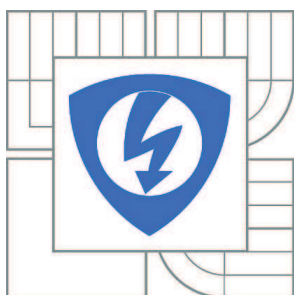


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

OPTICKÉ ZESILOVAČE PRO METROPOLITNÍ A PŘÍSTUPOVÉ SÍTĚ

OPTICAL AMPLIFIERS FOR METROPOLITAN AND ACCESS NETWORKS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

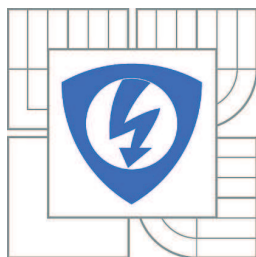
Bc. MARTIN ČECH

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. VLADIMÍR TEJKAL

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Martin Čech

ID: 78023

Ročník: 2

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Optické zesilovače pro metropolitní a přístupové sítě

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce je zhodnocení všech typů dostupných zesilovačů pro optické sítě. Zaměřte se na současné typy optických zesilovačů vhodné pro dálkové sítě s vlnovým multiplexem a také pro přístupové sítě s duplexním provozem. Podrobně popište jejich funkční princip a možnosti umístění v síti. U všech typů zesilovačů uveďte jejich vhodné aplikační oblasti použití. Provedte návrh metropolitní sítě s optickými zesilovači a pomocí vhodného simulačního programu ověřte vhodnost návrhu. V metropolitní síti bude realizován vícekanálový přenos na dlouhé vzdálenosti v řádu desítek kilometrů. Pro návrh vyberte vhodné spektrum vlnových délek přenášených kanálů, vyberte nejvhodnější typ zesilovače a také ověřte nejvhodnější umístění zesilovače v síti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] CONNELLY, M. Semiconductor Optical Amplifiers. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2004. 169s. ISBN 0-7923-7657-9.

[2] FILKA, M. Optoelectronics for telecommunications and informations. Texas: Inc., Publishers, 2009. ISBN 978-0-615-33185-0

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 26.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Vladimír Tejkal

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.

ANOTACE

Úkolem této diplomové práce je popsat a porovnat nejběžnější typy v současnosti využívaných optických zesilovačů. První část se zaměřuje na problematiku optických přenosů a jevů, které způsobují degradaci přenášeného signálu. V této části je také vysvětleno, proč je vhodné nasazení optických zesilovačů. Další část popisuje principy, strukturu a vlastnosti jednotlivých typů zesilovačů. Následuje část, ve které jsou popsány simulace provedené za účelem porovnání výkonnosti systémů s jednotlivými typy zesilovačů. V poslední části je proveden návrh metropolitní optické sítě s vlnovým multiplexem. Na základě simulací z předchozí části jsou v této síti využity nejvhodnější zesilovače umístěné na optimálních pozicích na přenosové trase. V závěru jsou popsány simulace, pomocí kterých je ověřena funkčnost návrhu.

Klíčová slova: optický zesilovač, EDFA, SOA, Ramanovský zesilovač, metropolitní síť, WDM

ABSTRACT

Aim of this Master's thesis is to describe and compare most common types of optical amplifiers used in today's networks. The first section focuses on problematic of optical transmissions and phenomenon which cause degradation of transmitted signal. It is also explained in this section why there is a need to deploy optical amplifiers. Next section describes basic principles, structure and properties of individual types of optical amplifiers. Following section describes simulations which were made to compare the performance of transmission systems with each individual type of optical amplifier. The last section contains a design of optical metropolitan network with wavelength multiplex. Based on simulations from preceding part best amplifier type and optimal amplifier placement was selected. Functionality of the design was tested and simulations described in final section.

Keywords: optical amplifier, EDFA, SOA, Raman amplifier, metropolitan network, WDM

Bibliografická citace:

ČECH, M. *Optické zesilovače pro metropolitní a přístupové sítě*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 69 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Vladimír Tejkal.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Optické zesilovače pro metropolitní a přístupové sítě“ 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 jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Vladimíru Tejkalovi za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování diplomové práce.

V Brně dne

.....

podpis autora

Obsah

| | |
|--|----|
| Seznam obrázků..... | 10 |
| Seznam zkratk..... | 12 |
| Úvod..... | 14 |
| 1 Optické vlákno..... | 16 |
| 1.1 Vlastnosti optických vláken..... | 16 |
| 1.2 Typy optických vláken..... | 17 |
| 1.2.1 Jednovidová optická vlákna..... | 17 |
| 1.2.2 Mnohavidová optická vlákna..... | 17 |
| 2 Útlum optických vláken | 19 |
| 2.1 Absorbce | 19 |
| 2.1.1 Nedokonalosti ve struktuře materiálu..... | 19 |
| 2.1.2 Vlastní absorbce | 19 |
| 2.1.3 Nevlastní absorbce..... | 20 |
| 2.1.4 Rozptyl | 21 |
| 2.2 Ztráty na ohybech | 21 |
| 2.2.1 Ztráty na mikroohybech..... | 21 |
| 2.2.2 Ztráty na makroohybech..... | 21 |
| 3 Základní komponenty sítě | 22 |
| 3.1 Zdroje záření | 22 |
| 3.2 Detektory záření..... | 22 |
| 3.3 Vlákna..... | 23 |
| 3.4 ROADM (Reconfigurable Add-Drop Multiplexer)..... | 23 |
| 4 Optické zesilovače..... | 25 |
| 4.1 Aplikační využití optických zesilovačů | 26 |
| 4.1.1 Výkonový zesilovač | 26 |
| 4.1.2 Předzesilovač | 27 |
| 4.1.3 Průběžný zesilovač | 27 |
| 5 Vlákňové zesilovače | 28 |

| | | |
|-------|--|----|
| 5.1 | Princip zesilování ve vláknových zesilovačích | 28 |
| 5.2 | Struktura vláknového zesilovače | 29 |
| 5.3 | Vlastnosti vláknových zesilovačů..... | 30 |
| 5.3.1 | Zisk | 30 |
| 5.3.2 | Šířka pásma zisku | 31 |
| 5.3.3 | Saturační výkon | 31 |
| 5.3.4 | Saturační charakteristika..... | 31 |
| 5.3.5 | Šumové číslo | 32 |
| 5.3.6 | ASE (Amplified Spontaneous Emission) a šum..... | 32 |
| 6 | Ramanovské zesilovače | 33 |
| 6.1 | Princip zesilování v Ramanovských zesilovačích | 33 |
| 6.2 | Druhy Ramanovských zesilovačů..... | 34 |
| 6.2.1 | DRA (Distributed Raman Amplifier)..... | 34 |
| 6.2.2 | LRA (Lumped Raman Amplifier)..... | 34 |
| 6.3 | Struktura Ramanovského zesilovače | 35 |
| 6.4 | Vlastnosti Ramanovských zesilovačů..... | 35 |
| 7 | Polovodičové optické zesilovače..... | 36 |
| 7.1 | Princip optického zesilování | 36 |
| 7.2 | Struktura polovodičového optického zesilovače | 37 |
| 7.3 | Vlastnosti SOA | 38 |
| 7.3.1 | Zisk | 39 |
| 7.3.2 | Šumové číslo | 39 |
| 7.3.3 | Závislost na polarizaci | 39 |
| 7.4 | Nelineární jevy v SOA..... | 39 |
| 8 | Srovnání zesilovačů..... | 41 |
| 8.1 | Předzesilovač | 42 |
| 8.1.1 | EDFA..... | 42 |
| 8.1.2 | Ramanovský zesilovač | 43 |

| | | |
|-------|---|----|
| 8.1.3 | SOA | 45 |
| 8.2 | Průběžný zesilovač | 46 |
| 8.2.1 | EDFA..... | 47 |
| 8.2.2 | Ramanovský zesilovač | 48 |
| 8.2.3 | SOA | 50 |
| 8.3 | Výkonový zesilovač..... | 51 |
| 8.3.1 | EDFA..... | 52 |
| 8.3.2 | Ramanovský zesilovač | 54 |
| 8.3.3 | SOA | 55 |
| 8.4 | Distribuované vs. koncentrované umístění zesilovačů | 57 |
| 8.4.1 | Koncentrované rozmístění zesilovačů..... | 57 |
| 8.4.2 | Distribuované rozmístění zesilovačů..... | 58 |
| 9 | Návrh metropolitní sítě..... | 60 |
| 9.1 | Volba topologie..... | 60 |
| 9.2 | Ochrana přenosových tras..... | 62 |
| 9.3 | Volba vlnových délek | 62 |
| 9.4 | Umístění zesilovačů..... | 63 |
| 9.5 | Ověření funkčnosti návrhu..... | 65 |
| 9.5.1 | Plně funkční síť | 65 |
| 9.5.2 | Síť s poruchou | 66 |
| | Závěr..... | 67 |
| | Použitá literatura..... | 69 |

Seznam obrázků

| | | |
|------------|--|----|
| Obr. č. 1 | Struktura optického vlákna..... | 17 |
| Obr. č. 2 | Útlumová charakteristika křemíkového vlákna..... | 20 |
| Obr. č. 3 | ROADM druhého stupně..... | 24 |
| Obr. č. 4 | Umístění zesilovačů na přenosové trase..... | 26 |
| Obr. č. 5 | Energetické stavy EDFA | 29 |
| Obr. č. 6 | Zapojení EDFA | 30 |
| Obr. č. 7 | Závislost zisku zesilovače EDFA na vlnové délce..... | 31 |
| Obr. č. 8 | Princip zesilování v Ramanovských zesilovačích..... | 34 |
| Obr. č. 9 | Zapojení Ramanovský zesilovač | 35 |
| Obr. č. 10 | Proces zesilování | 37 |
| Obr. č. 11 | Struktura polovodičového optického zesilovače | 38 |
| Obr. č. 12 | Schéma zapojení při umístění jako předzesilovač..... | 42 |
| Obr. č. 13 | Spektrum signálu a šumu předzesilovače EDFA | 43 |
| Obr. č. 14 | Diagram oka ve scénáři s předzesilovačem EDFA | 43 |
| Obr. č. 15 | Spektrum signálu a šumu Ramanovského předzesilovače | 44 |
| Obr. č. 16 | Diagram oka ve scénáři s Ramanovským předzesilovačem..... | 45 |
| Obr. č. 17 | Spektrum signálu a šumu předzesilovače SOA..... | 46 |
| Obr. č. 18 | Diagram oka ve scénáři s předzesilovačem SOA..... | 46 |
| Obr. č. 19 | Schéma zapojení při umístění jako průběžný zesilovač | 47 |
| Obr. č. 20 | Spektrum signálu a šumu na konci vlákna ve scénáři s průběžným zesilovačem EDFA..... | 48 |
| Obr. č. 21 | Diagram oka ve scénáři s průběžným zesilovačem EDFA..... | 48 |
| Obr. č. 22 | Spektrum signálu a šumu na konci vlákna ve scénáři s Ramanovským průběžným zesilovačem | 49 |
| Obr. č. 23 | Diagram oka ve scénáři s Ramanovským průběžným zesilovačem..... | 50 |
| Obr. č. 24 | Spektrum signálu a šumu na konci vlákna ve scénáři s průběžným zesilovačem SOA | 51 |
| Obr. č. 25 | Schéma zapojení při umístění jako výkonový zesilovač | 52 |
| Obr. č. 26 | Spektrum signálu a šumu na konci vlákna ve scénáři s výkonovým zesilovačem EDFA..... | 53 |
| Obr. č. 27 | Diagram oka ve scénáři s výkonovým zesilovačem EDFA | 53 |

| | |
|---|----|
| Obr. č. 28 Spektrum signálu a šumu na konci vlákna ve scénáři s Ramanovským výkonovým zesilovačem | 54 |
| Obr. č. 29 Diagram oka ve scénáři s Ramanovským výkonovým zesilovačem..... | 55 |
| Obr. č. 30 Spektrum signálu a šumu na konci vlákna ve scénáři s výkonovým zesilovačem SOA | 56 |
| Obr. č. 31 Schéma zapojení pro koncentrované rozmístění zesilovačů | 57 |
| Obr. č. 32 Spektrum signálu a šumu před vstupem do uzlu C | 58 |
| Obr. č. 33 Schéma zapojení pro distribuované rozmístění zesilovačů | 58 |
| Obr. č. 34 Spektrum signálu a šumu po průchodu zesilovačem před uzlem C | 59 |
| Obr. č. 35 Topologie sítě a rozmístění zesilovačů..... | 62 |
| Obr. č. 36 Spektrum signálu a šumu a diagram oka na výstupu uzlu H..... | 65 |
| Obr. č. 37 Spektrum signálu a šumu a diagram oka na výstupu uzlu F | 66 |

