

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra radioelektroniky



Stimulovaný Brillouinův rozptyl jako jev limitující
přenosovou kapacitu optických systémů

Stimulated Brillouin Scattering as a Limiting Effect for
Optical System Throughput

Bakalářská práce

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika

Studijní obor: Multimediální technika

Vedoucí práce: Ing. Matěj Komanec, Ph.D.

Csaba Horváth

Praha 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Horváth** Jméno: **Csaba** Osobní číslo: **425047**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Multimediální technika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Stimulovaný Brillouinův rozptyl jako jev limitující přenosovou kapacitu optických systémů

Název bakalářské práce anglicky:

Stimulated Brillouin Scattering as a Limiting Effect for Optical System Throughput

Pokyny pro vypracování:

Bakalářská práce je zaměřena na základní nelineární jevy v optických vláknech. Tyto jevy se ukazují jako limitující faktory pro přenosovou kapacitu optických vláken. Student naváže na předchozí individuální projekt a bude se zabývat zejména stimulovaným Brillouinovým rozptylem (SBS). Nejprve bude v simulačním software Optiwave OptiSystem vypracována studie vlivu parametrů budicího optického signálu na prahový výkon SBS rovněž i v závislosti na parametrech použitého optického vlákna. Hlavním výstupem práce pak bude experimentální ověření teoretických předpokladů - vyhodnocení prahového výkonu - stimulovaného Brillouinova rozptylu a porovnání s výstupy simulačního software. Student se dále zaměří i na možnost potlačení vlivu SBS pomocí frekvenční modulace budicího optického signálu.

Seznam doporučené literatury:

[1] R. Hui , M. O'Sullivan, Fiber Optic Measurement Techniques, Academic Press, 2009.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Matěj Komanec Ph.D., katedra elektromagnetického pole FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **02.02.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.08.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

„Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“

Datum:

.....

podpis

Rád bych na tomto místě poděkoval několika lidem, díky kterým bylo možné tuto práci realizovat. Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Matěji Komancovi Ph.D., za užitečnou metodickou pomoc při zpracování bakalářské práce. Také děkuji Ing. Dmytru Suslovovi za odborné návrhy k práci. Poděkování patří ještě přátelům, za cenné rady a pomoc při psaní této práci. Na závěr chci poděkovat své rodině a přítelkyni za podporu a trpělivost během celého mého studia.

Abstrakt

Tato práce je zaměřena na studium nelineárních jevů pozorovaných v optických vláknech. V prvních částech jsou popsány základní přenosové vlastnosti optických vláken. Projekt se dále zabývá především studií nelineární optiky. Z tohoto důvodu jsou podrobně popsány hlavní mechanismy nelineární optiky, jako například stimulovaný Brillouinův rozptyl, stimulovaný Ramanův rozptyl, auto-modulace fáze, křížová modulace fáze a čtyřvlnné směšování. Ve druhé části práce jsou popsány výsledky simulací pro efekt stimulovaného Brillouinova rozptylu a simulované, resp. teoretické hodnoty jsou porovnány. Poslední část práce obsahuje experimentální ověření teoretických předpokladů – vyhodnocení prahového výkonu – stimulovaného Brillouinova rozptylu a porovnání s výstupy simulačního softwaru a teorie.

Klíčová slova: Nelineární optika, Stimulovaný Brillouinův rozptyl, Stimulovaný Ramanův rozptyl, Auto-modulace fáze, Křížová modulace fáze, Čtyřvlnné směšování, Kerrův jev

Abstract

This work is focused on the study of nonlinear effects observed in optical fibers. First, the basic transmission characteristics of the optical fibers are described. The project then deals mainly with the study of nonlinear optics. Therefore the main mechanisms of nonlinear optics, such as stimulated Brillouin scattering, stimulated Raman scattering, self-phase modulation, cross-phase modulation and four wave mixing are described in details. The simulations for the effects of stimulated Brillouin scattering are illustrated in the second part of the work and the simulated values are compared to the theoretical ones. The last part contains the experimental verification of the theoretical hypotheses, the evaluation of stimulated Brillouin scattering threshold power and the comparison of theory and the simulation software output.

Keywords: Nonlinear optics, Nonlinear effect, Stimulated Brillouin Scattering, Stimulated Raman Scattering, Kerr effect, Self-Phase Modulation, Four Wave Mixing, Cross-Phase Modulation

Seznam použitých zkratek

CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing – hrubý vlnový multiplex
DFB	Distributed Feedback Laser – distribuovaný zpětnovazebný laser
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing – hustý vlnový multiplex
EDFA	Erbium Doped Fibre Amplifier – Erbiem dopovaný vláknový zesilovač
FP	Fabry Perotův Laser
FWM	Four Wave Mixing - čtyřvlnné směšování
HNLF	Highly nonlinear fiber – vysoce nelineární optické vlákno
SBS	Stimulated Brillouin Scattering - stimulovaný Brillouinův rozptyl
SPM	Self Phase Modulation - auto- modulace fáze
SRS	Stimulated Raman Scattering - stimulovaný Ramanův rozptyl
VOA	Variabilný optický atenuátor
WDM	Wavelength Division Multiplexing - vlnový multiplex
WWDM	Wide Wavelength Division Multiplexing – široký vlnový multiplex
XPM	Cross Phase Modulation - křížová modulace fáze
ZDWL	Zero Dispersion Wavelength –vlnová délka nulové disperze

Seznam použitých symbolů

$\Delta\nu_B$	SBS šířka pásma
$\Delta\nu_L$	spektrální šířka optického zdroje
A_{eff}	efektivní plocha
c	rychlost šíření světla
c/n_1	fázová rychlost ve vláknu
f	frekvence
g_b	Brillouinův koeficient zisku
g_r	Ramanův koeficient zisku
I	intenzita
L	délka optického vlákna
L_{eff}	efektivní délka
M	počet nově vniklých složek
N	počet vstupních složek
n_0	index lomu
n_2	nelineární index lomu
P	výkon
P/A_{eff}	optická hustota výkonu
P_{pr}	prahový výkon
r	poloměr jádra optického vlákna
v	rychlost akustické vlny
α	útlum vlákna
λ	vlnová délka
γ	nelineární koeficient gamma
$\omega_{i,j,k,l}$	frekvenční složky

Seznam obrázků

- Obrázek 1** Závislost výstupního výkonu na vstupním v případě lineárního prostředí
- Obrázek 2** Závislost výstupního výkonu na vstupním v případě nelineárního prostředí s označením prahového výkonu
- Obrázek 3** Vliv disperze na signál v optickém vlákně
- Obrázek 4** Červený a modrý posuv vzniklý díky SPM jevu
- Obrázek 5** FWM zobrazeno ve frekvenční oblasti kde dvě původní frekvenční složky ω_j a ω_k vytvoří čtyři nové frekvenční složky na ω_b , ω_p , ω_k , ω_l na výstupu vlákna [2] (vstupním výkonu)
- Obrázek 6** Spektrum Brillouinova efektu [2]
- Obrázek 7** Grafická ilustrace efektu SBS (levá strana: závislost odrazeného výkonu na vstupním výkonu, pravá strana: závislost přenášeného výkonu na výstupu vlákna na vstupním výkonu) [18]
- Obrázek 8** Spektrum Ramanova efektu [2]
- Obrázek 9** Dělení CWDM kanálů podle ITU-T G.694.2 a závislost optického útlumu na vlnové délce [19]
- Obrázek 10** Grafické uspořádání DWDM systému [20]
- Obrázek 11** Základní zapojení pro simulaci efektu SBS
- Obrázek 12** Závislost výstupního výkonu na vstupním pro šířku čáry laseru 1MHz (viditelný SBS efekt)
- Obrázek 13** Závislost výstupního výkonu na vstupním pro šířku čáry laseru 5MHz (viditelný SBS efekt)
- Obrázek 14** Závislost výstupního výkonu na vstupním pro šířku čáry laseru 10MHz (viditelný SBS efekt)
- Obrázek 15** Závislost výstupního výkonu na vstupním pro šířku čáry laseru 50MHz (viditelný SBS efekt)
- Obrázek 16** Závislost prahového výkonu SBS na šířce čáry laseru
- Obrázek 17** Závislost prahového výkonu SBS na délce vlákna
- Obrázek 18** Závislost prahového výkonu SBS na šířce čáry laseru, resp. srovnání simulované a vypočtené hodnoty
- Obrázek 19** Blokové schéma zapojení EDFA zesilovače
- Obrázek 20** Excitace iontů Erbium v důsledku čerpání a emise záření na vlnové délce 1550 nm [26]
- Obrázek 21** Schématická značka cirkulátoru [24]
- Obrázek 22** Experimentální uspořádání pro měření prahového výkonu SBS ve vlákně
- Obrázek 23** Blokové schéma pro kalibraci dvou odbočnic
- Obrázek 24** Blokové schéma pro kalibraci jedné vláknové odbočnice
- Obrázek 25** Měření SBS efektu pro šířku čáry laseru 100 kHz
- Obrázek 26** Srovnání zpětně rozptýlených výkonů pro různé šířky čáry laseru
- Obrázek 27** Závislost přenášeného výkonu na vstupním pro různé šířky čáry laseru

Seznam tabulek

Tabulka 1 Parametry HNLF vlákna

Tabulka 2 Simulovaný a vypočtené prahové výkony SBS

Tabulka 3 Parametry použitého laseru CoBrite DX₄ [23]

Tabulka 4 Parametry zesilovače CEFA-C-PB-HP-SM-30-NL0-OM1-8202-FA-FA [27]

Tabulka 5 Naměřené hodnoty celkového útlumu získané kalibrací

Tabulka 6 Závislost maximálního přenášeného výkonu v závislosti na šířce čáry laseru

Tabulka 7 Srovnání simulované, teoretické a měřené prahové výkony

Tabulka 8 Měřené hodnoty na 100 kHz šířku čáry laseru

Tabulka 9 Měřené hodnoty na 300 MHz šířku čáry laseru

Tabulka 10 Měřené hodnoty na 600 MHz šířku čáry laseru

Tabulka 11 Měřené hodnoty na 1000 MHz šířku čáry laseru

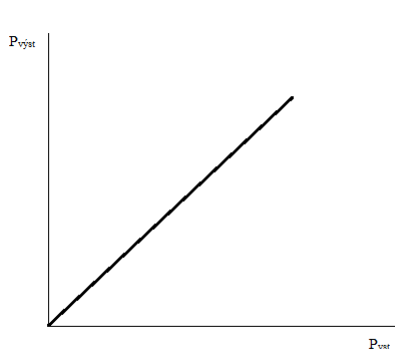
OBSAH:

1. Úvod	1
2. Limitující jevy pro přenos v optických vláknech	2
2.1 Rozptylové ztráty	2
2.1.1 Rayleighův rozptyl	2
2.1.2 Mieův rozptyl.....	2
2.1.3 Rozptyl na nečistotách	2
2.2 Útlum	2
2.3 Disperze	3
2.3.1 Vidová disperze	3
2.3.2 Chromatická disperze	4
2.3.3 Polarizačně vidová disperze	4
2.3.4 Materiálová disperze	4
2.4 Nelineární jevy v optickém prostředí	4
2.4.1 Kerrův jev	5
2.4.2 Auto-modulace fáze (Self-Phase Modulation – SPM).....	5
2.4.3 Křížová modulace fáze (Cross-Phase Modulation XPM)	6
2.4.4 Čtyřvlnné směšování (Four Wave Mixing – FWM)	6
2.4.5 Stimulovaný Brillouinův rozptyl (Stimulated Brillouin Scattering - SBS).....	7
2.4.6 Stimulovaný Ramanův rozptyl (Stimulated Raman Scattering – SRS)	9
3. Vlnové multiplexy – WDM	10
3.1 Optické sítě typu CWDM.....	10
3.2 Optické sítě typu DWDM	11
4. Využití optického prostředí OptiSystem	12
4.1 OptiSystem – Optiwave Corporation	12
4.2 Základní parametry a zapojení	12
4.3 Simulace a výsledky.....	13
4.4 Srovnání simulované a vypočtené hodnoty.....	15
5. Experimentální zapojení	17
5.1 Vysoce nelineární optické vlákno	17
5.2 Zdroj optického signálu.....	17
5.3 Optický zesilovač EDFA.....	18
5.4 Optický cirkulátor	19
5.5 Vláknová odbočnice.....	19
5.6 Variabilní optický atenuátor - VOA.....	20
5.7 Měřiče výkonu	20
5.8 Experimentální zapojení pro měření prahového výkonu SBS	20
6. Měření stimulovaného Brillouinova rozptylu	21
6.1 Kalibrace	21
6.2 Výsledky měření	22
6.3 Srovnané teoretické, simulované a měřené hodnoty	24
7. Závěr	26
Literatura	27
Přílohy	30

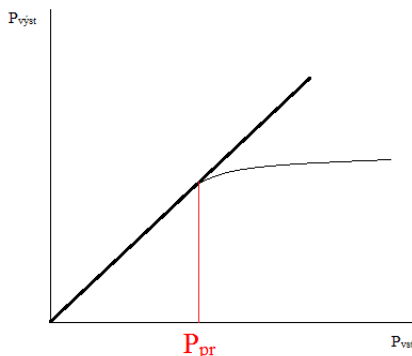
1. Úvod

Optická vlákna patří k přenosovým médiím, která jako jedná z mála umožňují přenášet informace velkými rychlostmi a zároveň na dlouhé vzdálenosti [1]. Cílem této práce je prostudovat a popsat nelineární jevy v optickém prostředí.

