouinův rozptyl, použije blok CCM s určitým profilem. Vhodný profil uživatel zvolí podle druhu působení, který chce v konkrétním místě optického vlákna zkoumat.

Jako příklad funkčnosti těchto vytvořených profilů byla provedena testovací simulace profilu SBS_n. Optická trasa je znázorněna na obr. 7.7, kde je vycházeno z teoretických výpočtu v kapitole 6.4, kdy pro optickou trasu je použit optický paprsek o výkonu 400 mW, aby byla zajištěna hodnota výstupního optického výkonu na konci 100 km dlouhé optické trasy ≥ 5 mW při útlumu optického vlákna 0,2 dB/km. Díky tomuto optickému výkonu je možný vznik stimulovaného Brillouinova rozptylu (SBS) v optickém vlákně.

Prostřednictvím grafických výstupů softwarů OptSim a MATLAB uvedených v kapitolách 7.5.1 až 7.5.3 je možné odvodit vliv a působení stimulovaného Brillouinova rozptylu na optický paprsek a následné chování Brillouinových rozptylů procházejících optickým vláknem na konec optické trasy.

Pro možnost vzájemného porovnání grafických výsledků byly do profilů pro modul CCM přidány funkce umožňující vykreslení surových dat, se kterými je počítáno v tomto bloku.

Tuto práci je možné využít pro další zkoumání formou simulace, vzniku a působení stimulovaného Brillouinova rozptylu, ale také jako návod pro tvorbu nových modulů pro software OptSim, které bude možné využívat k jakýmkoliv účelům. Takto nově vytvořené bloky budou omezeny jen matematickými rovnicemi, které definuje samotný uživatel při vytváření konkrétního profilu.

LITERATURA

- [1] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Vyd. 1. Brno: Miloslav Filka, 2009, 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [2] HÁJEK, Martin a Petr HOMOLEČEK. *Chromatická disperze jednovidových optických vláken a její měření*. s. 6.
- [3] BEJČEK, Ludvík. *Optoelektronické snímače*. Brno, 2005. Skripta. VUT Brno. Vedoucí práce Doc. Ing. Ludvík Bejček, CSc.
- [4] ŽÁČEK, Martin. *Nelineární charakter optického prostředí*. Brno, 2008. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Jiří Přinosil.
- [5] MARŠÁLEK, Leoš. *Optická vlákna: verze 2.1.3*. Ostrava, 2006. Bakalářská práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Doc. Ing. Vladimír Vašíček CSc.
- [6] ČERVENKA, Vladimír. *Návrh metody pro stanovení významů polarizační vidové disperze*. Brno, 2007. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Martin Kyselák.
- [7] PAVLŮ, Michal. *Potlačení mechanických vlivů při přenosu optickým vláknem*. Brno, 2008. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Petr Drexler, Ph.D.
- [8] MINARDO, Aldo. *Fiber-optic distributed strain/temperature sensors based on stimulated Brillouin scattering*. Dostupné z: https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:Ye5K_5hiA_8J:www.dii.unina2.it/opto/publications/PhD_Thesis_Minardo.pdf+&hl=cs&gl=cz&pid=bl&srcid=ADGEESjZQMs8SWXqN00rBOi6ARfoah92CoE7TfoY5PkW_nPvmQwtN7aOoisAWIiUjgbMo6kwJrsrIpG5rQ76GGpShX2I8cB_pr7C_DSpR_uNnkYMu0lPxKwgt5m9CZT9OwFHN-QYSCqX&sig=AHIEtbQaEorO6eFt_RRrwwthsam8Otql9g. Seconda Università degli studi di Napoli.
- [9] NOVÁK, Petr. ASM. *Optické sítě*. Prezentace. Dostupné z: ftp://ftp.asm.cz/ASM/Skoleni/20120509-Opticke_site.pdf
- [10] ČERVENKA, Vladimír. *Návrh metody pro stanovení významu polarizační vidové disperze: Assessment of the meaning of Polarization Mode Dispersion*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2007. 1 elektronický optický disk [CD-ROM / DVD]. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Martin Kyselák.
- [11] DUSEK. EC.ELF.STUBA.SK. *OK_optika_Dusek_1_.pdf*. 22 s. Dostupné z: https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:j-8W6L8ds2AJ:ec.elf.stuba.sk/kme/buxus/docs/predmety/OKS/Prednasky/OK_optika_Dusek_1_.pdf+ok_optika_dusek_1_.pdf&hl=cs&gl=cz&pid=bl&srcid=ADGEEShXAHnhli49WvR86DuMyoLHMPbgaQsAIGzxmMI8vqAbtOOmnXZjo0CO1CIJC3GB63UqTB31SYWcLojzTtsJxl0zuV72B2uHdsayZ6QXI55aYyPrytLv0ywtVe9iGzzBBuPFjbl&sig=AHIEtbR48WJC0n0ISDN987IZO1neU77PAw
- [12] AMBROŽ, Jan. *Měření optických přenosových tras: Measurement of the fiber optical transport links*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 1 elektronický optický disk [CD-ROM / DVD]. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Pavel Reichert.