Seznam zkratek

| | |
|---------------|--|
| APD | Avalanche Photo Diode |
| ASE | Amplified Spontaneous Emission |
| BER | Bit Error Rate |
| CWDM | Coarse Wavelength Division Multiplex |
| DC | Depressed Cald |
| DFB | Distributed Feedback |
| DRA | Distributed Raman Amplifier |
| DSF | Dispersion Shifted Fiber |
| DWDM | Dense Wavelength Division Multiplex |
| EDFA | Erbium-Doped Fiber Amplifier |
| FP-SOA | Fabry-Perot Semiconductor Optical Amplifier |
| FWM | Four Wave Mixing |
| ITU | International Telecommunication Union |
| LED | Light Emitting Diode |
| LRA | Lumped Raman Amplifier |
| LWP | Low Water Peak |
| MC | Matched Cald |
| NZDF | Non Zero Dispersion Fiber |
| OFA | Optical Fiber Amplifier |
| PIN | Positive Intrinsic Negative |
| PON | Passive Optical Network |
| RFL | Raman Fiber Laser |
| ROADM | Reconfigurable Add Drop Multiplexer |
| RSOA | Reflective SOA |
| SNCP | Subnetwork Connection Protection |
| SNR | Signal to Noise Ratio |
| SOA | Semiconductor Optical Amplifier |
| SRS | Stimulated Raman Scattering |

| | |
|---------------|--|
| TW-SOA | T rawelling- W ave S emiconductor O ptical A mplifier |
| USF | U nshifted F iber |
| UTP | U nshielded T wisted P air |
| VCSE | V ertical- C avity S urface E mitting |
| WDM | W avelength D ivision M ultiplex |
| XGM | C ross G ain M odulation |
| XPM | C ross P hase M odulation |

Úvod

První telekomunikační systémy využívající k přenosu optická vlákna se objevily již kolem roku 1970. Ačkoliv se komplexnost těchto systémů postupem času zvýšila, základní prvky zůstaly stejné. Takovýto systém sestává z optického zdroje, modulátoru signálu, přenosového média a detektoru na výstupním konci vlákna.

Vzdálenost, na kterou může probíhat přenos, je nejvíce limitována ztrátami na vlákně. V dřívějších dobách byly ztráty na vlákně kompenzovány pomocí elektrických regenerátorů. Jak napovídá jejich název, tato složitá a finančně nákladná zařízení signál detekovala, převedla jej na elektrický a ten posléze opravila a s pomocí dalšího laseru odeslala dál. Tento způsob obnovy signálu má řadu nevýhod, a proto se hledalo vhodnější řešení. Tím se staly optické zesilovače. V této práci popíšu a porovnám základní typy optických zesilovačů využívaných v současné době.

V prvních kapitolách této práce se budu zabývat vlastnostmi optických vláken a popíšu jevy, které způsobují ztráty na vlákně a znehodnocují přenášený signál do té míry, že je nutné jej regenerovat. Hlavním faktorem limitujícím maximální dosažitelnou délku přenosové trasy je útlum. Jevy, které se podílejí na výsledné hodnotě útlumu vlákna, jsou podrobněji popsány ve druhé kapitole.

Ve třetí kapitole jsou stručně popsány základní komponenty využívané v optických sítích. Jsou zde popsány základní typy zdrojů a detektorů záření a typy vláken vhodných pro nasazení v systémech s vlnovým multiplexem. Dále je zde popsáno zařízení, které umožňuje v uzlech sítě přidávat, vydělovat a směřovat optické signály.

V další kapitole se již věnuji obecným principům optických zesilovačů. Uvádím, jaké parametry by měl mít ideální optický zesilovač a také jaké základní typy optických zesilovačů se v současné době využívají v telekomunikační technice. Dále jsou zde uvedeny tři základní možnosti aplikačního využití optických zesilovačů a jejich umístění na přenosové trase.

Další kapitola se již podrobně věnuje nejstaršímu a nejrozšířenějšímu typu optických zesilovačů. Tyto zesilovače obsahují vlákna dopovaná příměsemi vzácných zemin. Stručně je zmíněn jejich historický vývoj a popisují princip, na kterém probíhá zesilování signálu. Dále je popsána základní struktura zesilovačů tohoto typu a také jejich vlastnosti.

Následující kapitola je zaměřena na druhý typ vláknových zesilovačů. Je v ní popsán princip zesilování v Ramanovských zesilovačích. Poté jsou popsány dva základní druhy těchto zesilovačů: diskrétní a rozprostřený. Na konci kapitoly je opět popsána struktura a vlastnosti tohoto typu zesilovačů.

V sedmé kapitole se věnuji polovodičovým optickým zesilovačům. Popisují rozdíly oproti vláknovým zesilovačům jak v principu zesilování, tak v jejich struktuře. Dále popisují jejich vlastnosti a nakonec v tabulce uvádím srovnání všech tří typů optických zesilovačů.

V osmé kapitole již prezentuji výsledky simulací, jejichž účelem bylo porovnat výkonnost přenosového systému s jednotlivými typy zesilovačů. Dále je zde provedeno srovnání v závislosti na umístění zesilovače na přenosové trase. Poslední simulace popsaná v této kapitole porovnává výkonnost přenosového systému při zapojení jednoho výkonného nebo dvou méně výkonných zesilovačů.

Poslední kapitola je věnována návrhu metropolitní sítě. Nejprve je zvolena a popsána topologie této sítě. Poté je popsán mechanismus ochrany přenosových cest. Dále je provedena volba vhodných vlnových délek a popsáno rozmístění zesilovačů v síti. V závěru jsou popsány simulace, ve kterých je ověřena funkčnost návrhu. Simulace jsou provedeny jak pro stav bez poruchy, tak pro stav s přerušením vlákna mezi dvěma uzly.

1 Optické vlákno

V současné době jsou nejrozšířenějším médiem pro uskutečňování přenosů v počítačových sítích metalické kabely UTP a STP. Tyto kabely se ale již blíží maximu svých přenosových možností a jsou stále více nahrazovány optickými vlákny.

Optické vlákno je dielektrický vlnovod, který umožňuje šíření světla ve směru své podélné osy. Optická vlákna jsou využívána v optických komunikacích, kde umožňují přenosy na větší vzdálenosti a při vyšších přenosových rychlostech než metalické kabely. Oproti metalickým kabelům dosahují menších ztrát a jsou odolná proti elektromagnetickému rušení.

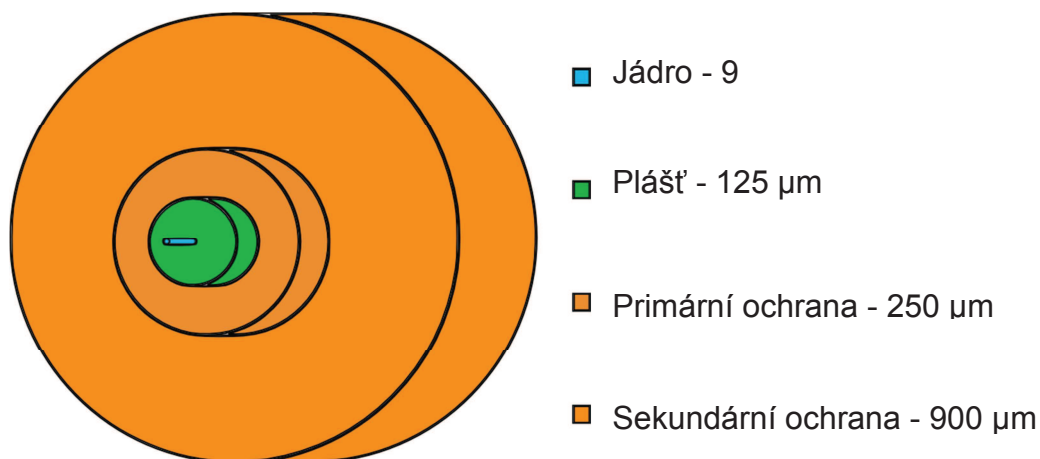
1.1 Vlastnosti optických vláken

Optické vlákno se skládá z průhledného jádra a pláště. Jádro vlákna má nepatrně vyšší index lomu než jeho plášť. Světlo se vláknem šíří díky úplnému odrazu. Paprsek, který dopadá na rozhraní jádra a pláště pod větším než kritickým úhlem, se kompletně odráží zpět do jádra a cestuje dále k přijímači. Vlákny se mohou šířit pouze paprsky, které do něj vstoupily pod správným úhlem. Míru schopnosti vlákna navázat ze svého okolí do svého jádra optický svazek, vyjadřuje numerická apertura. Je definována rovnicí (1.1):

$$NA = n_0 * \sin \Phi_a, \quad (1.1)$$

kde n_0 je index lomu materiálu, ze kterého se svazek navazuje a Φ_a je maximální úhel navázání.

Ke snížení možnosti mechanického poškození vlákna slouží primární ochrana, u některých vláken i ochrana sekundární (viz Obr. č. 1).



Obr. č. 1 Struktura optického vlákna

1.2 Typy optických vláken

Podle jejich konstrukce dělíme optická vlákna do dvou skupin. Na vlákna jednovidová a vlákna mnohavidová. Vlákna mnohavidová se dále dělí na vlákna se skokovou změnou indexu lomu a s gradientní změnou indexu lomu.

1.2.1 Jednovidová optická vlákna

Jak napovídá název, jednovidová optická vlákna přenášejí pouze jeden paprsek světla (vid). Tato vlákna mají velmi malý průměr jádra mezi 8 a 10 μm a průměr pláště 125 μm . Protože se vyznačují velmi malou chromatickou disperzí i útlumem a vysokou přenosovou kapacitou, využívají se především pro dálkové přenosy. Jednovidová vlákna využívaná v telekomunikacích pracují na vlnových délkách 1310 a 1550 nm a jako zdroje vyžadují poměrně drahé lasery. Pro jednovidové vlákno je charakteristická hodnota chromatické disperze 0,3 ns/km a útlum menší než 0,2 dB/km při vlnové délce 1550 nm a šířce pásma 10 GHz [1].

1.2.2 Mnohavidová optická vlákna

Mnohavidová optická vlákna se skokovou změnou indexu lomu mají oproti vláknům jednovidovým mnohonásobně větší průměr jádra. Ten je u vláken využívaných v Evropské unii 50 μm a v USA 62,5 μm . Průměr pláště je nejčastěji 120 μm . Větší velikost jádra usnadňuje navázání paprsků do vlákna a umožňuje použití levnějších zdrojů záření, jako jsou LED diody a VCSE lasery. Mnohavidová vlákna pracují na vlnových délkách 850 a 1300 nm. Délka vláken tohoto typu a jejich přenosová kapacita je limitována silnou vidovou a chromatickou disperzí, a proto nacházejí uplatnění především pro spoje na krátké

vzdálenosti v lokálních sítích. Charakteristická hodnota vidové disperze je 50 ns/km, hodnota měrného útlumu je 5 – 20 dB/km, šířka pásma 60 MHz [1].

U gradientních mnohavidových vláken se index lomu směrem ke krajům jádra postupně snižuje. Světelné paprsky se neodrážejí ostře, ale jsou postupně ohýbány směrem ke středu jádra. Paprsky, které cestují přímo, jsou zpomalovány více než paprsky ohýbané, a proto všechny dorazí k přijímači přibližně ve stejný čas. Tímto způsobem se výrazně redukuje vidová disperze. Tento typ vláken se využívá v telekomunikacích pro spoje na kratší a střední vzdálenosti [1]. Charakteristická hodnota vidové disperze je 1 ns/km a útlum 2,5 až 5 dB/km, šířka pásma 600 MHz.

2 Útlum optických vláken

Útlum ve vláknové optice je pokles intenzity optického signálu vzhledem ke vzdálenosti, kterou urazil v přenosovém médiu. Je způsoben především absorbcí, rozptylem a ztrátami v ohybech. Útlum signálu je definován jako poměr mezi výkonem záření vstupujícího do vlákna ze zdroje záření a výkonem záření, které na konci optické trasy dorazí na detektor. Tento poměr je vyjádřen rovnicí (2.1):

$$A = \left(\frac{10}{L}\right) \log_{10} \left(\frac{P_i}{P_0}\right). \text{ [dB/km]} \quad (2.1)$$

Útlum signálu je logaritmickou závislostí. Délka L je vyjádřena v kilometrech, a proto je jednotka měrného útlumu dB/km. Jak již bylo zmíněno, útlum je způsoben především absorbcí, rozptylem a ztrátami v ohybech. Ke ztrátám výkonu dochází také na spojích optických vláken a na konektorech [5].

2.1 Absorbce

Absorbce je hlavní příčinou ztrát v optických vláknech. Je to část útlumu pocházející z přeměny optického výkonu na jiné formy energie, např. teplo. Velikost absorbce v optických vláknech je ovlivněna několika faktory:

- nedokonalostmi ve struktuře materiálu vlákna,
- vlastní absorbcí,
- nevlastní absorbcí.