Optické prostředí můžeme rozlišovat na lineární, nebo nelineární (viz. Obrázek 1 a Obrázek 2) [2]. Lineární prostředí je takové, kde výstupní výkon je přímo úměrný vstupnímu výkonu. V nelineárním prostředí již tento předpoklad neplatí a výstupní výkon už nebude narůstat lineárně. Výkon, kde prostředí přestane být lineární, nazýváme prahový výkon P_{pr} .



Obrázek 1 Závislost výstupního výkonu na vstupním v případě lineárního prostředí



Obrázek 2 Závislost výstupního výkonu na vstupním v případě nelineárního prostředí s označením prahového výkonu

V dnešní době se optická vlákna využívají jako hlavní prvek telekomunikací, od kterých se očekává stále vyšší přenosová rychlost, a to při zachování malé chybovosti. Při takových podmínkách musíme počítat s nelineárním prostředím. Nelineární jevy jsou v mnoha případech nežádoucí, převážně v sítích s hustým vlnovým multiplexem (DWDM Dense Wavelength Division Multiplexing), kde dochází vlivem nelineárních jevů k mezisymbolové interferenci, deformaci signálů či limitaci vstupního výkonu [3]. Z toho důvodu je nezbytně nutné optická vlákna charakterizovat z hlediska nelineárních jevů.

Dopad nelineárních jevů je patrný zvláště při vysokých přenosových rychlostech. Tedy při navázání vysokého výkonu (už jednotek mW vzhledem mikroskopickým rozměrům jádra) do optického vlákna [4]. Nelineární jevy omezují výkon, který můžeme přenášet na optickém vlákně, převážně tam, kde se používá laser s úzkou šířkou čáry. Mezi tyto nelineární jevy patří stimulovaný Brillouinův rozptyl (SBS), kterým se tato práce zabývá. Je potřeba tento jev charakterizovat a definovat, na jakém výkonu pro daný materiál a typ vlákna tento efekt nastane. Také je potřeba prozkoumat způsob potlačení tohoto jevu.. Tato práce se zabývá analýzou SBS pro případ vysoce nelineárního vlákna, kde lze tento jev lépe pozorovat. Zároveň zvolené vlákno přináší další výhodu jelikož je tento jev pro nelineární aplikace kritický vzhledem k častým nárokům na úzkou spektrální čáru laseru v těchto aplikacích.

2. Limitující jevy pro přenos v optických vláknech

2.1 Rozptylové ztráty

Rozptylové ztráty vznikají na nečistotách a fluktuacích krystalické mřížky. Rozptylové ztráty se dají rozdělit do tří skupin [5].

2.1.1 Rayleighův rozptyl

Hlavní charakteristika Rayleighova rozptylu je všesměrovost. K tomuto jevu dochází, pokud v krystalické mřížce vznikají tepelné kmity. Tento jev nelze odstranit, dokonce ani podchlazením vlákna na absolutní nulu, protože při absolutní nule by došlo k „zamrznutí“ jednotlivých atomů v krystalické mřížce [5], [6], [7], [8].

2.1.2 Mieův rozptyl

Mieův rozptyl je úhlově závislý a jeho příčinou jsou mikroskopické trhliny a napětí ve vláknech, změna průměru jádra, nedokonalá struktura vlnovodu a nečistoty ve vláknech. Všechny tyto ovlivňující aspekty mají srovnatelnou velikost s vlnovou délkou [6], [7], [5], [8].

2.1.3 Rozptyl na nečistotách

Rozptyl na nečistotách je velmi podobný Mieůvovu rozptylu, ale nehomogenity jsou větší než vlnová délka světla. Tento druh rozptylu lze úplně eliminovat správnou technologií výroby [5].

2.2 Útlum

Útlumem se rozumí rozdíl síly signálu na dvou koncích vedení. Čím nižší je útlum, tím kvalitnější a přesnější bude přenos signálu. Optické vlákno má asi 1000 násobně menší útlum, než metalické vedení [9]. U optických vláken je útlum výrazně nižší než u jiných přenosových médií. Útlum se vyskytuje ve všech typech vlákna a je nutné s ním při návrhu přenosového systému počítat [1].

Definiční vztah pro útlum se dá vyjádřit rovnicí [5]:

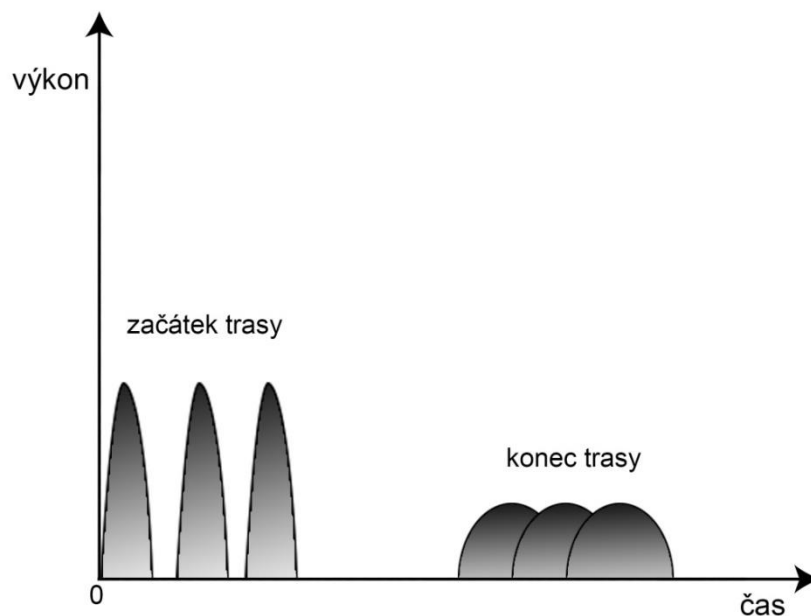
$$A = 10 * \log \frac{P_{in}}{P_{out}} \text{ [dB]}, \quad (1)$$

kde A označuje velikost útlumu, P_{in} je vstupní výkon a P_{out} je výstupní výkon.

Důležitým parametrem optických vláken je měrný útlum α [dB/km]. Tento parametr kvantifikuje velikost optických ztrát vztažených na jednotku délky vlákna [1].

2.3 Disperze

Při přenosu signálu optickým vláknem je puls vystaven působení nejen útlumu, ale podléhá také disperzi. Disperze způsobuje deformaci modulační obálky při šíření optického signálu [10]. Je to jev, který je způsoben rozdílnými fázovými i skupinovými rychlostmi složek signálu – vidů, frekvenčních složek pulsu. Disperze signálu je omezujícím faktorem, zejména ve velmi rychlých optických systémech s velkou přenosovou kapacitou. Přenášené optické pulsy se působením disperze rozšiřují a po určité vzdálenosti může dojít k jejich vzájemnému prolnutí. Vzniká mezisymbolová interference a narůstá tak chybovost přenosového systému [10]. Následně přijímač není schopen od sebe odlišit jednotlivé symboly, čímž začne digitální systém postupně vykazovat chyby.



Obrázek 3 Vliv disperze na signál v optickém vlákně

Disperze omezuje maximální dosažitelnou přenosovou rychlost digitálního optického systému [1]. Podle fyzikální příčiny vzniku, existuje více typů disperzí, jako je vidová disperze, chromatická disperze, polarizačně vidová disperze a materiálová disperze. V následujících podkapitolách popisují typy disperzí [1].

2.3.1 Vidová disperze

Vidová disperze je dána časovou diferencí nejrychlejšího a nejpomalejšího vidu při jednom kmitočtu. Vidová disperze je způsobena různou skupinovou rychlostí vidů v mnohovidovém vlákně. Tento jev se projevuje především u dlouhých vláken impulsového provozu, při přenosu dat na větší vzdálenosti a omezuje počet impulzů, které mohou být za určitý časový interval vyslány [8], [10].

2.3.2 Chromatická disperze

Chromatická disperze je tvořena třemi složkami: materiálovou disperzí, vlnovodovou disperzí a polarizačně vidovou disperzí (PMD – Polarization Mode Dispersion). Chromatická disperze se uplatňuje jak u mnohovidových, tak i u jednovidových vláken a je způsobena polychromatickým spektrem vyzařovaného záření zdroje a závislosti skupinové rychlosti na vlnové délce. Při přenosu dochází k časovému rozšiřování pulsu, protože jednotlivé složky získávají rozdílná zpoždění. Chromatická disperze je nejsilnější jev omezující přenosovou rychlost v optických jednovidových vláknech [4], [7], [8], [10].

2.3.3 Polarizačně vidová disperze

Polarizačně vidová disperze zapříčiňuje to, že index lomu materiálů optického vlákna vykazuje jistou míru anizotropie (dvojlomu). To způsobuje, že se optická vlna ve vlákne šíří ve dvou rovinách polarizace s rozdílnou skupinovou rychlostí. PMD se projevuje i u jednovidových vláken. Dopadne-li na povrch anizotropní látky světelný paprsek, rozštěpí se při vstupu do látky na dva dílčí paprsky, které postupují v materiálu různým směrem, přičemž vlnová délka žádného z paprsků se nezmění [1], [8], [11]. Tento jev se nazývá dvojlom.

2.3.4 Materiálová disperze

Optická vlákna jsou vyráběna z materiálů, u nichž je index lomu závislý na frekvenci vedeného světla. Jednotlivé složky přenášeného pulsu se šíří různými skupinovými rychlostmi, což způsobuje časové rozšíření signálu. Různé rychlosti vlny v materiálu snižují přenosovou kapacitu vlákna. Materiálová disperze je tedy závislost indexu lomu materiálu optického vlákna na úhlové frekvenci, resp. na vlnové délce [8], [10].

2.4 Nelineární jevy v optickém prostředí

Existují dva základní typy nelineárních jevů v optických vláknech. První vzniká v důsledku interakce optických signálů s fotony, kdy se generuje nelineární rozptyl, jako je například stimulovaný Ramanův rozptyl (SRS – Stimulated Raman Scattering) nebo stimulovaný Brillouinův rozptyl (SBS – Stimulated Brillouin Scattering). Druhý typ nelinearity vzniká v důsledku Kerrova jevu [3], [13]. Jak je zřejmé z rovnice (2). Optický Kerrův jev znamená, že index lomu je závislý na intenzitě světelného paprsku vstupujícího do prostředí. Mezi tyto jevy patří auto-modulace fáze (SPM – Self Phase Modulation), čtyřvlnné směšování (FWM – Four Wave Mixing) a křížová modulace fáze (XPM – Cross Phase Modulation) [12], [13].

2.4.1 Kerrův jev

Optický Kerrův jev nastane proto, že index lomu je závislý na intenzitě signálu vstupujícího do tohoto prostředí. Index lomu n se dá vyjádřit pomocí vztahu [13]:

$$n = n_0 + n_2 \frac{P}{A_{eff}} = n_0 + n_2 I , \quad (2)$$

kde n_0 je lineární část indexu lomu (index lomu jádra při nízké úrovni optického výkonu), n_2 je nelineární část indexu lomu (např. $2,35E-20 \text{ m}^2/\text{W}$ pro křemík), P je optický výkon, A_{eff} je efektivní plocha a I je intenzita. Výkon na jednotku efektivní plochy P/A_{eff} se nazývá optická hustota výkonu.

Nelineární přírůstek indexu lomu lze minimalizovat snížením optického výkonu navázaného do vlnovodu a zvětšením průřezu jádra.