- [13] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. 1. české vyd., 2. dotisk. Překlad Jan Obdržálek, Bohumila Lencová, Petr Dub. V Brně: Prometheus, 2006, vii, 1034-1198, [30]. ISBN 80-214-1868-0.
- [14] Akustika: Kapitola 7. [online]. s. 77 [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: <http://muj.optol.cz/~bajer/skripta/kap7.pdf>
- [15] *Studies into the detection of buried objects (particularly optical fibres) in saturated sediment: Part 5: An acousto-optic detection system* [online]. University of Southampton, 2007 [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: <http://eprints.soton.ac.uk/46562/>. Technická zpráva. ISVR University of Southampton. Vedoucí práce Professor R J Astley, Group Chairman.
- [16] GALINDEZ-JAMIOY, C. A. a J. M. LÓPEZ-HIGUERA. Brillouin Distributed Fiber Sensors: An Overview and Applications. *Journal of Sensors* [online]. 2012, vol. 2012, s. 1-17 [cit. 2013-05-18]. DOI: 10.1155/2012/204121. Dostupné z: <http://www.hindawi.com/journals/js/2012/204121/>

SEZNAM PŘÍLOH

A	Úplné kódy bloků - MATLAB	74
A.1	SBS_n	74
A.2	SBS_mikrodeformace	76
A.3	SBS_teplota	78
B	Úplné kódy profilů – OptSim	80
B.1	SBS_n	80
B.2	SBS_mikrodeformace	82
B.3	SBS_teplota	84
C	Obsah přiloženého média	86
C.1	Vlastní elektronická verze práce	86
C.2	Složka MATLAB	86
C.3	Složka OptSim	86