2.1.1 Nedokonalosti ve struktuře materiálu

Nedokonalosti ve struktuře materiálu vlákna jako jsou chybějící molekuly a defekty způsobené molekulami kyslíku. Absorbci také způsobuje pronikání molekul vodíku do skleněných vláken [5].

2.1.2 Vlastní absorbce

Vlastní absorbce je dána samotnými vlastnostmi materiálu vlákna. Pokud by se podařilo vyrobit vlákno bez jakýchkoliv nečistot, veškerá absorbce by byla vlastní. Vlastní absorbce určuje minimální hodnotu absorbce. Právě díky malým hodnotám vlastní absorbce

na vlnových délkách využívaných při přenosu, je pro výrobu vláken používáno převážně křemenné sklo.

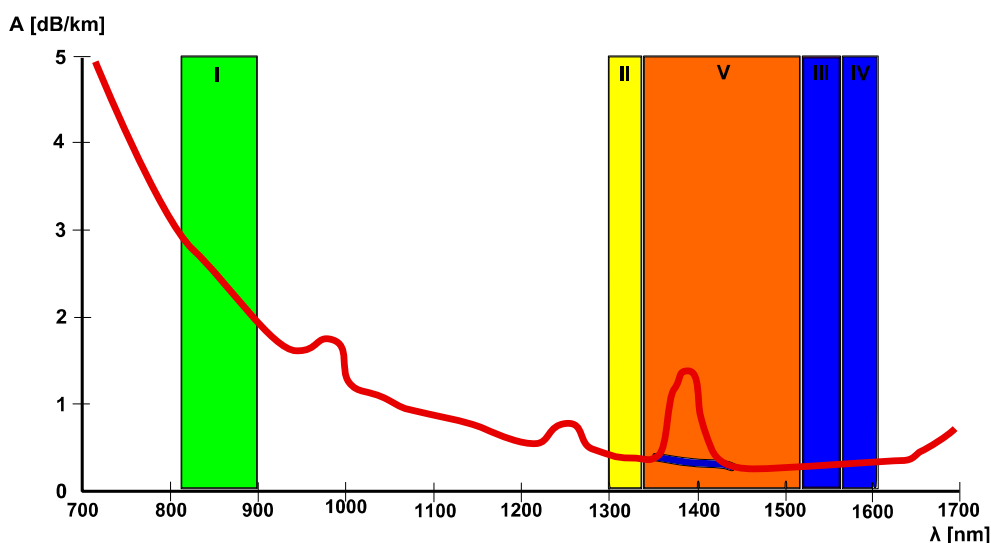
K vlastní absorpci v ultrafialové oblasti dochází, když foton interaguje s elektronem a vybudí ho na vyšší energetickou úroveň. Hlavní příčinou absorpce v infračervené oblasti je rezonance atomových vazeb. V křemenném skle jsou to vazby křemíku a kyslíku. Vzájemné působení mezi vibrující vazbou a elektromagnetickým polem optického signálu způsobuje, že se energie z elektromagnetického pole přesune do vazby [5].

2.1.3 Nevlastní absorbce

Nevlastní absorbce je způsobena nečistotami zanesenými do materiálu vlákna. Během výroby se do materiálu dostávají ionty železa, niklu a chromu. Přesuny těchto iontů z jednoho energetického stavu do jiného způsobují absorpci.

Pokud jsou do vlákna zaneseny ionty OH^- , voda přítomná v křemenném skle vytváří vazby Si-OH. Rezonanční frekvence OH iontů je 2700 nm a leží mimo pásmo využívané pro přenos. Další harmonické nacházející se na 1380 nm, 1250 nm a 940 nm již v tomto pásmu leží a zdatelně zvyšují absorpci.

Na útlumové charakteristice křemíkového optického vlákna (Obr. č. 2) je vidět několik míst s vysokou hodnotou útlumu. Mezi nimi se nacházejí oblasti nazývané okna. V optických komunikacích jsou pro přenos využívány vlnové délky nacházející se právě v těchto oblastech [5].



Obr. č. 2 Útlumová charakteristika křemíkového vlákna

Červená křivka znázorňuje charakteristiku standardního vlákna, modrá znázorňuje charakteristiku vlákna s potlačeným útlumem v oblasti 1380 nm.

2.1.4 Rozptyl

Během výroby vznikají v optickém vlákne oblasti s vyšší a nižší hustotou molekul. Světlo procházející vláknem s těmito oblastmi je částečně rozptýleno do všech směrů.

V komerčních vláknech pracujících na vlnových délkách v rozmezí 700 až 1600 nm je hlavním zdrojem ztrát Rayleighův rozptyl. K tomu dochází, když je velikost změny hustoty několikanásobně menší než vlnová délka procházejícího světla. Ztráty způsobené Rayleighovým rozptylem jsou nepřímo úměrné čtvrté mocnině vlnové délky. Se zvyšující se vlnovou délkou velikost ztrát klesá [5].

2.2 Ztráty na ohybech

Ke ztrátám dochází také při ohýbání optických vláken, kdy se část energie šířícího se paprsku vyzáří ven z jádra. Ztráty na ohybech se dělí podle poloměru ohybu na ztráty na makroohybech a na mikroohybech.

2.2.1 Ztráty na mikroohybech

Ztráty mikroohyby jsou způsobeny malými nespojitostmi a nedokonalostmi ve vlákne. Mikroohyb je velmi malý ohyb osy vlákna. Může vzniknout při výrobě nebo nesprávným postupem při ukládání kabelů. Mikroohyb způsobuje také působení vnějších sil, které deformují plášť vlákna. Mikroohyby mění dráhu, kterou se šíří světelné paprsky [5].

2.2.2 Ztráty na makroohybech

Makroohyby jsou ohyby, jejichž poloměr je několikanásobně větší než průměr jádra. Pokud je poloměr ohybu menší než několik centimetrů, je takové místo velkým zdrojem ztrát. Paprsky šířící se vláknem už nemusí být schopny odrazu zpět do vlnovodu a část jejich energie je vyzářena z vlákna ven. Citlivost vláken na ohyby se dá snížit zvýšením indexu lomu jádra vlákna [5].

3 Základní komponenty sítě

Základními komponentami systémů WDM (Wavelength Division Multiplex) jsou zdroje záření, detektory záření a optická vlákna. V případě, že se nejedná o dvoubodový spoj, je potřeba v jednotlivých uzlech nasadit zařízení umožňující směrování, přidávání a vydělování jednotlivých kanálů.

3.1 Zdroje záření

Výběr vhodného zdroje záření je při návrhu systému velmi důležitý, protože se může jednat o jeden z nejnákladnějších prvků. Charakteristiky zdroje záření většinou výrazným způsobem ovlivňují výslednou výkonnost systému. Zdroj záření použitý v přenosových systémech by měl mít malé rozměry, měl by být monochromatický, stabilní a měl by mít dlouhou životnost.

V optických přenosových systémech se využívají dva základní typy zdrojů záření. Jsou to LED a laserové diody a polovodičové lasery. LED diody jsou relativně pomalá zařízení vhodná pro použití při přenosových rychlostech menších než 1 Gb/s. vykazují velkou šířku spektra a produkují poměrně široký kužel světla. Díky své nízké ceně se uplatňují v komunikaci po mnohavidových vláknech [6].

Na druhou stranu polovodičové lasery jsou díky svým vlastnostem zvláště vhodné pro využití s jednovidovým vláknem. V přenosových systémech se využívají dva typy polovodičových laserů, monolitický laser Fabry-Perot a DFB (Distributed Feedback) laser. Druhý typ je obzvláště vhodný pro systémy WDM. Produkuje téměř monochromatické světlo, je schopen dosahovat velkých rychlostí, je velmi lineární a pracuje v pásmu vlnových délek srovnatelných se zesilovačem EDFA.

3.2 Detektory záření

Detektor záření je dalším z prvků ovlivňujících výkonnost systému. Pro dosažení požadované výkonnosti je zapotřebí, aby detektor splňoval několik základních požadavků. Měl by vykazovat vysokou citlivost v širokém pásmu vlnových délek využívaných pro přenosy a co nejnižší šumovou charakteristiku. Dále by měl mít velmi malou citlivost na změny teplot, nízkou cenu a dlouhou životnost. Poslední důležitou vlastností detektoru záření

je jeho dynamický rozsah. Dynamický rozsah udává minimální a maximální úroveň signálu, kterou je schopen detekovat.

V současnosti se nejvíce využívají dva druhy detektorů záření, PIN (Positive-Intrinsic-Negative) a lavinová fotodioda (APD). PIN fotodiody mají výhodu především v nízké ceně a vyšší spolehlivosti zatímco APD diody vykazují vyšší citlivost a přesnost. Kromě vyšší ceny mají diody APD nevýhodu ve vyšších proudových nárocích a tepelné citlivosti [6].

3.3 Vlákna

Optická vlákna se rozdělují především podle charakteristik chromatické disperze a hodnoty útlumu. Chromatická disperze je jev, kdy se jednotlivé spektrální složky záření šíří vláknem různou rychlostí a tím dochází k rozšíření přenášených pulzů. Velikost tohoto rozšíření je závislá především na délce optické trasy a na koeficientu chromatické disperze. Ten udává, o kolik ps se rozšíří pulz po průchodu jedním km optického vlákna při spektrální šířce zdroje záření 1 nm [1]. Pro nasazení v systému s WDM se nabízejí dva typy vláken.

Prvním typem je vlákno definované standardem ITU-T G.652. Toto je konvenční, disperzně neposunuté vlákno (USF - Unshifted Fiber). Vyznačuje se standardní disperzní charakteristikou. Je vhodné pro využití na vlnové délce 1310 nm, kde je hodnota chromatické disperze blízká nule. Na 1550 nm vykazuje hodnoty kolem 17 ps/nm.km.

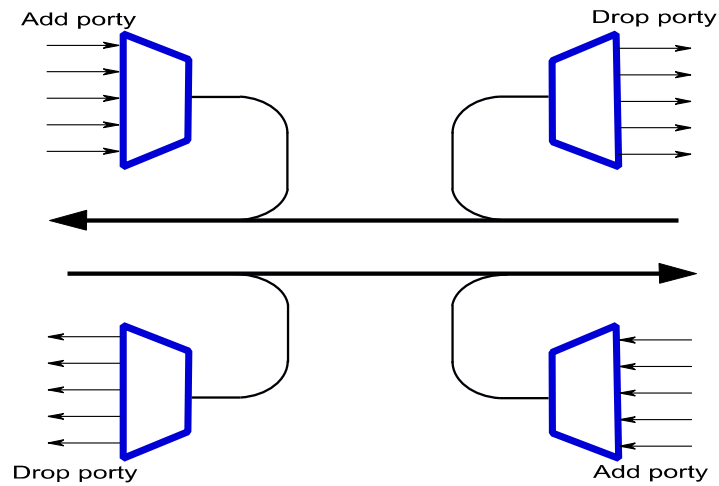
Druhým typem je vlákno definované standardem ITU-T G.655. Na rozdíl od disperzně posunutých vláken, mají vlákna s nenulovou chromatickou disperzí (NZDF - Non Zero Dispersion Fiber) hodnotu disperze v pásmu okolo vlnové délky 1550 nm nenulovou. Omezení dosahu spoje je daní za potlačení křížové modulace a čtyřvlenného směšování. Vlákno je velmi vhodné k provozu DWDM. V doporučení ITU-T G.655 jsou specifikována vlákna pro pásma C a L a v doporučení ITU-T G.656 pro pásma S, C a L.

3.4 ROADM (Reconfigurable Add-Drop Multiplexer)

Rekonfigurovatelný optický add drop multiplexer je zařízení, které v systémech WDM umožňuje směrování optických signálů, jejich přidávání a odebírání. Hlavní výhodou tohoto zařízení je to, že umožňuje vzdálenou správu. Z toho důvodu není nutné při nasazování

systému nastavovat kompletní směrovací plán, ale je možné provádět konfiguraci až ve chvíli, kdy je to potřeba. Současná zařízení navíc obsahují proměnný optický attenuátor, který využívají k vyrovnávání výkonových úrovní signálů v jednotlivých kanálech.

Vzájemným propojením dvou ROADM přes jeden z add-drop portů vznikne ROADM druhého řádu. Takovéto zařízení (Obr. č. 3) již umožňuje vytvoření uzlu schopného směřovat signály ve dvou směrech.



Obr. č. 3 ROADM druhého stupně

4 Optické zesilovače

Přenosové vlastnosti optického vlákna jsou limitovány dvěma faktory. Jsou to útlum a disperze. Útlum vede k poklesu výkonu signálu, což je limitujícím faktorem pro délku přenosu. Disperze způsobuje rozšíření optického pulsu, a tím limituje šířku pásma vlákna. Protože útlum a disperze roste s délkou optického vlákna, je v určitém bodě na optické trase nutné přenášený signál regenerovat.