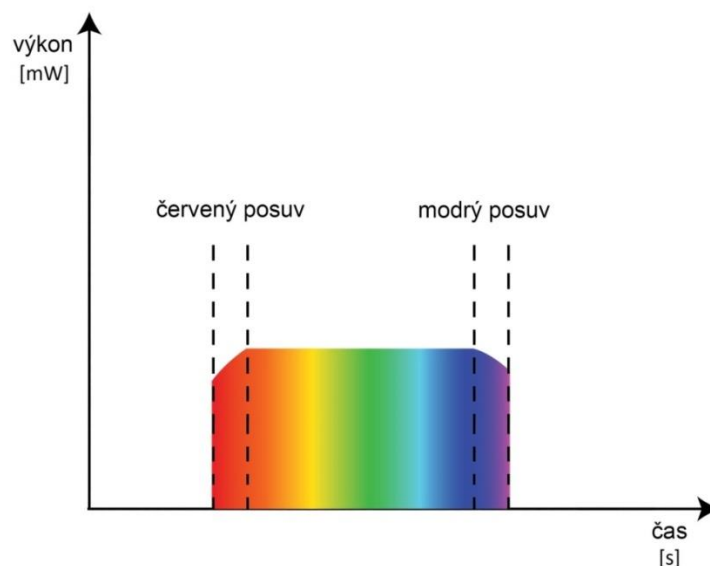
2.4.2 Auto-modulace fáze – SPM

Dalším důležitým limitujícím efektem v optických systémech, které pracují s krátkými intenzivními pulsy, je auto-modulace fáze. Je to nelineární optický jev vyplývající z Kerrova jevu. V důsledku tohoto jevu dochází ke změně optického signálu. Změna fáze je závislá především na nelineárním indexu lomu n_2 , délce optického vlákna L , kterou signál prochází, výkonu paprsku P a efektivní ploše A_{eff} . Dochází k němu při rychlých změnách výkonu signálu [2]. Tato změna je typická pro hrany impulzu.

Změna fáze $\Delta\varphi$ je dána vztahem [2]:

$$\Delta\varphi = 2\pi * n_2 \frac{L}{\lambda_0 A_{eff}} P \quad (3)$$

Změny výkonu signálu způsobují změny indexu lomu. Změní-li se index lomu, dojde k modulaci fáze přenášeného signálu. Náběžná hrana impulzu způsobí posun vlnových délek nahoru – „červený posuv“, sestupná hrana naopak způsobí posun vlnových délek dolů – „modrý posuv“ (Viz. Obrázek č. 4) [2].



Obrázek 4 Červený a modrý posuv vzniklý díky SPM jevu

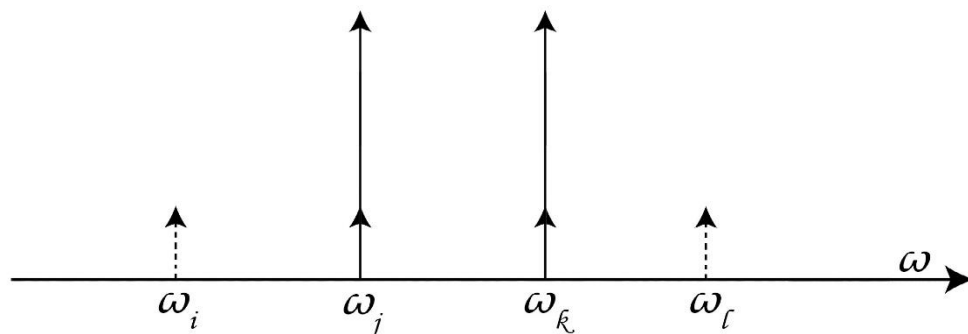
2.4.3 Křížová modulace fáze – XPM

Křížová modulace fáze patří také mezi nelineární jevy vycházející z Kerrova efektu a definuje se podobně jako SPM. XPM je speciálním případem SPM, kde dva, nebo více intenzivních impulzů prochází synchronně vláknem. Typickým případem je WDM (Wavelength Division Multiplexing) systém. K danému jevu dojde tehdy, pokud se pulsy začnou vzájemně překrývat v čase. Tento jev nastane s velikou pravděpodobností, protože skupinová rychlost šíření se mění s vlnovou délkou [2], [14].

2.4.4 Čtyřvlnné směšování – FWM

Čtyřvlnné směšování je nelineární efekt, vyplývající z třetího řádu optické nelinearity. Efekt nastává při navázání tří světelných paprsků různé vlnové délky v nelineárním prostředí a v blízkosti vlnové délky nulové disperze (ZDWL). Optické prostředí způsobí, že vznikne čtvrtá vlna odlišná od těchto třech předchozích [2]. FWM je charakteristickým limitujícím jevem DWDM systémů, což značí přenosy s vysokou rychlostí a vzájemnou nezávislostí signálů pracujících na jednom optickém vlákně. U těchto systémů je potřeba splnit podmínku fázového souladu [2].

Na obrázku č. 5 je znázorněno, jak se tvoří čtyři signály na výstupu optického prostředí, když do toho vstupují dva signály – vystupují dva původní a od každého vstupního signálu ještě jeden nový.



Obrázek 5 FWM zobrazeno ve frekvenční oblasti kde dvě původní frekvenční složky ω_j a ω_k vytvoří čtyři nové frekvenční složky na ω_i , ω_j , ω_k , ω_l na výstupu vlákna [2]

Počet vzniklých složek signálu je dán vztahem [2]:

$$M = \frac{N^2}{2} * (N - 1), \quad (4)$$

kde: M – počet nově vzniklých složek signálu,

N – počet vstupních signálů.

2.4.5 Stimulovaný Brillouinův rozptyl (SBS)

Brillouinův rozptyl je vyvolán interakcí fotonu v daném prostředí a přeměnou fotonu na foton o nižší energii, který se šíří opačným směrem, a akustický fonon. Nově vzniklá akustická vlna o prahovém výkonu způsobí lokální změnu indexu lomu [2], [8]. Foton šířící se v opačném směru má jinou frekvenci než foton původního signálu. Prahový výkon P_{thSBS} Brillouinova rozptylu můžeme spočítat vztahem [15]:

$$P_{thSBS} = 21 \frac{K * A_{eff}}{L_{eff} * g_0} \left(\frac{\Delta v_B + \Delta v_L}{\Delta v_B} \right), \quad (5)$$

kde K je polarizační faktor, A_{eff} je efektivní plocha, L_{eff} je efektivní délka a g_0 je špičkový koeficient zesílení, Δv_B označuje šířku pásma SBS a Δv_L je spektrální šířka optického zdroje. P_{thSBS} nabývá hodnoty kolem 30 -40 mW u konvenčních křemenných jednovidových vláken. Polarizační faktor K může nabývat hodnoty v rozmezí 1-2 [15]. Hodnota 1 odpovídá vlně, která má pořád stejnou polarizaci v celé délce vlákna, zatímco 2 odpovídá volné polarizaci. Šířka pásma SBS (Δv_B) je kolem 35 MHz pro křemen. Špičkový koeficient g_0 může být vyjádřen vztahem [12]:

$$g_0 = \frac{2\pi n^7 p_{12} K}{c \lambda \rho v_a \delta f_b}, \quad (6)$$

kde n označuje index lomu materiálu, ρ je hustota materiálu, p_{12} je elasto-optický koeficient, λ je průměrná vlnová délka, v_a je akustická vlnová rychlost a c je rychlost světla ve vakuu. g_0 nabývá hodnoty kolem $5 * 10^{-11}$ v případě křemene.

Efektivní plochu A_{eff} se dá vyjádřit rovnicí [16]:

$$A_{eff} = \frac{2\pi \left(\int_0^\infty L(r) r dr \right)^2}{\int_0^\infty L^2(r) r dr}, \quad (7)$$

L je délka optického vlákna a r je poloměr jádra optického vlákna. Efektivní délku optického vlákna L_{eff} můžeme spočítat vztahem [16]:

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha}, \quad (8)$$

kde α je měrný útlum a L je délka optického vlákna v km [7].

Nelineární koeficient γ se rovná [12]:

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}}, \quad (9)$$

kde λ je vlnová délka a n_2 je nelineární index lomu.

Foton, který se šíří v opačném směru, má jinou frekvenci, než foton, který se šíří optickým signálem. V křemenných vláknech se hodnota frekvenční rozdílu pohybuje kolem 9-11 GHz [8].

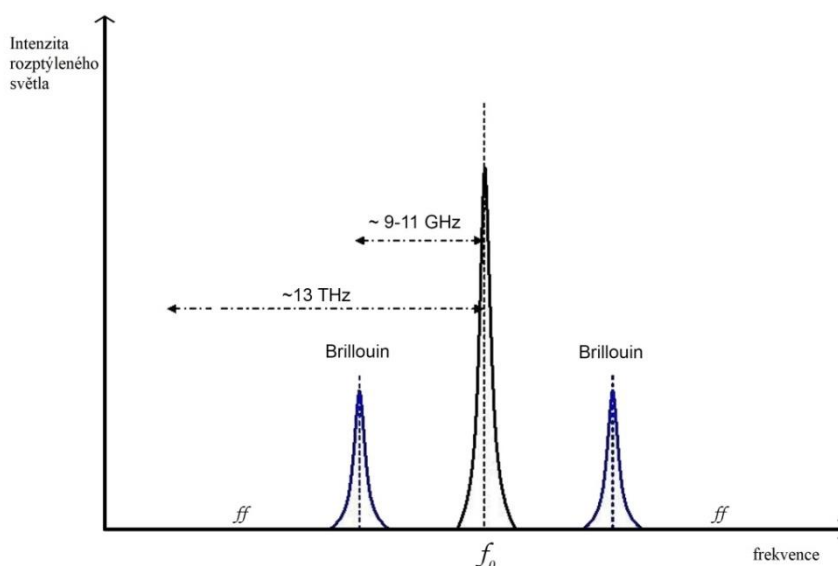
Rozdíl frekvencí pak můžeme spočítat vztahem [12]:

$$\Delta f = 2f_0 \frac{v}{\left(\frac{c}{n_1} \right)}, \quad (10)$$

kde n_1 je index lomu jádra vlákna, c/n_1 je skupinová rychlost ve vlákně, v je rychlost akustické vlny a f_0 je frekvence původního optického signálu.

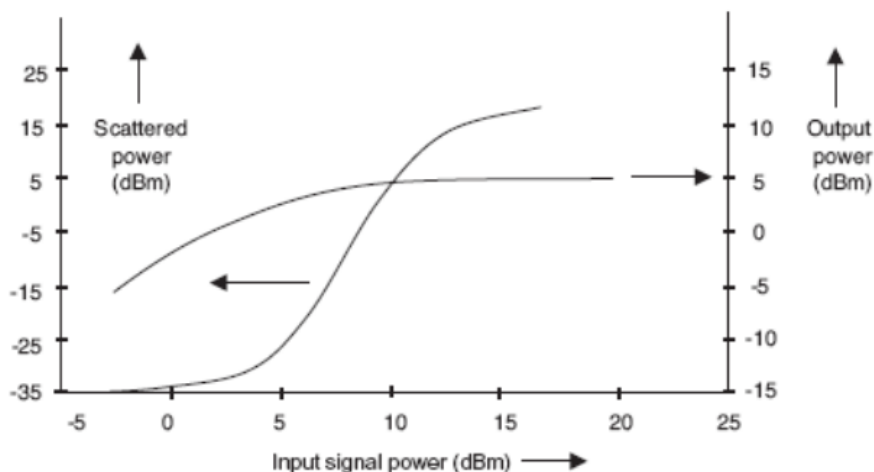
Prahový výkon SBS závisí na přenášené šířce pásma a druhu optického vlákna [2], [17].

Účinnost SBS je vysoká pouze tehdy, když šířka čáry optického signálu je úzká. Pokud se ve stejném vlákně pohybuje jiný optický signál, který má stejný směr a frekvenci jako jednotlivé fotony, může být signál zesílen procesem SBS. Na základě toho se dá stimulovaný Brillouinův rozptyl používat také ke konstrukci optického zesilovače [8].



Obrázek 6 Spektrum Brillouinova efektu [2]

Spektrum SBS je graficky znázorněno na obrázku č. 6. Na obrázku č. 7 vidíme, že s rostoucím vstupním výkonem se postupně zvyšuje i výstupní výkon. V určitém bodě ale dosáhne maxima, kde výstupní výkon zůstává konstantní i při stálém zvyšování vstupního výkonu. Zbývající část výkonu se odrazí zpětným směrem po dosažení maxima. Proto efekt SBS zapříčiňuje nízký přenos energie. Potlačení SBS zvýšíme jeho prahový výkon. Když se prahový výkon SBS zvýší, můžeme navázat a přenést větší optický výkon vláknem.