A ÚPLNÉ KÓDY BLOKŮ - MATLAB

A.1 SBS_n

```
treshold = 4;
Graf=1;
n=1.5;           % 1.4 - 1.5
Lamda_0=1550;

savefile='surovadata.mat';
save (savefile);

treshold = treshold *1000;

va = sqrt((7.37e10)/(2.21e3));

freq_shift = ((2*((n*va)/Lamda_0*10^-9))/10^-6);

% spectral part counting
spect = fftshift(fft(Opt_in)); % Fourier transform
xstep=(upper_frequency - lower_frequency)/(num_samples-1);
xline = lower_frequency : xstep : upper_frequency;
num_moved = ceil(freq_shift / xstep);

figure(Graf)
Graf = Graf + 1;
subplot(1,2,1)
plot(xline, (abs(spect))/1000)
title('Absolute part')
ylabel('Optical power [dBm] \rightarrow ');
xlabel('Frequency [THz] \rightarrow');
subplot(1,2,2)
plot(xline,angle(spect))
title('Phase')
xlabel('Frequency [THz] \rightarrow');
ylabel('\pi \rightarrow');

phal = angle(spect); % count phase of whole spectrum

database = zeros(1,num_samples); % database of sources

for i = 1:num_samples
    if(abs(spect(i))>treshold) % find position of source
        database(i) = (abs(spect(i))) - treshold; % count overlap
        database(i) = (database(i)) / 2;
        spect(i) = treshold*exp(1i*angle(spect(i)));
    end
end
end
```

```

figure(Graf)
Graf = Graf + 1;
plot(xline, (abs(spect))/1000)
title('Reduced signal spectre')
ylabel('Optical power [dBm] \rightarrow');
xlabel('Frequency [THz] \rightarrow');

for i = 1 : num_samples
    if(database(i)~=0) % if signal reaches treshold
        spect(i-num_moved) = spect(i-num_moved) + database(i) *exp
(1i*angle(spect(i-num_moved)));
        spect(i+num_moved) = spect(i+num_moved) + database(i) *exp
(1i*angle(spect(i+ num_moved)));
    end
end

figure(Graf)
Graf = Graf + 1;
subplot(1,2,1)
plot(xline, (abs(spect))/1000)
title('Modified signal - Absolute part')
ylabel('Optical power [dBm] \rightarrow');
xlabel('Frequency [THz] \rightarrow');

subplot(1,2,2)
plot(xline, angle(spect))
title('Modified signal - Phase')
xlabel('Frequency [THz] \rightarrow');
ylabel('\pi \rightarrow');

pha2 = angle(spect); % count phase of whole modified spectrum

figure(Graf)
Graf = Graf + 1;
plot(xline, phal-pha2)
title('Phase discrepancy')
xlabel('Frequency [THz] \rightarrow');
ylabel('\pi \rightarrow');

% Transform to time domain

Opt_out = ifft(fftshift(spect));

```

A.2 SBS_mikrodeformace

```
treshold = 4;
Microstrain = 0;      % 0 - 350
Graf=1;

savefile='surovadata.mat';
save (savefile);

treshold = treshold *1000;
freq_shift = ((1*Microstrain+(193325/7))*(3500000/9))*10^-12;

% spectral part counting
spect = fftshift(fft(Opt_in)); % Fourier transform
xstep=(upper_frequency - lower_frequency)/(num_samples-1);
xline = lower_frequency : xstep : upper_frequency;
num_moved = ceil(freq_shift / xstep);

figure(Graf)
Graf = Graf + 1;
subplot(1,2,1)
    plot(xline, (abs(spect))/1000)
    title('Absolute part')
    ylabel('Optical power [dBm] \rightarrow ');
    xlabel('Frequency [THz] \rightarrow');
subplot(1,2,2)
    plot(xline,angle(spect))
    title('Phase')
    xlabel('Frequency [THz] \rightarrow');
    ylabel('\pi \rightarrow');

phal = angle(spect); % count phase of whole spectrum

database = zeros(1,num_samples);

for i = 1:num_samples
    if(abs(spect(i))>treshold)
        database(i) = (abs(spect(i))) - treshold;
        database(i) = (database(i)) / 2;
        spect(i) = treshold*exp(1i*angle(spect(i)));
    end
end

figure(Graf)
Graf = Graf + 1;
plot(xline, (abs(spect))/1000)
title('Reduced signal spectre')
ylabel('Optical power [dBm] \rightarrow');
xlabel('Frequency [THz] \rightarrow');
```

```

for i = 1 : num_samples
    if(database(i)~=0) % if signal reaches treshold
        spect(i-num_moved) = spect(i-num_moved) + database(i) *exp
(1i*angle(spect(i-num_moved)));
        spect(i+num_moved) = spect(i+num_moved) + database(i) *exp
(1i*angle(spect(i+ num_moved)));
    end
end

figure(Graf)
Graf = Graf + 1;
subplot(1,2,1)
    plot(xline,(abs(spect))/1000)
    title('Modified signal - Absolute part')
    ylabel('Optical power [dBm] \rightarrow');
    xlabel('Frequency [THz] \rightarrow');

subplot(1,2,2)
    plot(xline,angle(spect))
    title('Modified signal - Phase')
    xlabel('Frequency [THz] \rightarrow');
    ylabel('\pi \rightarrow');

pha2 = angle(spect); % count phase of whole modified spectrum

figure(Graf)
Graf = Graf + 1;
    plot(xline,pha1-pha2)
    title('Phase discrepancy')
    xlabel('Frequency [THz] \rightarrow');
    ylabel('\pi \rightarrow');

% Transform to time domain

Opt_out = ifft(fftshift(spect));