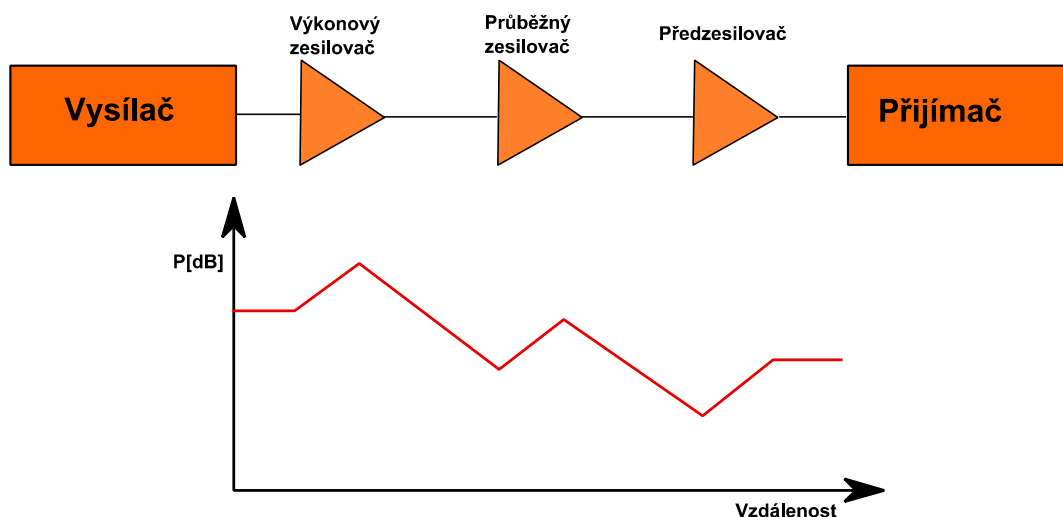
Metoda 3R (reshaping, retiming, retransmission) regenerace zahrnuje detekci (konverze foton-elektron), elektrické zesílení, přečasování, obnovu tvaru pulsu a retransmisi (konverze elektron-foton). Tato metoda má několik nevýhod. Za prvé zahrnuje přerušování optické linky, a tudíž není opticky transparentní. Za druhé je proces regenerace závislý na formátu signálové modulace a přenosové rychlosti, a proto není elektricky transparentní. Za třetí vzhledem k tomu, že regenerátory jsou složitá zařízení často situovaná v obtížně dostupných lokacích, např. podmořské linky, je snížena spolehlivost sítě. V systémech, kde je limitujícím faktorem ztráta na vlákně, je vhodné nasazení průběžných optických zesilovačů, místo regenerátorů. Zesilovače totiž plní pouze jednu funkci (zesílení optického signálu), jsou proto mnohem spolehlivějším a také levnějším řešením.

Ideální optický zesilovač by měl být plně kompatibilní s jednojádřovým vláknem, dodávat vysoký zisk a být opticky transparentní (nezávislý na vlastnostech vstupního signálu). Navíc mohou být optické zesilovače využity jako výkonové zesilovače nebo předzesilovače [2].

Existuje několik typů optických zesilovačů. Prvním typem jsou vláknové optické zesilovače (OFA - Optical Fiber Amplifier), dalším typem jsou polovodičové optické zesilovače (SOA - Semiconductor Optical Amplifier). Nejrozšířenějším typem jsou zesilovače z první skupiny, ale v současnosti je také zvýšený zájem o využívání SOA v optických sítích a zařízeních zpracovávajících optické signály.

4.1 Aplikační využití optických zesilovačů

Základní využití optických zesilovačů v optických komunikačních systémech může být trojího druhu. Umístění zesilovačů na přenosové trase je vidět na obrázku (Obr. č. 4). Při zapojení jako výkonový zesilovač zesiluje výkon vysílače. Ztráty na vláknech a při přenosu kompenzuje průběžný zesilovač a citlivost přijímače zlepšuje předzesilovač.



Obr. č. 4 Umístění zesilovačů na přenosové trase

4.1.1 Výkonový zesilovač

Úkolem výkonového zesilovače je zesílit signál před jeho přenosem. Toto zesílení umožňuje výstavbu středně dlouhých linek se zvýšeným dosahem. Tyto linky sestávají pouze z vláken mezi vysílačem a přijímačem. Protože neobsahují žádný aktivní prvek, jsou tyto linky velmi spolehlivé. Na dlouhých linkách snižují výkonové zesilovače počet potřebných průběžných zesilovačů nebo regenerátorů signálu. Dále se využívají pro kompenzaci ztrát při dělení v distribuovaných optických sítích. Výkonových zesilovačů je také zapotřebí, když je nutné současně zesílit několik vstupních signálů různých vlnových délek, například v případě systému WDM.

Vzhledem k tomu, že výkon signálu vstupujícího do zesilovače je většinou vysoký, musí mít zesilovač vysokou hodnotu saturačního výkonu. To umožňuje dosáhnout na výstupu zesilovače velmi vysokých výkonů a zároveň redukuje efekt saturace zisku. Vysoká hodnota saturačního výkonu také snižuje přeslechy mezi jednotlivými kanály WDM.

4.1.2 Předzesilovač

Úkolem optického předzesilovače je zvýšení úrovně signálu před vstupem na přijímač popř. demodulátor. Zvýšení úrovně signálu může výrazně zvýšit citlivost přijímače, a tím umožnit výstavbu delších linek bez opakovačů. Použitím předzesilovače lze dosáhnout zlepšení SNR (Signal to Noise Ratio) detektoru. U těchto zesilovačů se předpokládá nízká hodnota šumového čísla a velký zisk.

4.1.3 Průběžný zesilovač

Průběžný zesilovač se v optických komunikačních systémech využívá ke snížení ztrát na vlákne. Hlavními výhodami průběžných zesilovačů jsou nezávislost na druhu modulace a přenosové rychlosti a schopnost nasazení s WDM. V případě polovodičových zesilovačů je to také obousměrnost provozu, nízká spotřeba energie a kompaktní rozměry. Žádoucími vlastnostmi průběžných zesilovačů je velký zisk a velký saturační výkon.

5 Vláknové zesilovače

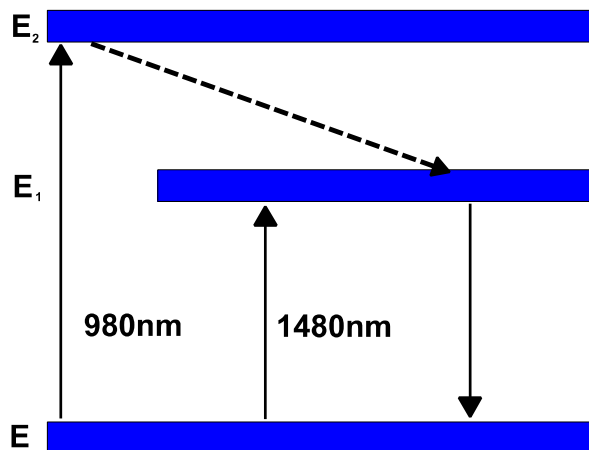
Optické vláknové zesilovače vynalezl roku 1964 E. Snitzer, kdy předvedl neodýmiem dopovaný optický zesilovač pracující na 1.06 μm . Vláknó mělo délku kolem jednoho metru a bylo omotáno kolem výbojky, která stimulovala ionty neodýmia [3].

Nejdůležitějším typem těchto zesilovačů je erbiem dotovaný vláknový zesilovač (EDFA - Erbium Doped Fiber Amplifier), který byl vynalezen v roce 1985. Jeho vynález vedl k revoluci v optických komunikacích, protože umožnil nahrazení 3R regenerátorů na linkách limitovaných útlumem vlákna, a tím pádem umožnil vytváření opticky transparentních sítí. EDFA se stal optickým zesilovačem pro dálkové, vícekanálové digitální a analogové aplikace na 1550 nm. Neodýmiem dopovaný vláknový zesilovač se využívá pro oblast 1330 nm. Vláknové zesilovače jsou zvláště přitažlivé, protože nabízejí vysoký zisk, nízké šumové číslo a netrpí nelineárními jevy, ale vyžadují externí čerpací laser [3].

5.1 Princip zesilování ve vláknových zesilovačích

U tohoto typu zesilovačů je médium, v němž dochází k zesilování, optické vlákno dotované ionty jednoho z prvků vzácných zemin (erbiem, praseodymium, ytterbium, neodýmium, thulium). Koncentrace těchto dopantů je relativně malá a pohybuje se v řádech několika stovek atomů na milion molekul základního materiálu.

Čerpacím zdrojem pro erbiem dotovaná vlákna je nejčastěji polovodičový laser pracující na 980 nebo 1480 nm. Energie dodávaná laserem na 980 nm povýší elektrony atomů Erbía do hladiny E_2 . V této hladině setrvávají elektrony pouze krátkou dobu a poté nezářivým přechodem sestoupí na hladinu E_1 . Při využití čerpacího zdroje s vlnovou délkou 1480 nm jsou elektrony přesunuty přímo na metastabilní hladinu E_1 . V této hladině setrvávají elektrony přibližně 10 ms. Poté stimulovaně nebo spontánně přejdou na základní hladinu a uvolní foton (viz Obr. č. 5). V případě, že stimulovaná emise převládá nad emisí spontánní, jinými slovy, počet elektronů je v metastabilní poloze větší než počet elektronů v základní poloze, dochází k zesílení optického signálu [3].



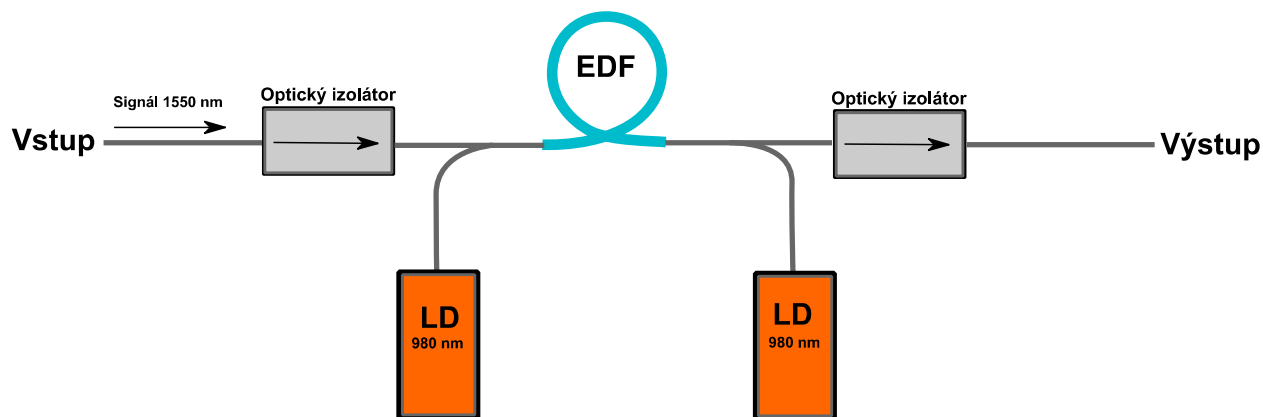
Obr. č. 5 Energetické stavy EDFA

5.2 Struktura vláknového zesilovače

Typické uspořádání jednoduchého EDFA je vidět na obrázku (Obr. č. 6). Základem je erbiem dopované optické vlákno, ve většině případů jednovidové. Do tohoto aktivního vlákna je čerpáno světlo dvěma laserovými diodami (obousměrné čerpání). Jednosměrné čerpání je také velmi běžné. Čerpané světlo má nejčastěji vlnovou délku 980 nm nebo 1450 nm a umožňuje díky stimulované emisi zesilovat světlo z oblasti vlnových délek kolem 1550 nm. Výhodou laserů s vlnovou délkou 980 nm je to, že dosahuje velmi malého šumu. Lasery s vlnovou délkou 1450 nm oproti tomu oplývají vysokými výstupními výkony a jsou cenově dostupnější [3].

Součástí zesilovače je dále dvojice optických izolátorů připojených z každé strany vlákna. Izolátor na vstupu zesilovače zabraňuje záření vzniklému při spontánní emisi, aby narušovalo předchozí fáze zesilování. Izolátor na výstupu zabraňuje vysílání laserových paprsků a možnému poškození v případě, že je výstupní paprsek odražen zpět do zesilovače.

Kromě těchto základních prvků se v EDFA mohou nacházet další prvky zlepšující jeho činnost. Mohou zde být fotodetektory monitorující úroveň výkonu, kontrolní elektronika pro čerpací laserové diody nebo filtry upravující spektrum zisku.