Obrázek 7 Grafická ilustrace efektu SBS (levá strana: závislost odraženého výkonu na vstupním výkonu, pravá strana: závislost přenášeného výkonu na výstupu vlákna na vstupním výkonu) [18]

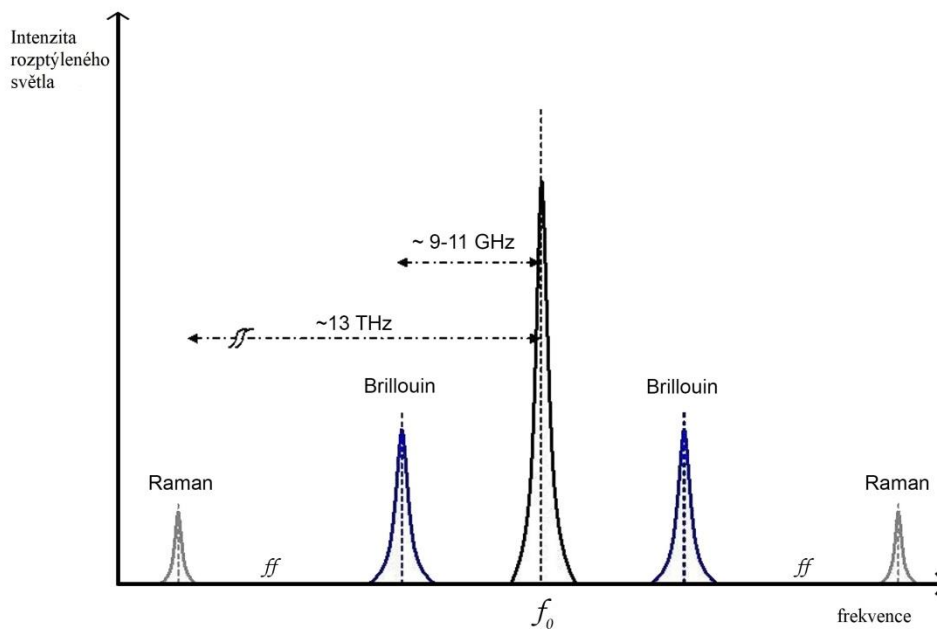
2.4.6 Stimulovaný Ramanův rozptyl (SRS)

V případě Ramanova rozptylu fotony optické vlny šířící se daným prostředím jsou přeměněny na fotony o nižší energii a jiné frekvenci v důsledku vibrací molekul materiálu, kterým se vlna šíří [16]. Narozdíl od SBS, kde se Stokesovy vlny šíří pouze v opačném směru, u SRS se Stokesovy vlny mohou šířit oběma směry [8], [12]. Prahová hodnota výkonu vyvolání tohoto efektu je výrazně větší než u Brillouinova efektu, nabývá hodnoty kolem 500 mW u křemenných vláken. Prahový výkon P_{prSRS} můžeme spočítat vztahem [12]:

$$P_{prSRS} = \frac{16A_{eff}\alpha}{g_r}, \quad (11)$$

kde A_{eff} je efektivní plocha, α je měrný útlum a g_r je Ramanův koeficient zisku [12].

Spektrální šířka pásma SRS je mnohem širší než u SBS. Maximální Ramanova účinnost nastane u frekvenčního posunutí o 13 THz [12], oproti 9-11 GHz v případě SBS [8]. Vznik dalších spektrálních složek vidíme na obrázku č. 8. [2].



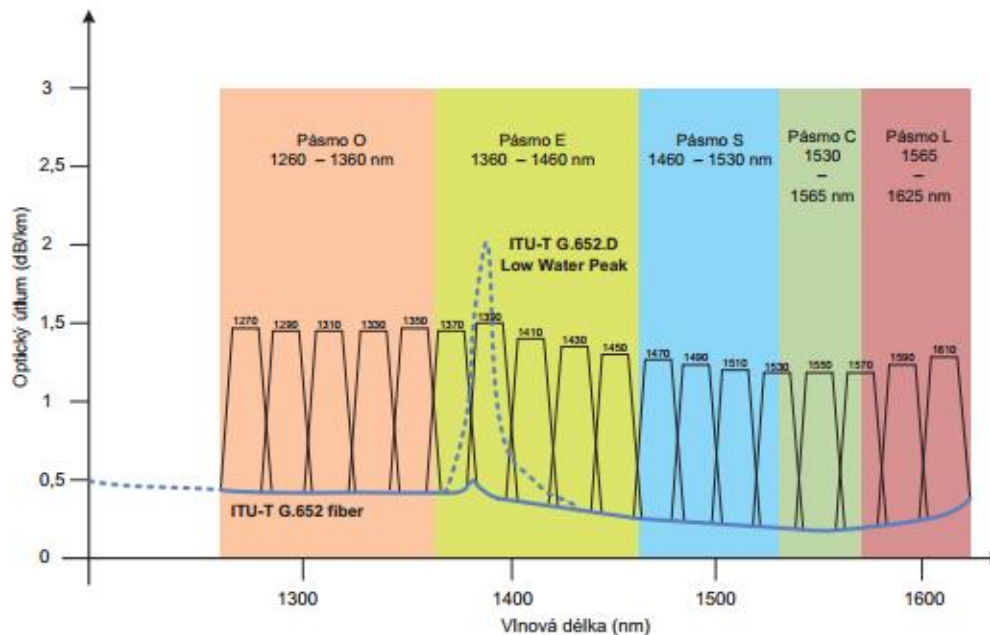
Obrázek 8 Spektrum Ramanova efektu [2]

3. Vlnové multiplexy - WDM

WDM (Wavelength Division Multiplexing) – vlnový multiplex vyšel z myšlenky sdružit několik optických kanálů, které byly dříve přenášeny separátně každý jedním vláknem, do jednoho vlákna na základě vlnového oddělení. Přenášená informace je ve vysílači namodulována na každou z nosných frekvencí. V multiplexoru dojde ke sloučení všech optických kanálů do jednoho optického vlákna. Pokud chceme uskutečnit n kanálový spoj, je zapotřebí kromě jednoho multiplexoru a demultiplexoru, také n modulátorů, zdrojů světla a demodulátorů. V přijímacím linkovém zakončení dojde k jeho demultiplexování podle frekvenčních pásů na signály v okolí jednotlivých nosných frekvencí a ty jsou pak přijaty, vyhodnoceny a dále zpracovávány jednotlivými přijímači [19].

3.1 Optické sítě typu CWDM

Hrubý vlnový multiplex CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) umožňuje v jediném optickém vlákně přenášet najednou až 18 nezávislých optických signálů s různou vlnovou délkou. Metoda je velmi podobná metodě DWDM, rozdíl je ve větším odstupu jednotlivých kanálů, což snižuje celkovou kapacitu vlákna a vlnové délky jsou vybírány na základě doporučení ITU-T G.694.2 z rozsahu 1270 nm až 1610 nm s odstupem 20 nm jak demonstruje obrázek č. 9. [9], [19].

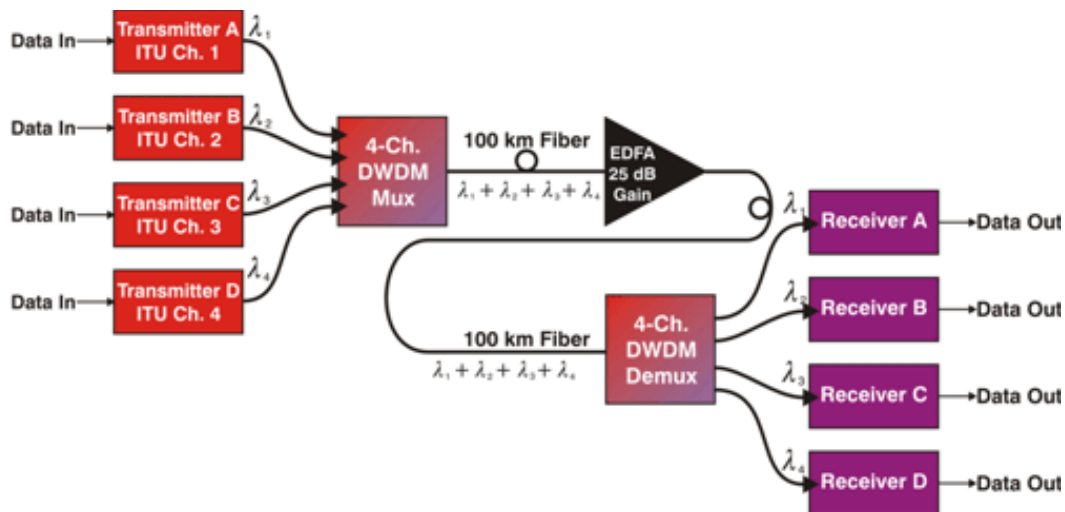


Obrázek 9 Dělení CWDM kanálů podle ITU-T G.694.2 a závislost optického útlumu na vlnové délce [19]

3.2 Optické sítě typu DWDM

Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM), česky Hustý vlnový multiplex je efektivní metoda vícenásobného využití optického vlákna, pomocí frekvenčního dělení vlákna do jednotlivých kanálů. Všechny kanály jsou přenášeny jedním optickým vláknem současně. Každý kanál může být nezávislý na protokolu, rychlosti a směru komunikace. DWDM tedy umožňuje vícenásobné využití stávajících vláken a zvětšení přenosových kapacit a rychlostí [2], [9].

Nelineární jevy negativně působí na výkon DWDM systémů. Způsobují větší chybovost a omezují tak přenosovou rychlost. DWDM trasa se obvykle skládá z vysílače a přijímače, multiplexoru, demultiplexoru a optovláknového zesilovače EDFA (Erbium-doped fiber amplifiers). Na obrázku č. 10 vidíme grafické uspořádání DWDM systému [20]. Vlnové délky jsou v rozsahu od 1490 nm do 1620 nm s odstupem jednotlivých kanálů 100 GHz. Je možno paralelně přenášet 32, 64 nebo až 96 nosných kanálů. Přenosová rychlost vlákna pak dosahuje až 1Tbit/s [9].



Obrázek 10 Grafické uspořádání DWDM systému [20]

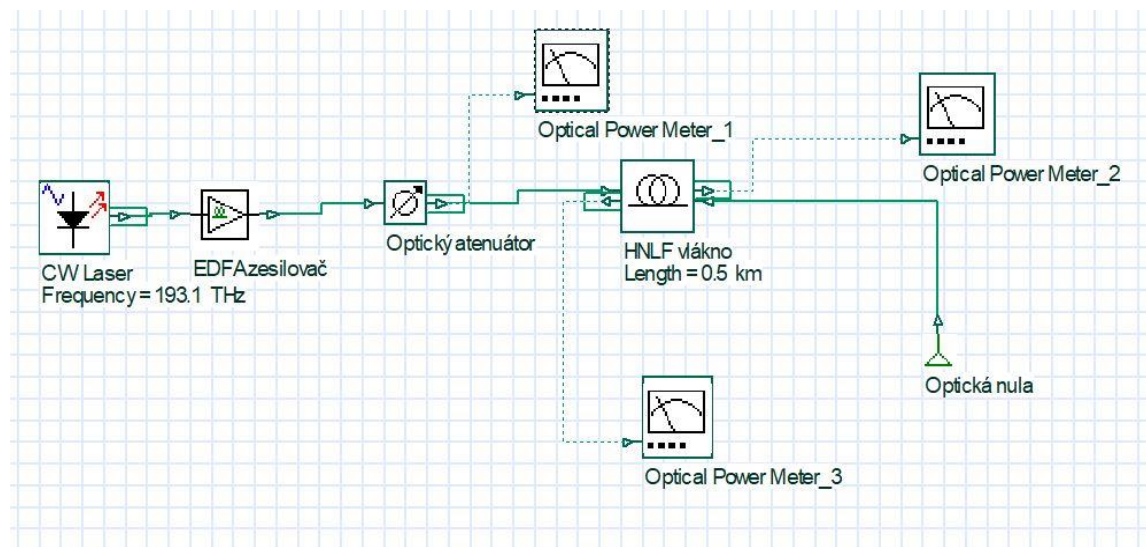
4. Využití optického prostředí OptiSystem

4.1 OptiSystem – Optiwave Corporation

OptiSystem je komplexní software, který umožňuje uživatelům plánovat, testovat a simulovat optické spoje v přenosové vrstvě moderních optických sítí. Program OptiSystem jsem v této práci používal pro ověření teoretických předpokladů a pro porovnání výsledků simulace s výpočty a s naměřenými hodnotami.