```

A.3 SBS_teplota

```
treshold = 3.5;
Temperature = 50; % 10 - 60
Graf=1;
n=1.5; % 1.4 - 1.5
Lamda_0=1550;

savefile='surovadata.mat';
save (savefile);

treshold = treshold *1000;

va = sqrt((7.37e10)/(2.21e3));

temperture_shift = (((sqrt(2))*Temperature/2)-
5*sqrt(2))*sqrt(2))*10^-6;
freq_shift = ((2*((n*va)/Lamda_0*10^-9))/10^-6) + temperture_shift;

% spectral part counting
spect = fftshift(fft(Opt_in)); % Fourier transform
xstep=(upper_frequency - lower_frequency)/(num_samples-1);
xline = lower_frequency : xstep : upper_frequency;
num_moved = ceil(freq_shift / xstep);

figure(Graf)
Graf = Graf + 1;
subplot(1,2,1)
plot(xline, (abs(spect))/1000)
title('Absolute part')
ylabel('Optical power [dBm] \rightarrow ');
xlabel('Frequency [THz] \rightarrow');
subplot(1,2,2)
plot(xline, angle(spect))
title('Phase')
xlabel('Frequency [THz] \rightarrow');
ylabel('\pi \rightarrow');

phal = angle(spect);

database = zeros(1,num_samples);

for i = 1:num_samples
    if(abs(spect(i))>treshold)
        database(i) = (abs(spect(i))) - treshold;
        database(i) = (database(i)) / 2;
        spect(i) = treshold*exp(1i*angle(spect(i)));
    end
end

figure(Graf)
Graf = Graf + 1;
plot(xline, (abs(spect))/1000)
title('Reduced signal spectre')
ylabel('Optical power [dBm] \rightarrow');
xlabel('Frequency [THz] \rightarrow');
```

```

for i = 1 : num_samples
    if(database(i)~=0) % if signal reaches treshold
        spect(i-num_moved) = spect(i-num_moved) + database(i) *exp
(1i*angle(spect(i-num_moved)));
        spect(i+num_moved) = spect(i+num_moved) + database(i) *exp
(1i*angle(spect(i+ num_moved)));
    end
end

figure(Graf)
Graf = Graf + 1;
subplot(1,2,1)
    plot(xline,(abs(spect))/1000)
    title('Modified signal - Absolute part')
    ylabel('Optical power [dBm] \rightarrow');
    xlabel('Frequency [THz] \rightarrow');

subplot(1,2,2)
    plot(xline,angle(spect))
    title('Modified signal - Phase')
    xlabel('Frequency [THz] \rightarrow');
    ylabel('\pi \rightarrow');

pha2 = angle(spect); % count phase of whole modified spectrum

figure(Graf)
Graf = Graf + 1;
    plot(xline,pha1-pha2)
    title('Phase discrepancy')
    xlabel('Frequency [THz] \rightarrow');
    ylabel('\pi \rightarrow');

% Transform to time domain

Opt_out = ifft(fftshift(spect));