Obr. č. 6 Zapojení EDFA

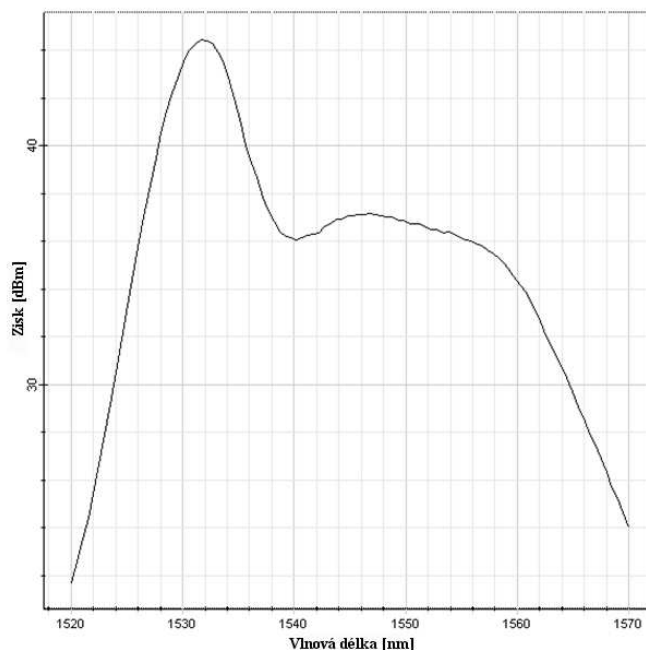
5.3 Vlastnosti vláknových zesilovačů

5.3.1 Zisk

Díky velké délce vlákna ve vláknových zesilovačích, můžeme i při mírném čerpacím výkonu dosahovat vysokého zisku v řádu desítek dB. Zisk roste s délkou vlákna až do určité maximální vzdálenosti. Po překročení této vzdálenosti začíná zisk klesat, protože je signál tlumen vláknem. To je způsobeno zeslabením záření z čerpacího laseru, které již není schopné uvést vlákno do stavu populační inverze. Dosažitelný zisk je většinou limitován hodnotou ASE (Amplified Spontaneous emission). Velikost šumu závisí na velikosti zisku a velikosti výkonu čerpacího zdroje.

Spektrum zisku u vláknových zesilovačů není rovnoměrné. Po průchodu několika zesilovači mohou rozdíly mezi úrovněmi jednotlivých signálů činit i několik dB. Zejména pro použití se systémy WDM je potřeba, aby se zisky jednotlivých kanálů od sebe příliš nelišily. Toho se dosahuje zapojením filtrů, které selektivně zeslabují signály s vysokým ziskem, a tím zplošťují celé spektrum [3].

Tvar spektra zisku pro zesilovač s erbiem dotovaným vláknem je vidět na obrázku (Obr. č. 7). V oblasti kolem 1535 nm vykazuje nedopované vlákno značné ztráty, ale v případě velkého vybuzení také vysoký zisk. S rostoucí vlnovou délkou je k dosažení zisku zapotřebí menší excitační energie, ale hodnota maximálního dosažitelného zisku je také menší. Maximální zisk se dosahuje typicky v oblasti 1530-1560 nm s výraznou špičkou na 1530 nm.



Obr. č. 7 Závislost zisku zesilovače EDFA na vlnové délce

5.3.2 Šířka pásma zisku

Šířka pásma zisku je definována jako souhrn vlnových délek, na kterých je hodnota zisku větší nebo rovna polovině jeho maximální hodnoty. V optických komunikacích jsou preferovány zesilovače s relativně širokým pásmem a pokud možno konstantním ziskem v celé jeho šířce.

5.3.3 Saturační výkon

Saturační výkon je definován jako výstupní výkon, pro který hodnota zisku zesilovače klesne o 3 dB oproti nesaturované hodnotě. Původ saturace zisku leží ve snižování populační inverze stimulovanou emisí záření, kterou vyvolává procházející signál. Po dosažení určitého výkonu hodnota zisku klesá. Hodnota saturačního výkonu je důležitá při použití zesilovače jako boosteru (výkonového), kdy je žádoucí zesilovač s vysokým saturačním výkonem.

5.3.4 Saturační charakteristika

V případě saturace zisku je chování vláknových zesilovačů velmi odlišné od těch polovodičových. Díky relativně malému příčnému řezu je saturační energie poměrně velká. V důsledku toho může být ve vláknovém zesilovači uloženo velké množství energie, která může být později uvolněna jedním krátkým pulsem. V případě pulsů s energií vyšší než je hodnota saturační energie, může docházet k jejich zkreslení [3].

5.3.5 Šumové číslo

Všechny optické zesilovače zhoršují hodnotu SNR (Signal to Noise Ratio) zesíleného signálu, protože k němu při procesu zesilování přidávají také fotony s náhodnou fází a polarizací uvolněné při spontánní emisi. Velikost šumového čísla je také závislá na provozní vlnové délce, provozním proudu a výkonu vstupního signálu.

5.3.6 ASE (Amplified Spontaneous Emission) a šum

Dosažitelná hodnota zisku u vláknových zesilovačů není většinou limitována výkonem čerpacího laseru ale hodnotou ASE. ASE vzniká, když je do prostředí čerpána energie k dosažení populační inverze. Zesílená spontánní emise je vlastně světlo uvolněné při spontánní emisi a posléze opticky zesílené procesem stimulované emise záření. Protože vláknové zesilovače zesilují obousměrně, rozeznáváme také dopředný a zpětný ASE šum. Velikost tohoto šumu závisí na velikosti zisku a velikosti výkonu čerpacího zdroje [3].

6 Ramanovské zesilovače

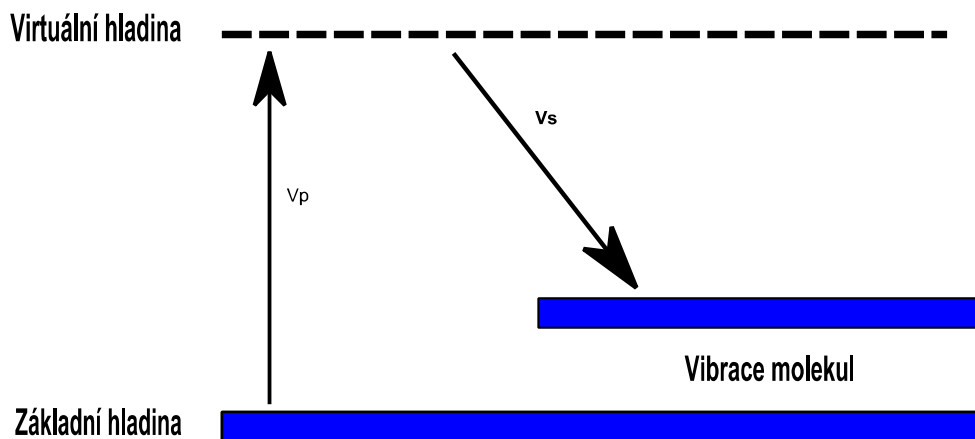
Ramanovský zesilovač je zesilovač založený na principu Ramanova zisku, který je důsledkem stimulovaného Ramanova rozptylu. Aktivním médiem v těchto zesilovačích je většinou optické vlákno, v některých případech jím může být krystal. Vstupní signál je zesilován při průchodu ve směru nebo proti směru šíření paprsku z čerpacího laseru. Pro křemíková vlákna se největšího zisku dosahuje při rozdílu kmitočtu 10-15 THz mezi zesilovaným a čerpaným signálem [4].

Optická vlákna využívaná v Ramanovských zesilovačích jsou obyčejná vlákna a na rozdíl od EDFA nejsou dopována ionty vzácných zemin. Z toho důvodu se pro zesilování mohou využít i vlastní přenosová vlákna. Existují také speciální vlákna, dopovaná např. Germaniem, ve kterých se dosahuje vyšších zisků. Tato vlákna se využívají v situacích, kdy je potřeba dosáhnout zesílení na kratším vlákně.

6.1 Princip zesilování v Ramanovských zesilovačích

Během procesu Ramanova rozptylu je světlo dopadající na prostředí přeměněno na světlo s nižší frekvencí. Foton z čerpacího zdroje vybudí molekulu materiálu na virtuální hladinu (Obr. č. 8). Tato molekula velmi rychle spadne na nižší hladinu a při tom uvolní signálový foton. Rozdíl energií mezi čerpacím a signálovým fotonem je rozptýlen vibracemi molekul hostitelského materiálu. Úroveň těchto vibrací ovlivňuje frekvenční posuv a tvar křivky Ramanova zisku [4].

Při dostatečně vysokém výkonu čerpacího zdroje se rozptyl rychle zvětšuje a většina čerpané energie je přeměňována na rozptýlené světlo. Tento proces se nazývá SRS (Stimulated Raman Scattering) a je to mechanismus produkující zisk v Ramanovských zesilovačích.



Obr. č. 8 Princip zesilování v Ramanovských zesilovačích

6.2 Druhy Ramanovských zesilovačů

Podle uspořádání zesilovače a jeho umístění v přenosovém systému dělíme Ramanovské zesilovače na dva druhy. Pokud je vlákno, ve kterém dochází k zesílení signálu, zároveň vláknem využívaným k přenosu, je takto uspořádaný zesilovač nazýván jako rozprostřený. Pokud je umístěn jako samostatný blok na straně vysílače nebo přijímače, je označován jako diskretní [4].

6.2.1 DRA (Distributed Raman Amplifier)

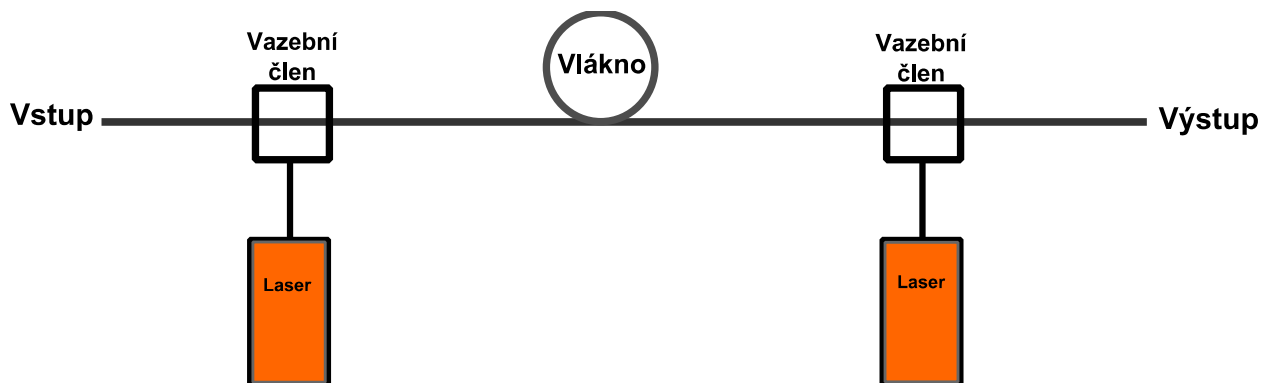
V rozprostřeném Ramanovském zesilovači dochází k vyrovnávání ztrát v každém místě po celé délce přenosové trasy. Hlavní výhodou rozprostřeného zesilování je to, že hodnota SNR neklesá tak rychle jako v případě systémů s diskretním zesilovačem. Zlepšení hodnoty šumového čísla může být využito pro prodloužení úseků mezi opakovači a prodloužení přenosové trasy. Typický DRA využívá vlákna o délce přesahující 40 km.

6.2.2 LRA (Lumped Raman Amplifier)

Diskretní Ramanovský zesilovač je zařízení umístěné v jednom bodě na přenosové trase. Jeho konstrukce a vlastnosti jsou přizpůsobeny požadované šířce pásma. Využívá se především pro zvětšení přenosové kapacity vlákna. Délka vlákna v tomto typu zesilovače je přibližně 5 km.

6.3 Struktura Ramanovského zesilovače

Důležitým prvkem pro Ramanovské zesilování je čerpací zdroj s poměrně vysokým výkonem. Pro vlnové délky z oblasti 1500 až 1600 nm je potřeba zdroj s vlnovou délkou okolo 1400 nm. Čerpacím zdrojem Ramanovského zesilovače může být polovodičová laserová dioda nebo RFL (Raman Fibre Laser). Na obrázku (Obr. č. 9) je vidět uspořádání zesilovače s obousměrným čerpáním.



Obr. č. 9 Zapojení Ramanovský zesilovač

6.4 Vlastnosti Ramanovských zesilovačů

Ramanovské zesilovače se využívají v telekomunikacích a soupeří hlavně s EDFA zesilovači. Jejich typickou vlastností je schopnost provozu na různých vlnových délkách v závislosti na čerpacím zdroji záření. Spektrum zisku může být upraveno použitím několika čerpacích vlnových délek zároveň. Oproti dopovaným zesilovačům je potřeba delší vlákno, ale pro zesilování lze využít i vlastní přenosové vlákno. Mohou dosahovat nižších hodnot šumu. Ramanův zisk je závislý na polarizaci [4].

Výkon moderních Ramanovských zesilovačů je limitován několika základními faktory. Spontánní Ramanův rozptyl je velmi podobný spontánní emisi záření. Přidává se k zesílenému signálu a vzhledem k náhodné fázi spontánně generovaných fotonů se projevuje jako šum. Velikost tohoto šumu závisí na koncentraci fononů ve vibrujícím stavu a tato koncentrace je ovlivněna teplotou zesilovače.