4.2 Základní parametry a zapojení

Schéma zapojení je znázorněno na obrázku č. 11. Jako zdroj světla slouží kontinuální (CW) laser. Simulační zapojení se shoduje s experimentální částí. K měření výkonu používám tři wattmetry. Wattmetr 1 měří výkon který vstupuje do měřeného vlákna, wattmetr 2 měří přenášený výkon na výstupu vlákna a wattmetr 3 měří zpětně rozptýlený výkon. +



Obrázek 11 Základní zapojení pro simulaci efektu SBS

Na CW laseru je nastavena frekvence 193,1 THz, 1559 nm vlnová délka a 5 dBm výstupního výkonu. Na EDFA zesilovači je výstupní výkon nastaven na 25 dBm. Pomocí optického attenuátoru utlumíme signál tak, abychom měřili v rozsahu 5 dBm až 25 dBm s krokem 1 dB. Simulace efektu SBS proběhla na vlákne typu HNLF (Highly non-linear fiber), které má následující parametry (viz. Tabulka 1):

Efektivní plocha A_{eff}	11,6 [μm^2]
Měrný útlum α	0,88 [dB/km]
Vlnová délka nulové disperze λ	1559 [nm]
Nelineární koeficient γ	11,35 [$\text{W}^{-1} \text{km}^{-1}$]
Délka L	500 [m]
SBS šířka čáry $\Delta\nu_B$	31,7 [MHz]

Tabulka 1 Parametry HNLF vlákna

Z nelineárního koeficientu γ můžeme spočítat nelineární index lomu, který se potom také nastavuje v simulaci. Nelineární index lomu se dá vyjádřit pomocí vztahu [12]:

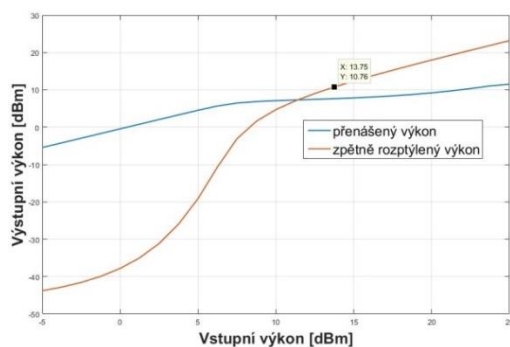
$$n_2 = \frac{\lambda * A_{eff} * \gamma}{2\pi} \quad (12)$$

Vypočtená hodnota n_2 pomocí rovnice (12) se rovná $3,2668 * 10^{-20}$.

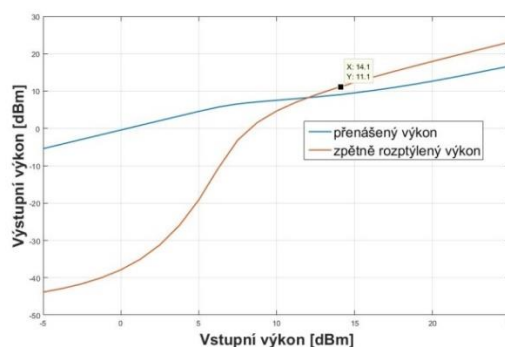
Prahový výkon SBS se dá spočítat ze vztahu (5). Vypočtený prahový výkon činí $P_{thSBS} = 14,9$ dBm pro danou hodnotu $\Delta\nu_L = 10$ MHz a vypočtená hodnota efektivní délky L_{eff} ze vztahu (8) je $L_{eff} = 404,5$ m.

4.3 Simulace a výsledky

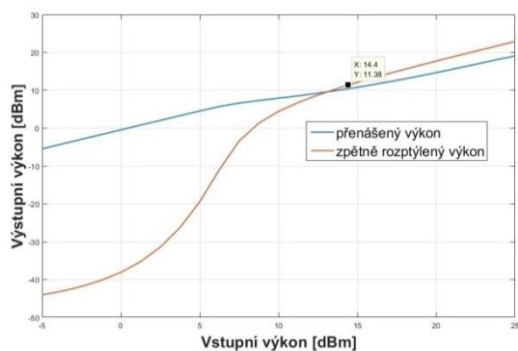
Simulace proběhla pro několik spektrálních šířek pásma laseru: 1 MHz, 5MHz, 10MHz a 50 MHz. Pro výkony v rozpětí -5 dBm až 25 dBm s krokem 1 dB. Sledoval jsem přenášený výkon na výstupu vlákna a zpětně rozptýlený výkon. Na obrázku č. 12, 13, 14 a 15 jsou znázorněny vyhodnocené výsledky simulací.



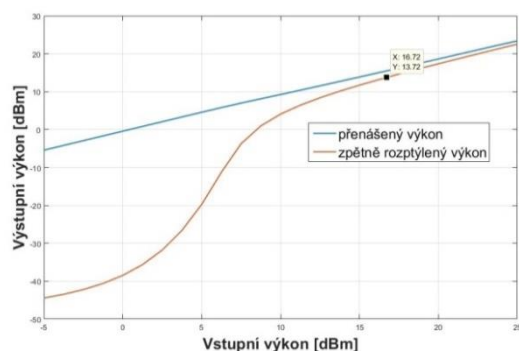
Obrázek 12 Závislost výstupního výkonu na vstupním pro šířku čáry laseru 1MHz (viditelný SBS efekt)



Obrázek 13 Závislost výstupního výkonu na vstupním pro šířku čáry laseru 5MHz (viditelný SBS efekt)

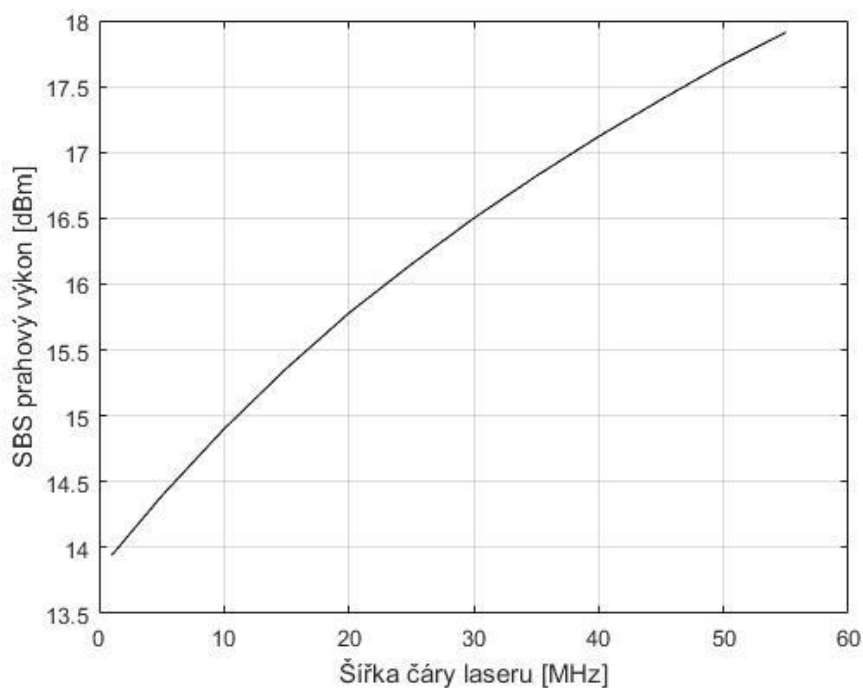


Obrázek 14 Závislost výstupního výkonu na vstupním pro šířku čáry laseru 10MHz (viditelný SBS efekt)



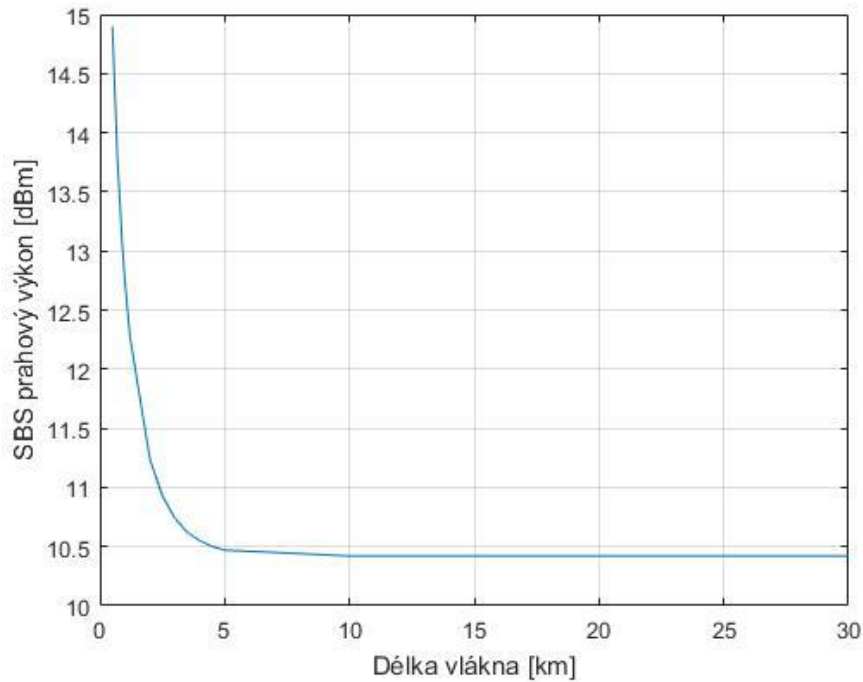
Obrázek 15 Závislost výstupního výkonu na vstupním pro šířku čáry laseru 50MHz (viditelný SBS efekt)

Jak je z grafů patrné, prahový výkon je silně závislý na šířce pásma laseru. Úzké šířky pásma laseru mají mnohem nižší prahové výkony. Na grafu č. 16 je vidět, jak závisí prahový výkon na šířce pásma laserů.



Obrázek 16 Závislost prahového výkonu SBS na šířce čáry laseru

Prahový výkon mimo jiné závisí na délce vlákna. Na obrázku č. 17 je zobrazena teoreticky vypočtena závislost P_{th} na délce vlákna.



Obrázek 17 Závislost prahového výkonu SBS na délce vlákna

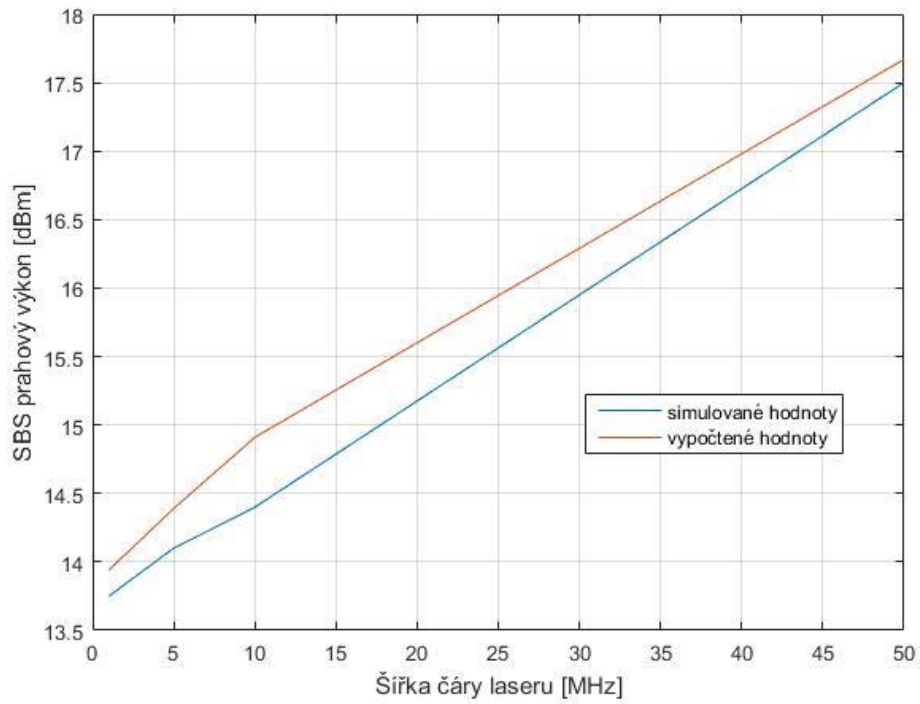
4.4 Srovnání simulovaných a vypočtených hodnot

V tabulce č. 2 jsou porovnány výsledky simulací a výpočtů prahového výkonu SBS. Vypočítané hodnoty byly získány ze vztahu (5) a společně se simulovanými hodnotami byly vykreslené do grafu a odečteny pomocí programu MATLAB. Odečítal jsem hodnotu, kde zpětně rozptýlený výkon je roven polovině hodnoty vstupního výkonu [12].