```

B ÚPLNÉ KÓDY PROFILŮ – OPTSIM

B.1 SBS_n

```
savefile='surovadata.mat';
save (savefile);

treshold = treshold *1000;

va = sqrt((7.37e10)/(2.21e3));

freq_shift = ((2*((n*va)/Lamda_0*10^-9))/10^-6);

% spectral part counting
spect = fftshift(fft(Opt_in)); % Fourier transform
xstep=(upper_frequency - lower_frequency)/(num_samples-1);
xline = lower_frequency : xstep : upper_frequency;
num_moved = ceil(freq_shift / xstep);

figure(Graf)
Graf = Graf + 1;
subplot(1,2,1)
plot(xline, (abs(spect))/1000)
title('Absolute part')
ylabel('Optical power [dBm] \rightarrow ');
xlabel('Frequency [THz] \rightarrow');
subplot(1,2,2)
plot(xline, angle(spect))
title('Phase')
xlabel('Frequency [THz] \rightarrow');
ylabel('\pi \rightarrow');

phal = angle(spect); % count phase of whole spectrum

database = zeros(1,num_samples); % database of sources

for i = 1:num_samples
    if(abs(spect(i))>treshold) % find position of source
        database(i) = (abs(spect(i))) - treshold; % count overlap
        database(i) = (database(i)) / 2;
        spect(i) = treshold*exp(1i*angle(spect(i)));
    end
end

figure(Graf)
Graf = Graf + 1;
plot(xline, (abs(spect))/1000)
title('Reduced signal spectre')
ylabel('Optical power [dBm] \rightarrow');
xlabel('Frequency [THz] \rightarrow');
```

```

for i = 1 : num_samples
    if(database(i)~=0) % if signal reaches treshold
        spect(i-num_moved) = spect(i-num_moved) + database(i) *exp
(1i*angle(spect(i-num_moved)));
        spect(i+num_moved) = spect(i+num_moved) + database(i) *exp
(1i*angle(spect(i+ num_moved)));
    end
end

figure(Graf)
Graf = Graf + 1;
subplot(1,2,1)
    plot(xline,(abs(spect))/1000)
    title('Modified signal - Absolute part')
    ylabel('Optical power [dBm] \rightarrow');
    xlabel('Frequency [THz] \rightarrow');

subplot(1,2,2)
    plot(xline,angle(spect))
    title('Modified signal - Phase')
    xlabel('Frequency [THz] \rightarrow');
    ylabel('\pi \rightarrow');

pha2 = angle(spect); % count phase of whole modified spectrum

figure(Graf)
Graf = Graf + 1;
    plot(xline,pha1-pha2)
    title('Phase discrepancy')
    xlabel('Frequency [THz] \rightarrow');
    ylabel('\pi \rightarrow');

% Transform to time domain

Opt_out = ifft(fftshift(spect));

```

B.2 SBS_mikrodeformace

```
savefile='surovadata.mat';
save (savefile);

treshold = treshold *1000;
freq_shift = ((1*Microstrain+(193325/7))*(3500000/9))*10^-12;

% spectral part counting
spect = fftshift(fft(Opt_in)); % Fourier transform
xstep=(upper_frequency - lower_frequency)/(num_samples-1);
xline = lower_frequency : xstep : upper_frequency;
num_moved = ceil(freq_shift / xstep);

figure(Graf)
Graf = Graf + 1;
subplot(1,2,1)
    plot(xline, (abs(spect))/1000)
    title('Absolute part')
    ylabel('Optical power [dBm] \rightarrow ');
    xlabel('Frequency [THz] \rightarrow');
subplot(1,2,2)
    plot(xline, angle(spect))
    title('Phase')
    xlabel('Frequency [THz] \rightarrow');
    ylabel('\pi \rightarrow');

phal = angle(spect); % count phase of whole spectrum

database = zeros(1,num_samples);

for i = 1:num_samples
    if(abs(spect(i))>treshold)
        database(i) = (abs(spect(i))) - treshold;
        database(i) = (database(i)) / 2;
        spect(i) = treshold*exp(1i*angle(spect(i)));
    end
end

figure(Graf)
Graf = Graf + 1;
    plot(xline, (abs(spect))/1000)
    title('Reduced signal spectre')
    ylabel('Optical power [dBm] \rightarrow');
    xlabel('Frequency [THz] \rightarrow');

for i = 1 : num_samples
    if(database(i)~=0) % if signal reaches treshold
        spect(i-num_moved) = spect(i-num_moved) + database(i) *exp
(1i*angle(spect(i-num_moved)));
        spect(i+num_moved) = spect(i+num_moved) + database(i) *exp
(1i*angle(spect(i+ num_moved)));
    end
end
```

```

figure(Graf)
Graf = Graf + 1;
subplot(1,2,1)
    plot(xline, (abs(spect))/1000)
    title('Modified signal - Absolute part')
    ylabel('Optical power [dBm] \rightarrow');
    xlabel('Frequency [THz] \rightarrow');

subplot(1,2,2)
    plot(xline, angle(spect))
    title('Modified signal - Phase')
    xlabel('Frequency [THz] \rightarrow');
    ylabel('\pi \rightarrow');

pha2 = angle(spect); % count phase of whole modified spectrum

figure(Graf)
Graf = Graf + 1;
    plot(xline, pha1-pha2)
    title('Phase discrepancy')
    xlabel('Frequency [THz] \rightarrow');
    ylabel('\pi \rightarrow');

% Transform to time domain

Opt_out = ifft(fftshift(spect));