Dalším významným limitujícím faktorem, především v DRA zesilovačích, je mnohonásobný rozptyl. Přestože většina rozptýleného světla unikne z vlákna ven, část je odrazena zpět a může se navázat do jádra. Za normálních okolností by se mohl tento zpětně se šířící šum zanedbat, ale v případě DRA je postupně zesilován a může způsobovat přeslechy.

7 Polovodičové optické zesilovače

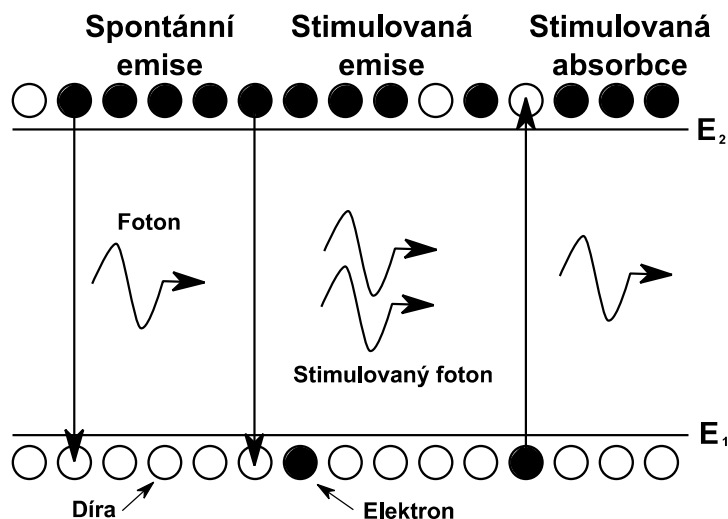
První studie na téma polovodičových optických zesilovačů byly prováděny v době vynálezu polovodičového laseru v 60. letech. První zařízení byla založena na GaAs homopřechodech operujících při nízkých teplotách. Příchod zařízení využívajících dvojitých heterostruktur, popohnal vývoj SOA v oblasti optických komunikačních systémů. V 70. a 80. letech proběhly další pokroky v návrhu a výrobě SOA. Prvotní studie se zaměřovaly na AlGaAs SOA operující v pásmu 830 nm. V pozdějších letech se objevily studie na InP/InGaAsP SOA navržených pro provoz v oblastech 1300 nm a 1550 nm. V roce 1989 se začaly vyrábět SOA s více symetrickým vlnovodem. Tím bylo dosaženo mnohem menší citlivosti na polarizaci. Od té doby vývoj a návrh SOA pokračuje ruku v ruce s pokroky ve výrobě polovodičových materiálů, konstrukcí zařízení, technologií antireflexních povrchů a fotonických integrovaných obvodů. Nyní jsou dostupná spolehlivá a cenou konkurenceschopná zařízení, schopná nasazení v komerčních systémech optických komunikací [2].

7.1 Princip optického zesilování

V SOA jsou elektrony (častěji označovány jako nosiče) z vnějšího zdroje proudu vstříkovány na aktivní prostředí. Tyto nosiče zaujímají energetické stavy ve vodivostním pásmu materiálu aktivního prostředí a zanechávají díry v pásmu valenčním. V polovodičích mohou nastat tři vyzařující mechanismy (viz Obr. č. 10).

Při stimulované absorpci může dopadající foton o dostatečné energii stimulovat nosič z valenčního do vodivostního pásu. Toto je považováno za ztrátový proces, jelikož je dopadající foton uhašen.

Pokud foton o dostatečné energii dopadne na polovodič, může způsobit stimulovanou rekombinaci nosiče z vodivostního pásu a díry z valenčního. Rekombinující nosič uvolní svoji energii ve formě fotonu. Tento nový foton je ve všech aspektech (fáze, frekvence, směr) shodný s původním fotonem. Oba dva fotony mohou dále stimulovat další přechody. Pokud je vstříkovaný proud dostatečně velký, dochází k populační inverzi, kdy je počet nosičů ve vodivostním páse větší než ve valenčním. V takovém případě je pravděpodobnost stimulované emise větší než stimulované absorpce a polovodič bude produkovat optický zisk [2].

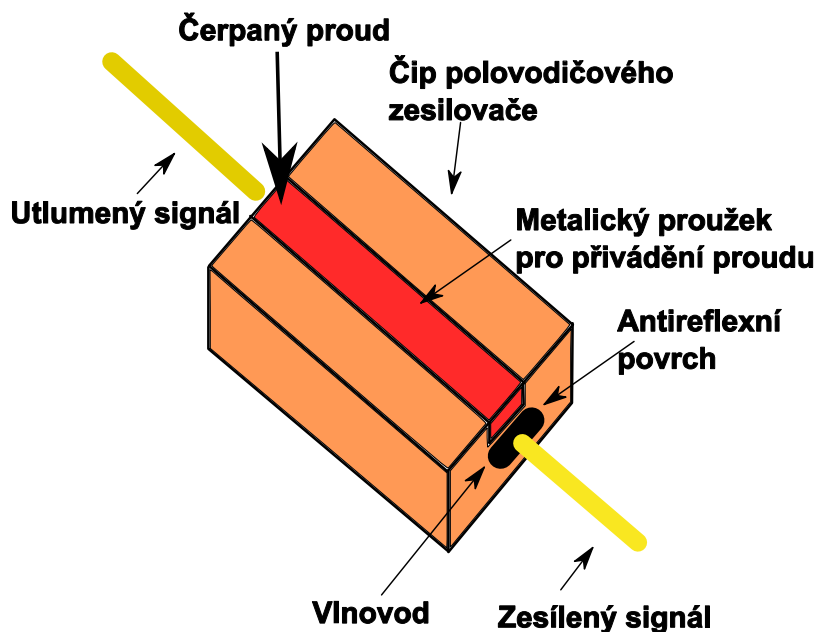


Obr. č. 10 Proces zesilování

Při procesu spontánní emise dochází k rekombinaci nosičů samovolně a jsou uvolňovány fotony s náhodnou fází a směrem šíření. Tyto fotony jsou v podstatě šum a snižují počet nosičů dostupných pro tvorbu optického zisku. Spontánní emise je přímým následkem procesu zesílení a nejde se jí vyhnout, z toho důvodu není možné vytvořit bezšumový SOA. Stimulované procesy jsou úměrné intenzitě budícího záření a spontánní procesy jsou na něm nezávislé.

7.2 Struktura polovodičového optického zesilovače

Struktura polovodičového zesilovače (Obr. č. 9) je velmi podobná struktuře polovodičového laseru. Aktivní oblast v zařízení zesiluje vstupní signál. Externí zdroj elektrického proudu dodává energii pro zesílení. Vložený vlnovod je využit pro usměrnění šířící se vlny do aktivní oblasti. Nicméně optické usměrnění není úplné, a proto se část signálu prosákne do pláště. Výstupní signál je doplněn šumem, který se nazývá ASE (Amplified Spontaneous Emission). Tento přidaný šum vzniká během samotného procesu zesílení a není možné se jej zbavit kompletně. Oba konce zesilovače (plošky) jsou opatřeny antireflexní úpravou, aby docházelo k co nejmenším nechtěným odrazům uvnitř zesilovače. Tím se zásadně liší od laserů, u kterých odrazy od koncových plošek napomáhají zvýšení intenzity světla v polovodiči [2].



Obr. č. 11 Struktura polovodičového optického zesilovače

SOA mohou být rozděleny na dva základní typy. FP-SOA (Fabry-Perot SOA), kde odrazy z koncové plochy jsou významné (např. když signál prochází zesilovačem několikrát) a TW-SOA (travelling-wave SOA), kde jsou tyto odrazy zanedbatelné (signál prochází zesilovačem pouze jednou). K výrobě SOA s odrazivostí koncových ploch menší než 10^{-5} se využívá antireflexních povrchových úprav. TW-SOA je mnohem méně citlivý na kolísání řídicího proudu, teplotu a polarizaci signálu, než FP-SOA [2]. Zvláštním typem polovodičového zesilovače je RSOA (Reflective SOA). Tento zesilovač se skládá z koncové plošky s velmi vysokou odrazivostí, zkrouceného vlnovodu a koncové plošky s velmi nízkou odrazivostí. Využívá se v sítích PON (Passive Optical Network) a vyznačuje se menší citlivostí na polarizaci a menším šumovým číslem než klasické polovodičové zesilovače.

7.3 Vlastnosti SOA

Díky svým vlastnostem jsou polovodičové optické zesilovače vhodné pro velkou řadu využití jako je zpracování signálů, tvarování a obnova pulsů, optické směrování, vyrovnávání disperze nebo konverze vlnových délek v systémech WDM. Vlastnosti SOA popisuje pět základních parametrů:

- zisk,
- šířka pásma zisku,
- saturační výkon,

- šumové číslo,
- závislost na polarizaci.

7.3.1 Zisk

SOA by měl mít co možná nejvyšší zisk vhodný pro svou oblast využití. Optický zisk nezávisí pouze na kmitočtu (nebo vlnové délce) přicházejícího signálu ale také na intenzitě lokálního paprsku v každém bodě zesilovače. Optický zisk po jednom průchodu zesilovačem je definován rovnicí (7.1) :

$$G_S = e^{\Gamma \left[g_0 \left(\frac{\eta_i I \tau_s}{e L w d} N_0 \right) - \alpha \right] L}, \quad (7.1)$$

kde Γ je činitel optického usměrnění, g_0 je koeficient zisku, α je optické ztráty, L je délka dutiny, w je šířka dutiny, d je tloušťka aktivního prostředí, e je elektrický náboj, η_i je účinnost čerpaného proudu, I je proud, N_0 je hustota nosičů a τ_s je doba spontánní rekombinace nosičů.

Z rovnice vyplývá, že zvýšení zisku lze dosáhnout zvýšením čerpacího proudu, vysokým optickým usměrněním nebo prodloužením dutiny [2]. U dnešních polovodičových zesilovačů může šířka pásma zisku dosahovat 80 nm.

7.3.2 Šumové číslo

Polovodičové zesilovače mají stejnou teoretickou hodnotu přidaného šumu jako EDFA, ve skutečnosti ale produkují šumu více. To je způsobeno především díky vnitřním ztrátám a větším ztrátám ve spoji na vstupu.

7.3.3 Závislost na polarizaci

Nežádoucí vlastností polovodičových zesilovačů je jejich citlivost na polarizaci vstupního signálu. V optických komunikačních systémech nelze stav polarizace předem určit, protože se během šíření mění. Díky tomu je velikost zisku závislá na stavu polarizace příchozího paprsku. Speciální postupy při návrhu a výrobě polovodičových zesilovačů snižují hodnotu citlivosti na polarizaci na méně než 1dB.

7.4 Nelineární jevy v SOA

Nelineární jevy u polovodičových zesilovačů jsou způsobeny zejména změnami v hustotě nosičů zapříčiněnými vstupním signálem. Tři hlavní nelineární jevy jsou: křížová

fázová modulace (XPM), křížová modulace zisku (XGM) a čtyřvlnné směšování (FWM). Na druhou stranu se tyto nelineární jevy dají využít pro rozšíření funkčnosti polovodičových zesilovačů. Tyto zesilovače potom mohou v optické síti plnit funkci převodníku vlnových délek, multiplexoru nebo optického přepínače.

V tabulce (Tab.1) jsou uvedeny základní parametry všech tří skupin optických zesilovačů.

| | SOA | EDFA | Raman |
|-------------------------|-----------|-----------|----------------------|
| Zisk [dB] | > 30 | > 40 | > 25 |
| Vlnová délka [nm] | 1280-1650 | 1530-1560 | 1280-1650 |
| Šířka pásma (3dB) | 60 | 30-60 | závisí na zdroji |
| Max. saturace [dBm] | 18 | 22 | 0,75 x čerpací zdroj |
| Citlivost na polarizaci | ano | ne | ano |
| Šumové číslo [dB] | 8 | 5 | 5 |
| Čerpací výkon | < 400 mA | 25 dBm | > 30 dBm |
| Cena | nízká | střední | vysoká |

Tab.1 Srovnání vlastností optických zesilovačů

8 Srovnání zesilovačů

V digitálních přenosových systémech je nejzákladnějším měřítkem výkonnosti systému hodnota bitové chybovosti (BER). Tedy pravděpodobnost výskytu špatně přeneseného bitu. Optické přenosové systémy by měly dosahovat bitové chybovosti v rozmezí 10^{-9} až 10^{-12} [11].