Šířka čáry laseru [MHz]	1	5	10	50
$P_{thSBS_simulace}$ [dBm]	13,75	14,1	14,4	16,72
$P_{thSBS_výpočet}$ [dBm]	13,94	14,39	14,91	17,67
Rozdíl [dB]	0,19	0,29	0,51	0,95

Tabulka 2 Simulované a vypočtené prahové výkony SBS

Na obrázku č. 18 je znázorněna závislost výkonu SBS na šířce čáry laseru pro simulované a vypočtené hodnoty.



Obrázek 18 Závislost prahového výkonu SBS na šířce čáry laseru, resp. srovnání simulované a vypočtené hodnoty

5. Experimentální zapojení

5.1 Vysoce nelineární optické vlákno

Pro praktické ověření jevu SBS bylo zvoleno vysoce nelineární vlákno (HNLF – Highly NonLinear Fiber). HNLF se vyznačuje menším průměrem jádra, a tedy větší nelinearitou, oproti klasickému jednovidovému vláknu a nulovou chromatickou disperzí v oblasti 1559 nm. Parametry vlákna jsou uvedeny v Tabulce č. 1. [21]. Vlákno bylo zvoleno pro lepší demonstraci SBS efektu a vlivu šířky čáry zdroje optického signálu.

5.2 Zdroj optického signálu

Laserové zařízení je koherentní světlo a nešíří se chaoticky, ale má přesně definovaný směr šíření. Jelikož Brillouinův rozptyl má úzkou frekvenční šířku, budeme potřebovat laser, který vyzařuje spektrum o šířce $< 0,1$ nm. Dva nejvýznamnější lasery tohoto typu jsou DFB (Distributed FeedBack) lasery a FP (Fabry-Perotovy) lasery. V našem případě byl využit DFB laser. U DFB laserů je těsně u aktivní vrstvy naleptána difrakční mřížka, plnící roli optického rezonátoru, tzn., že není potřeba využít odrazy od faset krystalu. Difrakční mřížka navíc působí jako optický filtr, takže zpátky do aktivní oblasti odráží vše, krom jedné vybrané vlnové délky. Průchozí vlnová délka je určena mřížkovou konstantou. Tento typ laserových diod se používá v optických komunikacích [22]. V našem případě byl používán laser CoBrite DX₄. V tabulce č. 3 jsou uvedeny parametry laseru.

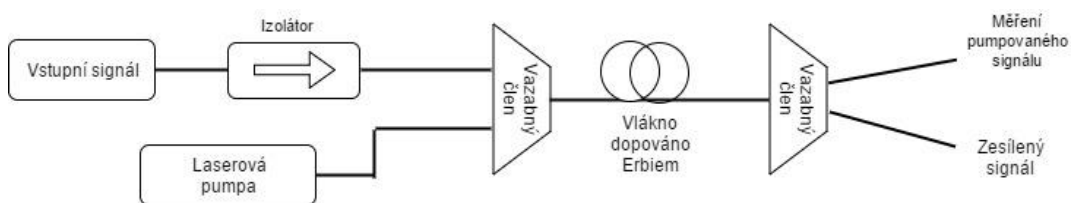
Optický parametr	Spojité laditelný laser (H01)	Jednotka
Frekvenční rozsah	191.3 - 196.25	THz
Kanálové řádkování	kontinuální	
Optický rozsah výkonu;	6 - 15.5	dBm
Spektrální šířka čáry; 3dB	< 100 25kHz typicky	kHz
Frekvenční přesnost po celou dobu životnosti více než 24 hodin	± 1.5 ± 0.3 GHz	GHz
RIN (10MHz to 3 GHz)	< -145 (až k 40 GHz)	dB/Hz
Rozlišení výstupního výkonu	0.01	dB
Optické vlákno	Dodržením polarizace- PANDA type Fiber, PER > 20 dB	

Tabulka 3 Parametry použitého laseru CoBrite DX₄ [23]

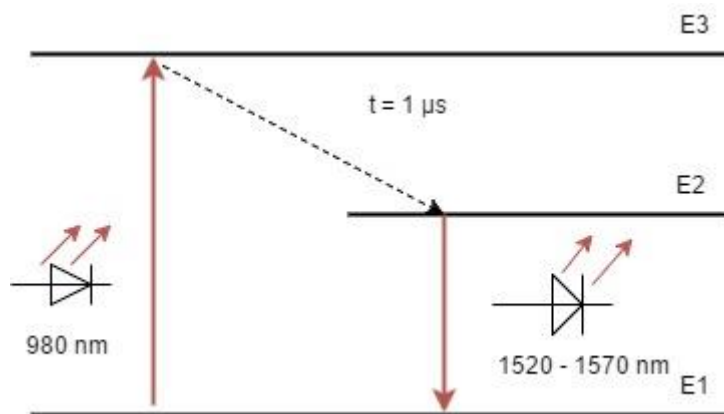
5.3 Optický zesilovač EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier)

Optický zesilovač je zařízení, které přímo zesiluje optický signál bez potřeby předem převádět optický signál na elektrický. Naše zapojení bude pracovat na vlnové délce 1559 nm, tudíž nejvhodnější je zesilovač EDFA. Tento zesilovač v sobě obsahuje desítky metrů optického vlákna, které je dopováno vzácnou zeminou s ionty erbia (Er^{+3}) [24].

Na obrázku č. 19 je zobrazen princip EDFA zesilovače s optickým izolátorem, který slouží k zabránění zpětných odrazů již zesíleného signálu. Optické vlákno dopované ionty erbia Er^{+3} tvoří hlavní část zesilovače. Vlivem načerpání energie (absorpce fotonů) z laserové pumpy (o vlnové délce 980 nm nebo 1480 nm) do erbiem dopovaného vlákna o délce několika desítek metrů, dochází k excitaci atomů dopovaného prvku na vyšší energetické hladiny E3 (980 nm) nebo E2 (1480 nm) viz schéma na obrázku č. 20. V tomto tzv. metastabilním stavu ionty setrvávají velmi krátkou dobu (několik milisekund). Následuje nezářivý přechod na hladinu E2 ve vodivostním pásu. Po dosažení stavu inverze populace, kdy se většina iontů erbia nachází v excitovaném stavu, dochází k uvolnění energie vlivem přítomnosti přenášeného signálu. Následuje návrat excitovaných iontů na základní energetickou hladinu E1 ve valenčním pásu, doprovázenou stimulovanou emisí záření o shodné vlnové délce a fázi s přenášeným signálem. Dochází k zesílení přenášeného optického signálu v oblasti pásma C. Při zesilování je zesílen i šum v zesilovaném pásmu, vlivem procesu spontánní emise (přirozený přechod elektronu na nižší hladinu) [25], [26].



Obrázek 19 Blokové schéma zapojení EDFA zesilovače



Obrázek 20 Excitace iontů Erbium v důsledku čerpání a emise záření na vlnové délce 1550 nm [26]

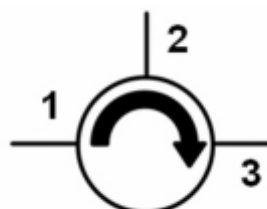
Ke studiu jsem používal zesilovač Keopsys CEFA-C-PB-HP-SM-30-NL0-OM1-8202-FA-FA. Parametry zesilovače jsou uvedeny v tabulce č. 4.

Optická specifikace	CEFA-C-PB-HP						
Režimu provozu	CW						
Polarizace	Náhodná (SM) nebo lineární (PM s PER > 20 dB)			Náhodná (SM) nebo lineární (PM s PER > 17 dB)			
Výstupní výkon [dBm] (-6 dBm vstup)	25	27	30	33	37	40	42
Vlnové délky [nm]	1540 - 1565			1545 - 1565			
Rozsah vstupního výkonu [dBm]	-20 až 0						
Šumové číslo (-6 dBm, 1550 nm vstup)	< 5 dB pro SM < 5.5 dB pro PM		< 5.5 dB pro SM, < 6 dB pro PM		< 6.5 dB pro SM, < 7.5 dB pro PM		

Tabulka 4 Parametry zesilovače CEFA-C-PB-HP-SM-30-NLO-OMI-8202-FA-FA [27]

5.4 Optický cirkulátor

Pokud chceme oddělit optické signály přenášené v opačném směru, poslouží nám k tomu optický cirkulátor. Optický cirkulátor je tří portové zařízení a je navržen tak, že světlo vstupující na jakýkoliv port, vystupuje z následujícího. To znamená, že pokud světlo prochází portem 1, je propuštěno do portu 2, ale pokud se nějaké světlo odrazí zpět do cirkulátoru, port 1 jej zpět již nepropustí a místo toho projde portem 3. Optické cirkulátory nejsou reciproční, což znamená, že změny ve vlastnostech světla procházejícího zařízením, nejsou vráceny, když světlo prochází v opačném směru [24].



Obrázek 21 Schématická značka cirkulátoru [24]

5.5 Vláknová odbočnice (Coupler)

Vláknová odbočnice je jednoduché pasivní zařízení, které nevyžaduje napájení, a je schopno sloučit nebo rozdělit jeden či více signálů do jednoho popř. více vláken. Poměr rozdělení signálů je dáno návrhem, ale může být libovolné. Nejčastější poměry

jsou 50/50 %, 70/30%, 90/10%, 99/1%. Podstata jeho funkce je rozdělení výkonu procházejícího optického signálu dvou výstupů [19].

5.6 Variabilní optický atenuátor - VOA

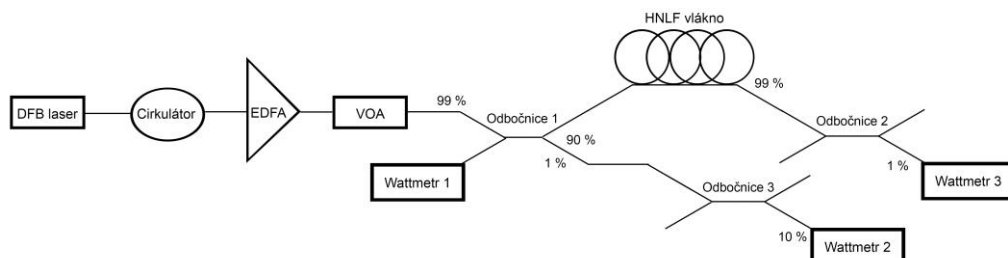
Variabilní optický atenuátor (VOA – Variable Optical Attenuator) je zařízení, které dokáže vkládat volitelný útlum do optické trasy. VOA je obvykle tvořen blokovací součástí, která je mezi vstupem a výstupem a zakrývá tak část optického paprsku, který prochází VOA. Podle toho, kde je její poloha, určujeme velikost útlumu [28]. Při práci jsem použil VOA s ručním ovládním, to má šroubek, kterým se ovládá poloha blokovací součástky. V zapojení jsem použil optický atenuátor Thorlabs M-VA/90007836.

5.7 Měřiče výkonu

Pro měření výkonu byly použity 3 wattmetry. Zpětně odražený výkon a výkon zdroje byly měřené wattmetrem Thorlabs PM20AC. Na měření přenášeného výkonu na výstupu vlákna byl použitý wattmetr Thorlabs PM100D s detektorem S148C.

5.8 Experimentální zapojení pro měření prahového výkonu SBS

Schéma prováděného měření je znázorněno na obrázku č 22. Jako zdroj světla slouží DFB laser, který má laditelný výkon v rozsahu 6 – 16 dBm. Aby se zabránilo optickému odrazu zpátky do laseru, za laserovým zdrojem byl umístěn optický cirkulátor. Cirkulátor v našem případě funguje jako izolátor. Abychom mohli získat větší výkon než 16 dBm, použili jsme EDFA zesilovač. Výstup EDFA zesilovače můžeme ladit v rozsahu 20 až 30 dBm. Variabilní optický atenuátor se používá k ladění výkonu, který vstupuje do vlákna v rozsahu -5 až 20 dBm. Rozsah 20 – 25 dBm jsme pak měřili bez VOA. Důvodem je, že použitý VOA dokáže snést maximální výkon kolem 22 dBm.