```

B.3 SBS_teplota

```
savefile='surovadata.mat';
save (savefile);

treshold = treshold *1000;

va = sqrt((7.37e10)/(2.21e3));

temperture_shift = (((sqrt(2))*Temperature/2)-
5*sqrt(2))*sqrt(2))*10^-6;
freq_shift = ((2*((n*va)/Lamda_0*10^-9))/10^-6) + temperture_shift;

% spectral part counting
spect = fftshift(fft(Opt_in)); % Fourier transform
xstep=(upper_frequency - lower_frequency)/(num_samples-1);
xline = lower_frequency : xstep : upper_frequency;
num_moved = ceil(freq_shift / xstep);

figure(Graf)
Graf = Graf + 1;
subplot(1,2,1)
plot(xline, (abs(spect))/1000)
title('Absolute part')
ylabel('Optical power [dBm] \rightarrow ');
xlabel('Frequency [THz] \rightarrow');
subplot(1,2,2)
plot(xline, angle(spect))
title('Phase')
xlabel('Frequency [THz] \rightarrow');
ylabel('\pi \rightarrow');

phal = angle(spect);

database = zeros(1,num_samples);

for i = 1:num_samples
    if(abs(spect(i))>treshold)
        database(i) = (abs(spect(i))) - treshold;
        database(i) = (database(i)) / 2;
        spect(i) = treshold*exp(1i*angle(spect(i)));
    end
end

figure(Graf)
Graf = Graf + 1;
plot(xline, (abs(spect))/1000)
title('Reduced signal spectre')
ylabel('Optical power [dBm] \rightarrow');
xlabel('Frequency [THz] \rightarrow');
```

```

for i = 1 : num_samples
    if(database(i)~=0) % if signal reaches treshold
        spect(i-num_moved) = spect(i-num_moved) + database(i) *exp
(1i*angle(spect(i-num_moved)));
        spect(i+num_moved) = spect(i+num_moved) + database(i) *exp
(1i*angle(spect(i+ num_moved)));
    end
end

figure(Graf)
Graf = Graf + 1;
subplot(1,2,1)
    plot(xline,(abs(spect))/1000)
    title('Modified signal - Absolute part')
    ylabel('Optical power [dBm] \rightarrow');
    xlabel('Frequency [THz] \rightarrow');

subplot(1,2,2)
    plot(xline,angle(spect))
    title('Modified signal - Phase')
    xlabel('Frequency [THz] \rightarrow');
    ylabel('\pi \rightarrow');

pha2 = angle(spect); % count phase of whole modified spectrum

figure(Graf)
Graf = Graf + 1;
    plot(xline,pha1-pha2)
    title('Phase discrepancy')
    xlabel('Frequency [THz] \rightarrow');
    ylabel('\pi \rightarrow');

% Transform to time domain

Opt_out = ifft(fftshift(spect));

```

C OBSAH PŘILOŽENÉHO MÉDIA

C.1 Vlastní elektronická verze práce

Obsahuje soubor .pdf s elektronickou verzí práce.

C.2 Složka MATLAB

Obsahuje složky s jednotlivými scripty po MATLAB:

- SBS_Obecne
- SBS_Mikrodeformace
- SBS_Teplota

C.3 Složka OptSim

Obsahuje soubory .zip s exportovanými projekty z OptSim:

- SBS_mikrodeformace.zip
- SBS_n.zip
- SBS_teplota.zip