V simulacích byla zvolena základní síť bez zesilovače s přenosovou rychlostí $2,5 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$. Přenosový systém využíval 8 kanálů WDM v rozmezí 1546,9 nm až 1552,5 nm s rozestupem 100 GHz. Výstupní výkon zdrojů signálu ve všech kanálech byl nastaven na 0 dBm. Všechny signály byly přivedeny do multiplexoru, na který bylo připojeno jednovidové vlákno definované standardem ITU-T G.655. Toto vlákno má v oblasti vlnové délky 1550 nm nízkou hodnotu chromatické disperze, z toho důvodu není nutné využívat kompenzátorů chromatické disperze. Hodnota měrného útlumu tohoto vlákna je na vlnové délce 1550 nm rovna $0,2 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$. Na druhém konci vlákna byl připojen demultiplexor, za kterým následovaly detektory signálu v podobě PIN fotodiod. Požadované bitové chybovosti 10^{-12} , bylo při zapojení bez zesilovače dosaženo s vláknem délky 101 km.

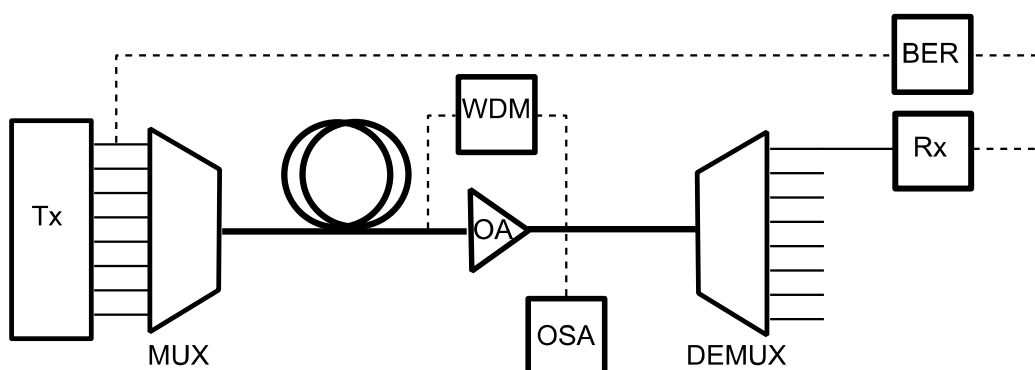
Následovaly simulace se zapojením zesilovače postupně jako předzesilovač, průběžný zesilovač a výkonový zesilovač. Ve všech zapojeních byly provedeny simulace pro vláknový zesilovač EDFA, Ramanovský zesilovač i polovodičový zesilovač.

Zesilovač EDFA využitý v simulacích obsahoval vlákno dlouhé 5 m a zpětný čerpací zdroj s výkonem 100 mW. Ramanovský zesilovač obsahoval laser s výkonem 1100 mW, který čerpal do vlákna světlo s vlnovou délkou 1454,6 nm. Posledním zesilovačem využitým v simulacích byl širokopásmový Travelling-Wave polovodičový zesilovač. Velikost injekčního proudu tohoto zesilovače byla 0,13 A.

8.1 Předzesilovač

První simulace proběhly se zesilovačem zapojeným jako předzesilovač. Schéma zapojení je vidět na obrázku (Obr. č. 12). Schéma zapojení při umístění jako předzesilovač).

V tomto scénáři jsou všechny signály z jednotlivých vysílačů (Tx) přivedeny na multiplexor (MUX). Z multiplexoru putuje signál přes standardní jednovidové vlákno do optického zesilovače (OA) a přes demultiplexor (DEMUX) k přijímači (Rx). Na spektrálním analyzátoru (OSA) je zobrazeno spektrum signálu po průchodu zesilovačem, analyzátor bitové chybovosti (BER) zobrazuje diagram oka a bitovou chybovost změřenou na přijímači a dvouportový WDM analyzátor (WDM) měří úroveň signálu a šumu v jednotlivých kanálech na vstupu a výstupu zesilovače. První simulace byla provedena se zesilovačem EDFA. Postupně se zvětšovala délka vlákna, dokud hodnota bitové chybovosti nedosáhla požadovaných 10^{-12} .



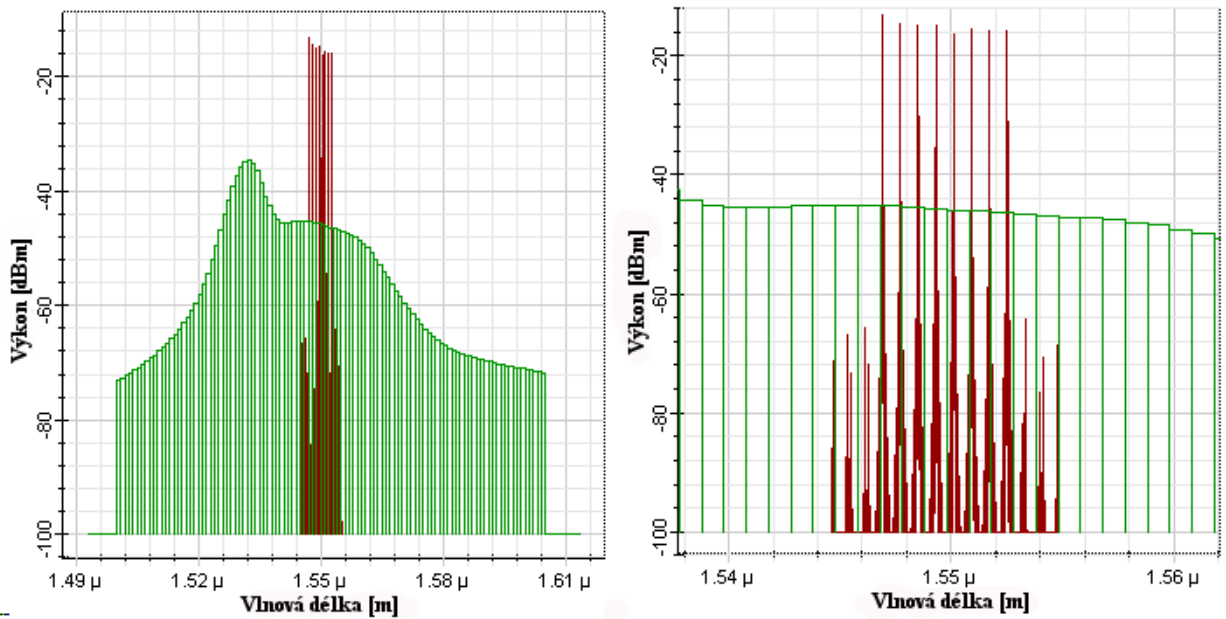
Obr. č. 12 Schéma zapojení při umístění jako předzesilovač

8.1.1 EDFA

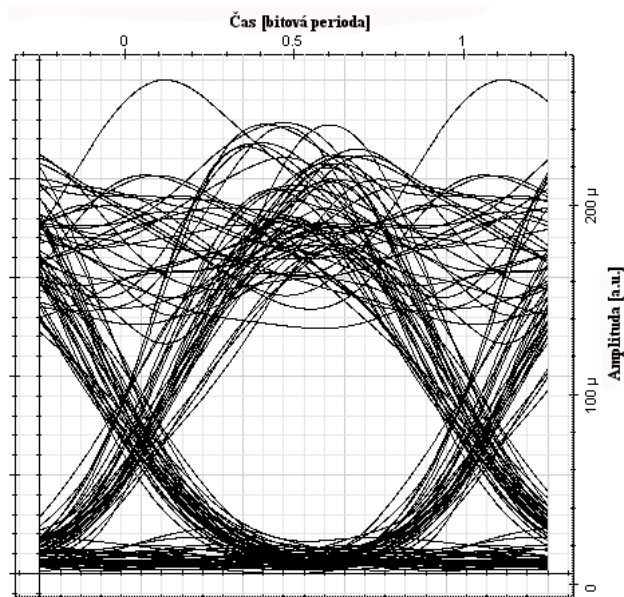
Ve scénáři s předzesilovačem EDFA byla požadovaná bitová chybovost 10^{-12} dosažena při délce vlákna 215 km. Úroveň signálu prvního kanálu vstupujícího do zesilovače byla $-51,27$ dBm a hodnota OSNR činila 48,73 dB. Rozdíl úrovní signálů v jednotlivých kanálech nepřesáhl 0,2 dB. Zesilovač dodal signálu zisk 35,41 dB.

Po průchodu zesilovačem byla naměřená úroveň signálu v prvním kanálu $-15,86$ dBm a hodnota výstupní OSNR byla 30,49 dB. Rozdíl úrovně signálu mezi jednotlivými kanály dosáhl 3,8 dB. Bitová chybovost naměřená na přijímači byla $5,979 \cdot 10^{-12}$. Spektrum signálu

a přidaného šumu po průchodu zesilovačem je vidět na obrázku 13 (Obr. č. 13) a diagram oka na obrázku 14 (Obr. č. 14).



Obr. č. 13 Spektrum signálu a šumu předzesilovače EDFA



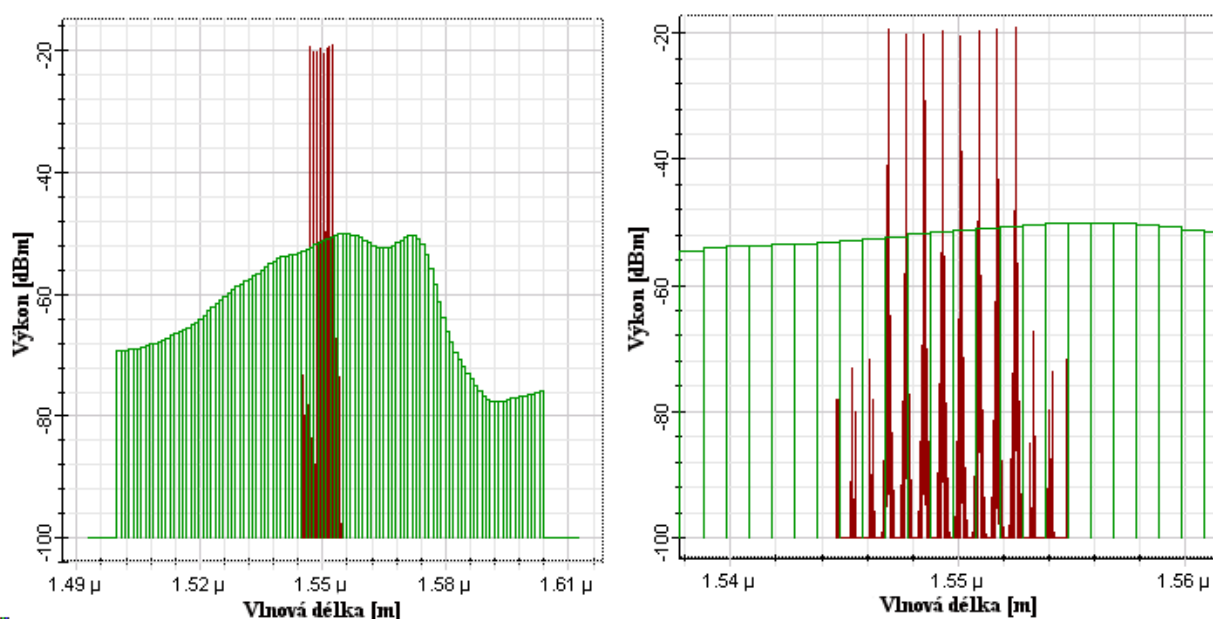
Obr. č. 14 Diagram oka ve scénáři s předzesilovačem EDFA

8.1.2 Ramanovský zesilovač

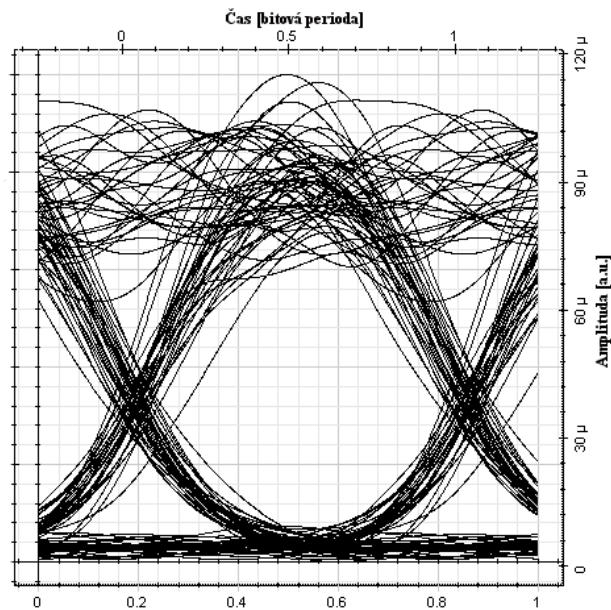
Pro simulaci s Ramanovským předzesilovačem byla délka vlákna nastavena na 195 km, což spolu s 20 km vlákna v samotném zesilovači odpovídá délce vlákna použitého v předcházející simulaci.

Úroveň signálu prvního kanálu vstupujícího do zesilovače byla $-47,27$ dBm a odstup signálu od šumu byl $52,72$ dB. Rozdíl úrovní signálů jednotlivých kanálů byl maximálně $0,6$ dB. Zesilovač dodal signálu zisk $28,19$ dB.