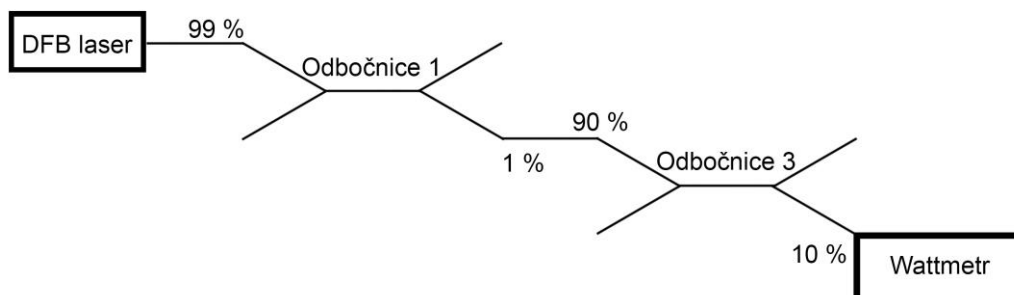


Obrázek 22 Experimentální uspořádání pro měření prahového výkonu SBS ve vlákne

6. Měření stimulovaného Brillouinova rozptylu

6.1 Kalibrace

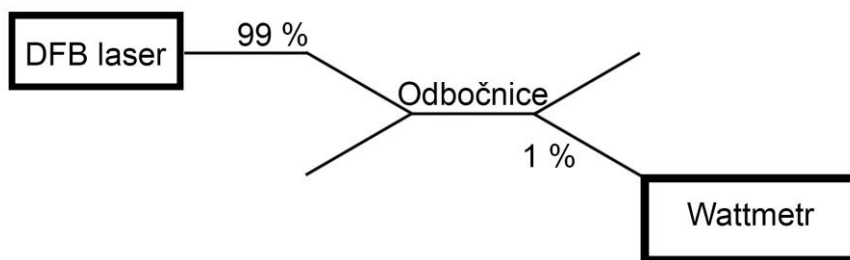
Pro zpřesnění výsledku jsem provedl kalibraci zapojení před měřením. Na obrázku č. 23 je znázorněna kalibrace zapojení, pro odečítání výkonu vstupujícího do vlákna (wattmetr 1), kde jsem použil dvě vláknové odbočnice za sebou. První odbočnice má poměr 99/1 % a druhá 90/10 %. Měřené vlákno je zapojeno na 99% výstup odbočnice 1. Na 10% konci odbočnice 2 bych měl tedy dosáhnout celkového útlumu 30 dB. Experimentálně jsem změřil 6,23 dBm jako výstupní výkon z DFB laseru a měřil jsem výkon na 10% konci odbočnice 2. Hodnota změřená na výstupu byla -24,7 dBm. Z toho vyplývá, že celkový útlum daného zapojení $A = -30,93$ dB. Toto zapojení slouží ke kontrole skutečného vstupního výkonu do měřeného vlákna a zároveň k ochraně wattmetru.



Obrázek 23 Blokové schéma pro kalibraci dvou odbočnic

Na obrázku č. 24 je znázorněna kalibrace výstupního a odraženého výkonu. Pro měření výstupního výkonu jsem použil jednu odbočnici v poměru 99/1 % na výstupu měřeného vlákna a pro měření odraženého výkonu jsem použil odbočnici 1 viz obrázek 23, ale v opačném směru (tedy z měřeného vlákna na 1% výstup).

Princip kalibrace byl stejný, změřil jsem vstupní a výstupní výkon dané odbočnice. Získal jsem celkovou hodnotu útlumu $A = -20,23$ dB pro měření odraženého výkonu a hodnotu $A = 20,21$ dB pro měření výstupního výkonu z měřeného vlákna.



Obrázek 24 Blokové schéma pro kalibraci jedné vláknové odbočnice

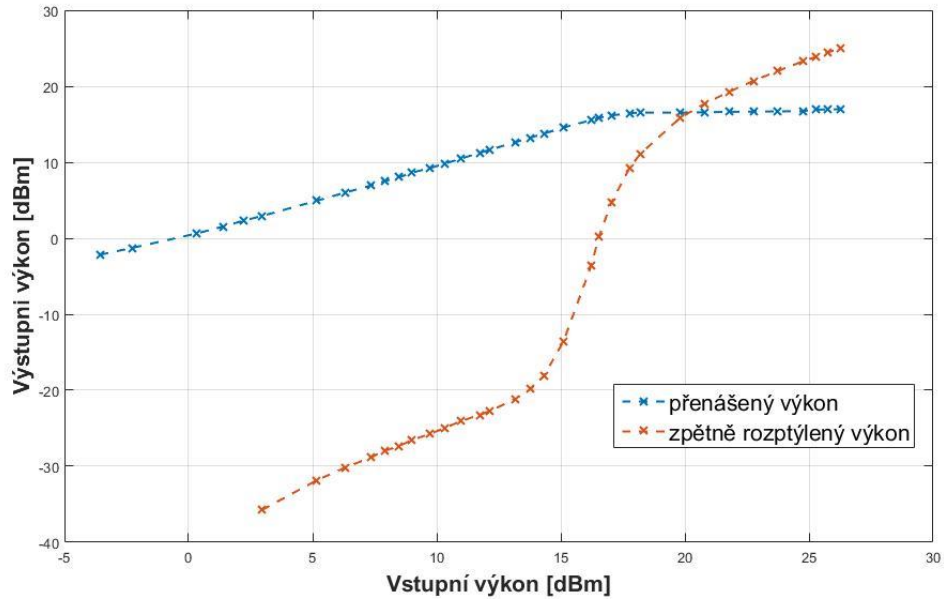
Měřené a teoretické hodnoty celkového útlumu, získané kalibrací jsou uvedeny v tabulce č. 5.

	Coupler 1 - 99/1 %	Coupler 2 - 99/1 %	Coupler 1+3 - 99/1%+90/10 %
Vstupní výkon [dBm]	6,25	6,25	6,23
Výstupní výkon [dBm]	-14	-13,98	-24,7
Teoretický výsledek [dB]	-20 d	-20	-30
Měřený výsledek [dB]	-20,25	-20,23	-30,93

Tabulka 5 Naměřené hodnoty celkového útlumu získané kalibrací

6.2 Výsledky měření SBS

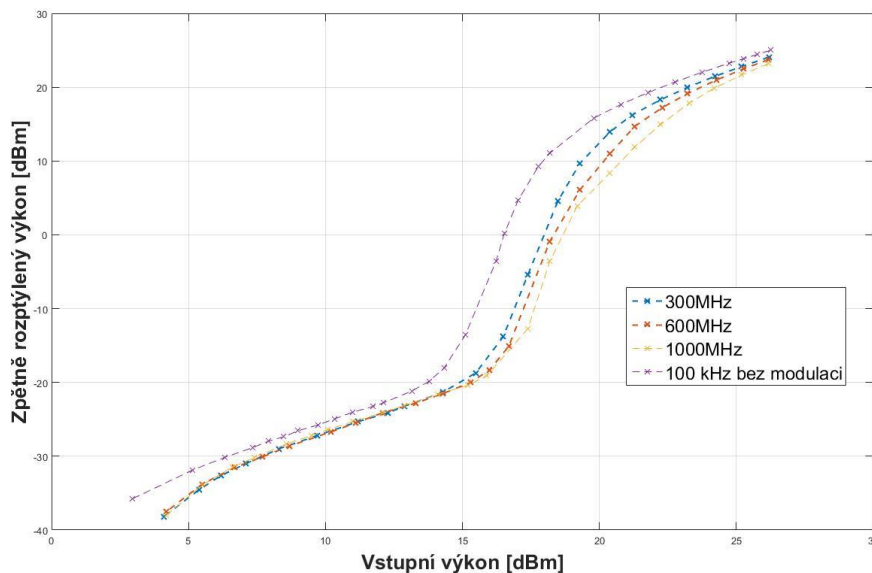
Dle předchozího popisu měření jsem studoval efekt SBS pro různé hodnoty vstupního výkonu. Nejprve jsem měřil SBS efekt bez modulace, na 100 kHz šířky čáry laseru. Na obrázku č. 25 vidíme graf závislosti výstupního výkonu na vstupním výkonu na 100 kHz šířky čáry laseru pro přenášený a zpětně rozptýlený výkon. Z toho můžeme posoudit míru efektu SBS v HNLF vlákne.



Obrázek 25 Měření SBS efektu pro šířku čáry laseru 100 kHz

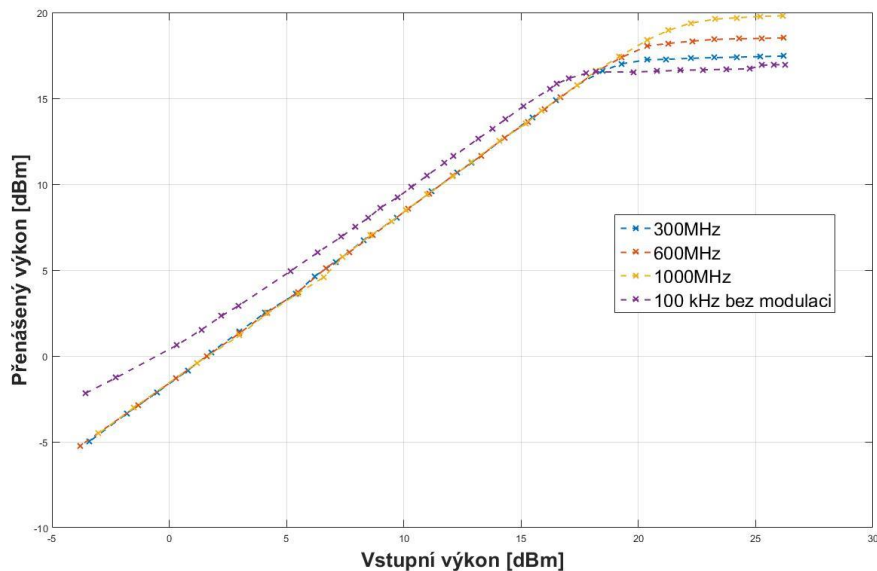
Abychom zvýšili hodnotu prahového výkonu, začali jsme jev SBS potlačovat pomocí modulace laseru. Používali jsme vnitřní modulaci laseru, kde jsme ladili pouze frekvenci modulace. Modulovali jsme šířku čáry laseru pro 300 MHz, 600 MHz a 1000 MHz. Sledoval jsem, jak se změní přenášený výkon a zpětně rozptýlený výkon v závislosti na zvýšení vstupního výkonu.

Na obrázků č. 26 vidíme, jak je závislý zpětně rozptýlený výkon na šířce čáry laseru.



Obrázek 26 Srovnání zpětně rozptýlených výkonů pro různé šířky čáry laseru

Na obrázků č. 27 vidíme, jak SBS omezuje výkon, který můžeme přenášet na optickém vlákně. Z obrázků je patrné, že s laserem který má úzkou šířku čáry nemůžeme přenášet tolik výkonu jako s laserem který má širší šířku čáry. V tabulce č. 6 jsou porovnány maximální přenášené výkony v závislosti na šířce čáry laseru.



Obrázek 27 Závislost přenašeného výkonu na vstupním pro různé šířky čáry laseru

Šířka čáry Laseru	Maximální přenašený výkon
100 kHz	16,9 dBm
300 MHz	17,5 dBm
600 MHz	18,5 dBm
1000 MHz	19,8 dBm

Tabulka 6 Závislost maximálního přenašeného výkonu v závislosti na šířce čáry laseru

6.3 Srovnání teoretické, simulované a měřené hodnoty

V tabulce č. 7 jsou znázorněny simulované, teoretické a měřené prahové hodnoty SBS.

Šířka čáry laseru	100 kHz	300 MHz	600 MHz	1000 MHz
$P_{\text{thSBS_simulace}}$ [dBm]	13,75	23,1	25,7	27,3
$P_{\text{thSBS_vypočten}}$ [dBm]	13,83	23,62	26,4	28,52
$P_{\text{thSBS_měření}}$ [dBm]	20,8	23,8	24,9	26,17

Tabulka7 Srovnané simulované, teoretické a měřené prahové výkony

Z tabulky č. 7 a obrázku č. 26 a 27 je patrné, že se zvýšením šířky čáry optického zdroje, se zvýší i prahový výkon SBS. Výsledky odpovídají teorii. Nejlepší shoda mezi naměřenými a teoretickými hodnotami vychází pro modulaci o frekvenci 300 MHz. Oproti teorii jsem získal hodnotu ze simulací o 0,51 dB menší a z měření 0,18 dB větší. Výsledky ze simulací a z měření odpovídají teorii i pro modulaci na 600 MHz a 1000

MHz, rozdíly v hodnotách jsou v rozmezí 1,22 – 2,35 dB. Nejvíce odlišný výsledek z měření jsem pozoroval na 100 kHz šířky čáry laseru. Může to být způsobeno tím, že nevíme jaká je přesně šířka čáry daného laseru (může být až řádově vyšší, pokud není laser dostatečně stabilní). Hodnota ze simulací a teoreticky vypočtena hodnota pro 100 kHz šířky čáry laseru odpovídá teorii, rozdíl je jenom 0,08 dB.

7. Závěr

Cílem této práce bylo studovat stimulovaný Brillouinův rozptyl jako limitující jev pro přenos v optických vláknech. Prvotně byly v rámci rešerše popsány lineární, ale převážně i nelineární jevy v optickém prostředí.

Ve druhé části práce jsem se teoreticky zabýval SBS efektem a provedl výpočetní a simulační charakterizaci pro různé šířky čáry laseru a pro vysoce nelineární vlákno typu HNLF. Výsledky simulací v prostředí Optiwave OptiSystem odpovídají vypočteným hodnotám a rozdíly jsou v rozmezí 0,2-0,95 dB. Byl pozorován vliv rozšíření šířky čáry laseru na potlačení SBS efektu. Závěrem teoretické části bylo navrženo měřicí zapojení.

Poslední část práce obsahuje experimentální ověření teoretických předpokladů. V této části práce jsou vyhodnocené měřené výsledky stimulovaného Brillouinova rozptylu pro různé šířky čáry laseru a porovnání s výstupy simulačního softwaru a teoreticky vypočítanými hodnotami.

. Měřili jsme vliv modulace na potlačení SBS a z měřených výsledky je patrné, že s potlačením stimulovaného Brillouinova rozptylu můžeme zvýšit maximální přenášený výkon na vláknech a zvýší se i prahový výkon vyvolání SBS efektu. Pomocí frekvenční modulace laseru (od 100 kHz do 1000 MHz) můžeme zvýšit prahový výkon SBS až o 5,4 dB. Podle teoretických výpočtů bychom mohli zvýšit prahový výkon SBS až o 14,7 dB a podle simulace o 13,5 dB, což můžeme považovat za dobrou shodu.

V této práci jsem zkoumal potlačení jevu SBS s využitím vnitřního modulátoru laseru. Pro další studium toho jevu by bylo zajímavé prověřit i hloubku modulace s využitím externího modulátoru.

LITERATURA

- [1] Leoš BOHÁČ, *Měření optických vláken*, České vysoké učení technické v Praze, cit. 20.5.2017
Dostupné: http://data.cedupoint.cz/oppa_e-learning/2_KME/160.pdf
- [2] Martin ŽÁČEK, *Nelineární charakter optického prostředí*, Vysoké Učení Technické v Brně, 2008.
Dostupné:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=7994
- [3] Leoš BOHÁČ, *Optické sítě*, České vysoké učení technické v Praze, cit. 20.5.2017
Dostupný z : http://data.cedupoint.cz/oppa_e-learning/2_KME/161.pdf
- [4] Bc. Dušan ČERVENKA, *Metody řešení vlivu optické disperze na stávajících optických sítích*, Vysoké učení technické v Brně, 2011
Dostupné:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39477
- [5] Ing. Leoš MARŠÁLEK, *Optická vlákna*, Technická univerzita Ostrava, 2006.
Dostupné: <http://goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>
- [6] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. první vydání*. Brno, 2009.
- [7] LÁTAL, Jan, Petr KOUDELKA a František HANÁČEK, *Úvod do distribuovaných optovláknových systémů založených na Ramanově jevu pro měření teplot*, VŠB-TU Ostrava, FEI, 2010.
Dostupné: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cislocianku=2010030001>
- [8] Vladimír ČERVENKA, *Návrh metody pro stanovení významu polarizační vidové disperze*, Vysoké učení technické v Brně, 2007.
Dostupné:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=7691
- [9] Martin KAVICKÝ, *Optický vlnový multiplex*, Vysoké učení technické v Brně, 2007
Dostupné:
https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/17680/Bakalářská%20práce_xkavic02_hlavní.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [10] Karel NOVOTNÝ, Tomáš MARTAN, Jan ŠÍSTEK, *Systémy pro optické komunikace*, České vysoké učení technické v Praze, 2007.
- [11] Martin HÁJEK, *Zkušenosti s měřením polarizační vidové disperze (PMD) jednovidových optických kabelových tras*,
Dostupné : <http://www.mikrokom.eu/cz/pdf/zkusenosti-smerenim.pdf>
- [12] Rongqing HUI, Maurice O'Sullivan : *Fiber Optic Measurement Techniques*, USA, 2009, str.77-85 a 446-473
- [13] Bc. Zoltán VÉGH, *Vzájemná konverze OTDM a WDM systémů*, Vysoké učení technické v Brně, 2014
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=86797

- [14] *Křížová modulace*
Dostupný z:
http://amapro.cz/encyklopedie/digitalni_technika/krizova%20modulace.php
- [15] H. A. Al-Asadi, M. H. Al- Mansoori, S. Hitam, M. I. Saripan, M. A. Mahdil:
Brillouin linewidth characterization in single mode large effective area fiber through Co-Pumped technique, Wireless and Photonics networks research center, Faculty of engineering
Dostupné:
<http://journal.uniten.edu.my/ojs3/index.php/ijecct/article/viewFile/24/13>
- [16] GOVIND P. AGRAWAL :*Nonlinear fiber optics*, Third Edition, The Institute of optics University of Rochester
- [17] Brillouin Scattering, *Encyclopedia of Laser Physics and Technology*
Dostupné: https://www.rp-photonics.com/brillouin_scattering.html
- [18] Fahmida Hossain TITHI, M.S.ISLAM, Md. Tawhidul ANWAR, *Overview of Stimulated Brillouin Scattering Effect and various types of method to eliminate this effect*, International Journal of Computer Applications(0957-8887), April 2014, cit. 20.5.2017
Dostupné:
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.685.8794&rep=rep1&type=pdf>
- [19] Bc. Ondřej HAVLÍŠ: *Pasivní optické sítě WDM-PON*, Vysoké učení technické v Brně, 2012
Dostupné:
<https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/8981/Pasivní%20optické%20sítě%20WDM-PON.pdf?sequence=2>
- [20] *Fiber-Optics Info*,
Dostupné: http://www.fiber-optics.info/articles/dense_wavelength-division_multiplexing
- [21] Jan LÁSKO, *Problematika přenosu optického paprsku optickým vláknem*, Vysoké učení technické v Brně, 2010
Dostupné:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=30109
- [22] Tomáš NOSEK, *Polovodičový laser*, Středoškolská technika, 2013
Dostupné: http://www1.fs.cvut.cz/stretech/2013/sbornik_2013/98.pdf
- [23] *IDPHOTONICS CoBrite DX₄ LASER*, ID Photonics GmbH, Anton-Bruckner-Str.6, 85579 Neubiberg
Dostupné: http://www.id-photonics.com/images/stories/PDF/Data_sheet_CBDX4-x-x-xx.pdf
- [24] Jiří PARDUBA, *Využitý optického vlákna jako senzoru pro lokalizaci mechanického chvění*, Vysoké učení technické v Brně, 2013
Dostupné:
https://www.vutbr.cz/base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=68114

- [25] Zbyněk MLEJNEK: *Optické zesilovače*, Vysoké učení technické v Brně, 2008
Dostupné: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=8652
- [26] Michal LUCKI: *Optické zesilovače*, České Vysoké Učení Technické v Praze
Dostupné: http://data.cedupoint.cz/oppa_e-learning/2_KME/162.pdf
- [27] *CEFA-C-PB-HP series data*
http://www.keopsys.com/wp-content/uploads/PDF/Erbium-Amplifier-Pre-Booster-High-Power_CEFA-C-PB-HP.pdf
- [28] Michael NOVÁK, *Návrh stabilizovaného optického zdroje*, Vysoké učení technické v Brně, 2011
Dostupné: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=42499

Přílohy

Vstupný výkon [dBm]	Přenášený výkon [dBm]	Zpětně rozptýlený výkon [dBm]
-3,57	-2,17	-
-2,27	-1,27	-
0,33	0,63	-
1,38	1,53	-
2,23	2,33	-
2,96	2,93	-35,75
5,16	4,93	-31,85
6,33	6,03	-30,15
7,33	6,93	-28,85
7,93	7,53	-27,95
8,48	8,03	-27,35
9	8,63	-26,05
9,73	9,23	-25,75
10,33	9,83	-24,95
10,98	10,49	-24,05
11,73	11,23	-23,25
12,13	11,63	-22,75
13,16	12,64	-21,15
13,78	13,23	-19,85
14,33	13,78	-18,05
15,11	14,56	-13,55
16,23	15,56	-3,55
16,53	15,85	0,15
17,03	16,16	4,65
17,77	16,45	9,25
18,19	16,54	11,05
19,79	16,53	15,8
20,78	16,58	17,66
21,78	16,63	19,28
22,76	16,66	20,7
23,75	16,69	22,02
24,75	16,72	23,27
25,26	16,93	23,85
25,76	16,95	24,44
26,26	16,97	25,02

Tabulka 8 Měřené hodnoty na 100 kHz šířku čáry laseru

Vstupný výkon [dBm]	Přenášený výkon [dBm]	Zpětně rozptýlený výkon [dBm]
26,19	17,46	24,06
25,19	17,43	22,79
24,21	17,4	21,46
23,22	17,37	19,97
22,23	17,33	18,29
21,19	17,27	16,23
20,39	17,25	13,95
19,29	17,01	9,69
18,49	16,61	4,59
17,39	15,77	-5,41
16,49	14,88	-13,81
15,49	13,9	-18,71
14,29	12,69	-21,31
12,89	11,26	-23,21
12,29	10,67	-24,11
11,19	9,59	-25,31
9,69	8,06	-27,21
8,29	6,74	-29,01
7,09	5,46	-31,01
6,19	4,63	-32,61
5,39	3,6	-34,51
4,09	2,52	-38,21
2,99	1,41	
1,79	0,21	
0,79	-0,84	
-0,51	-2,11	
-1,81	-3,35	
-3,41	-4,99	

Tabulka 9 Měřené hodnoty na 300 MHz šířku čáry laseru

Vstupný výkon [dBm]	Přenašený výkon [dBm]	Zpětně rozptýlený výkon [dBm]
26,18	18,52	23,75
25,27	18,49	22,48
24,29	18,47	21
23,22	18,43	19,14
22,3	18,33	17,24
21,29	18,2	14,69
20,39	18,05	10,99
19,29	17,39	6,09
18,19	16,54	-0,91
16,69	15,06	-15,11
15,99	14,35	-18,31
15,29	13,63	-20,01
14,29	12,71	-21,51
13,29	11,65	-22,81
12,09	10,5	-24,11
11,09	9,46	-25,51
10,19	8,57	-26,71
8,69	7,04	-28,61
7,69	6,05	-30,11
6,69	5,13	-31,51
5,49	3,72	-33,81
4,19	2,54	-37,51
2,99	1,32	
1,59	-0,03	
0,29	-1,3	
-1,31	-2,87	
-3,81	-5,24	
31,79	19,89	

Tabulka 10 Měřené hodnoty na 600 MHz šířku čáry laseru

Vstupný výkon [dBm]	Přenášený výkon [dBm]	Zpětně rozptýlený výkon [dBm]
26,17	19,81	23,2
25,19	19,77	21,65
24,19	19,69	19,85
23,28	19,61	17,83
22,23	19,38	14,93
21,29	18,96	11,89
20,39	18,4	8,39
19,19	17,43	3,89
18,19	16,6	-3,61
17,39	15,76	-12,71
15,89	14,29	-19,11
15,19	13,52	-20,41
14,09	12,52	-21,61
12,89	11,31	-23,11
12,09	10,44	-24,11
10,99	9,39	-25,31
10,09	8,49	-26,41
9,49	7,85	-27,21
8,59	7,03	-28,31
7,39	5,75	-30,21
6,59	4,59	-31,51
5,49	3,64	-33,91
4,19	2,49	-38,01
2,99	1,19	
1,19	-0,41	
-1,51	-3,01	
-3,01	-4,51	

Tabulka 11 Měřené hodnoty na 1000 MHz šířku čáry laseru