Po průchodu signálu zesilovačem byla úroveň signálu v prvním kanálu rovna $-19,07$ dBm a hodnota OSNR činila $31,52$ dB. Rozdíl úrovní signálů jednotlivých kanálů dosáhl $2,2$ dB. Bitová chybovost naměřená na přijímači byla $6,004 \cdot 10^{-17}$. Požadovanou bitovou chybovost dosáhnul systém po prodloužení vlákna o $3,8$ km na celkovou délku přenosové trasy $198,8$ km. Spektrum zisku a přidaného šumu po průchodu zesilovačem je vidět na obrázku 15 (Obr. č. 15) a diagram oka na obrázku 16 (Obr. č. 16).



Obr. č. 15 Spektrum signálu a šumu Ramanovského předzesilovače

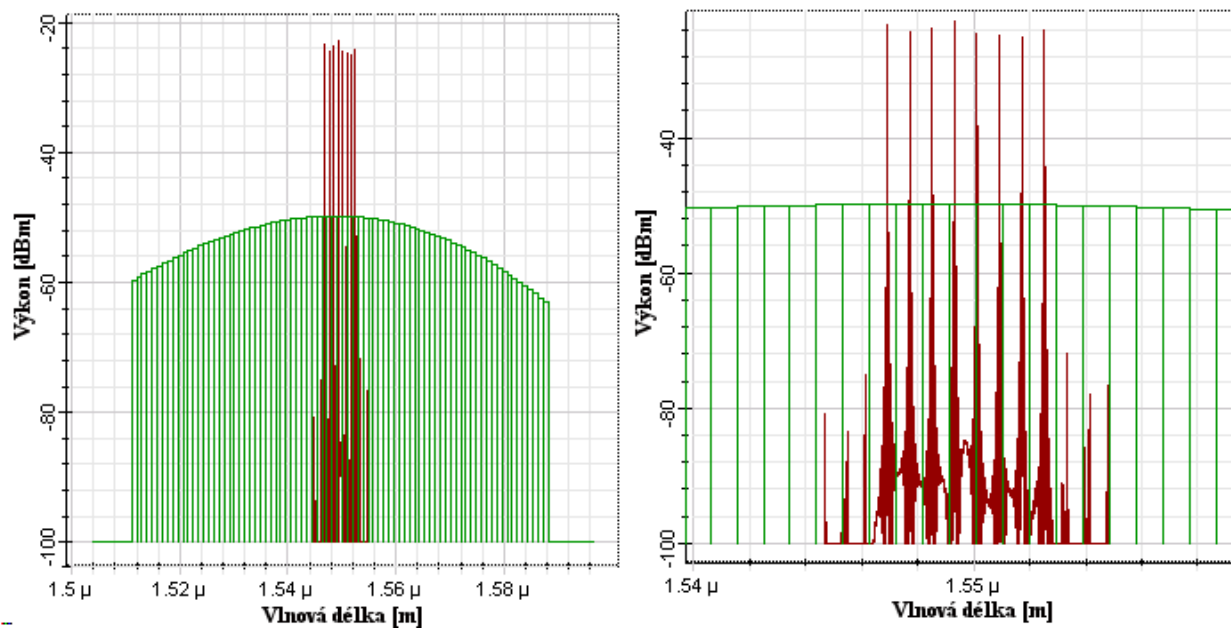


Obr. č. 16 Diagram oka ve scénáři s Ramanovským předzesilovačem

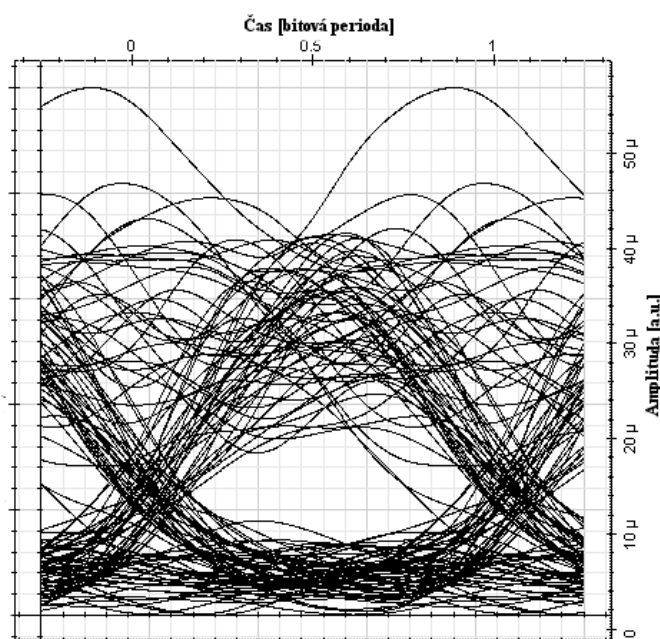
8.1.3 SOA

V tomto scénáři bylo před polovodičový zesilovač zapojeno vlákno dlouhé 215 km. Hodnoty úrovní vstupního signálu, šumu a rozdílů úrovní mezi jednotlivými kanály byly shodné s hodnotami naměřenými ve scénáři s předzesilovačem EDFA. Polovodičový zesilovač dodal signálu zisk 27,1 dB.

Po průchodu zesilovačem byla naměřená hodnota úrovně výstupního signálu v prvním kanálu rovna $-24,22$ dBm. Hodnota odstupů signálu od šumu byla 25,72 dB. Rozdíly mezi úrovněmi signálů v jednotlivých kanálech dosahovali 1 dB. Bitová chybovost naměřená na přijímači byla $1,801 \cdot 10^{-4}$. K dosažení požadované bitové chybovosti bylo třeba vlákno zkrátit na délku 190 km. Spektrum zisku a přidaného šumu po průchodu zesilovačem je vidět na obrázku 17 (Obr. č. 17). Diagram oka je vidět na obrázku 18 (Obr. č. 18).



Obr. č. 17 Spektrum signálu a šumu předzesilovače SOA

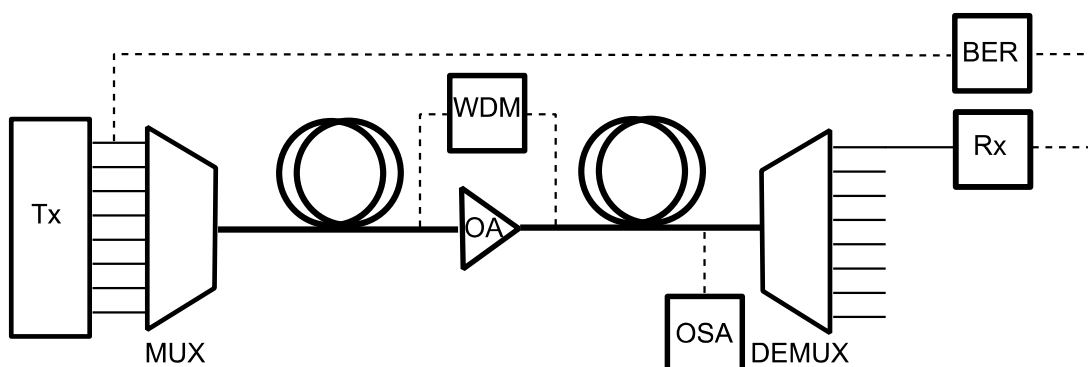


Obr. č. 18 Diagram oka ve scénáři s předzesilovačem SOA

8.2 Průběžný zesilovač

Simulace se zesilovačem zapojeným jako průběžný zesilovač proběhly s následujícím nastavením (Obr. č. 19). Signál z multiplexoru (MUX) byl navázán do vlákna dlouhého 110 km. Průchodem přes toto vlákno byl signál utlumen o 22 dB a vstoupil do zesilovače (OA). Délka vlákna za zesilovačem byla postupně upravena tak, aby na přijímači byla naměřena požadovaná bitová chybovost 10^{-12} . Dvouportový WDM analyzátor (WDM) měřil

úroveň signálu a šumu v jednotlivých kanálech a spektrální analyzátor (OSA) zobrazoval spektrum signálu před vstupem do demultiplexoru (DEMUX).



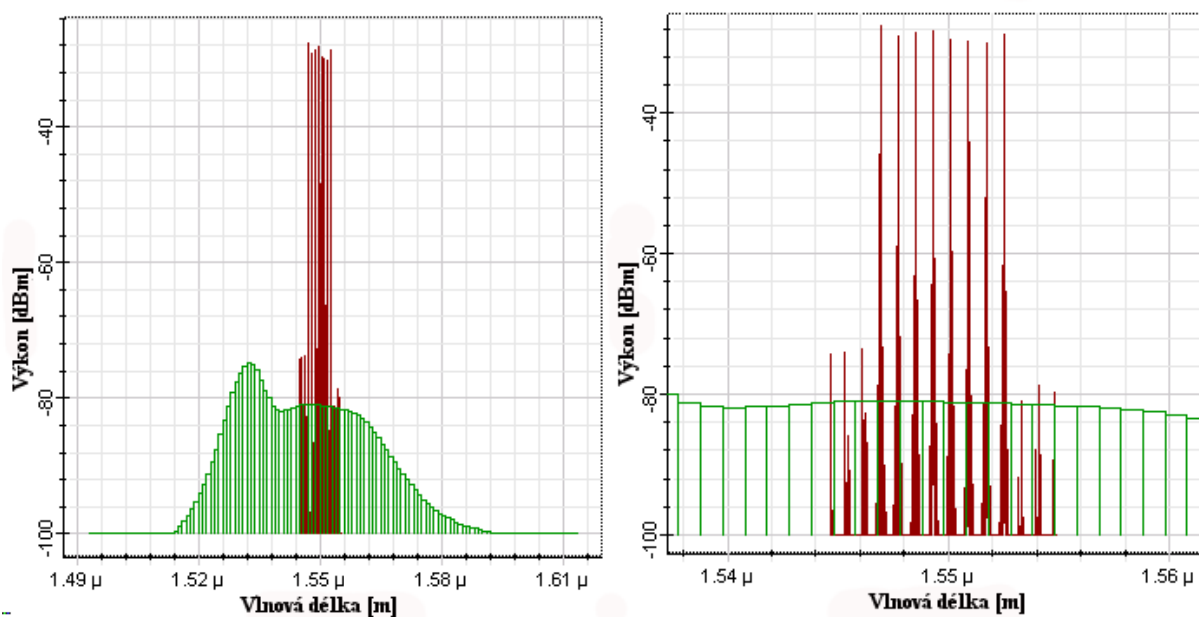
Obr. č. 19 Schéma zapojení při umístění jako průběžný zesilovač

8.2.1 EDFA

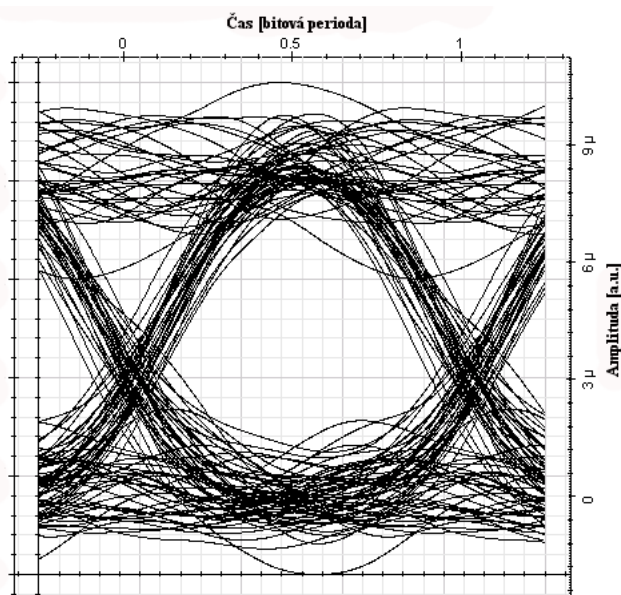
První simulace proběhla se zesilovačem EDFA. V tomto scénáři byla požadovaná bitová chybovost dosažena při délce vlákna za zesilovačem 140 km. Celková délka přenosové trasy tedy dosáhla 250 km.

Úroveň signálu v prvním kanálu vstupujícím do zesilovače byla $-30,27$ dBm, hodnota OSNR byla $69,73$ dB. Rozdíl v úrovních signálu mezi jednotlivými kanály byl maximálně $0,2$ dB. Zesilovač dodal signálu zisk $29,1$ dB.

Po průchodu zesilovačem byla úroveň výstupního signálu v prvním kanálu rovna $-1,15$ dBm a hodnota OSNR $52,2$ dB. Rozdíly mezi úrovněmi signálů jednotlivých kanálů dosahovaly $1,2$ dB. Naměřená bitová chybovost byla $4,322 \cdot 10^{-12}$. Spektrum signálu a přidaného šumu před vstupem do demultiplexoru je vidět na obrázku 20 (Obr. č. 20). Diagram oka je vidět na obrázku 21 (Obr. č. 21).



Obr. č. 20 Spektrum signálu a šumu na konci vlákna ve scénáři s průběžným zesilovačem EDFA

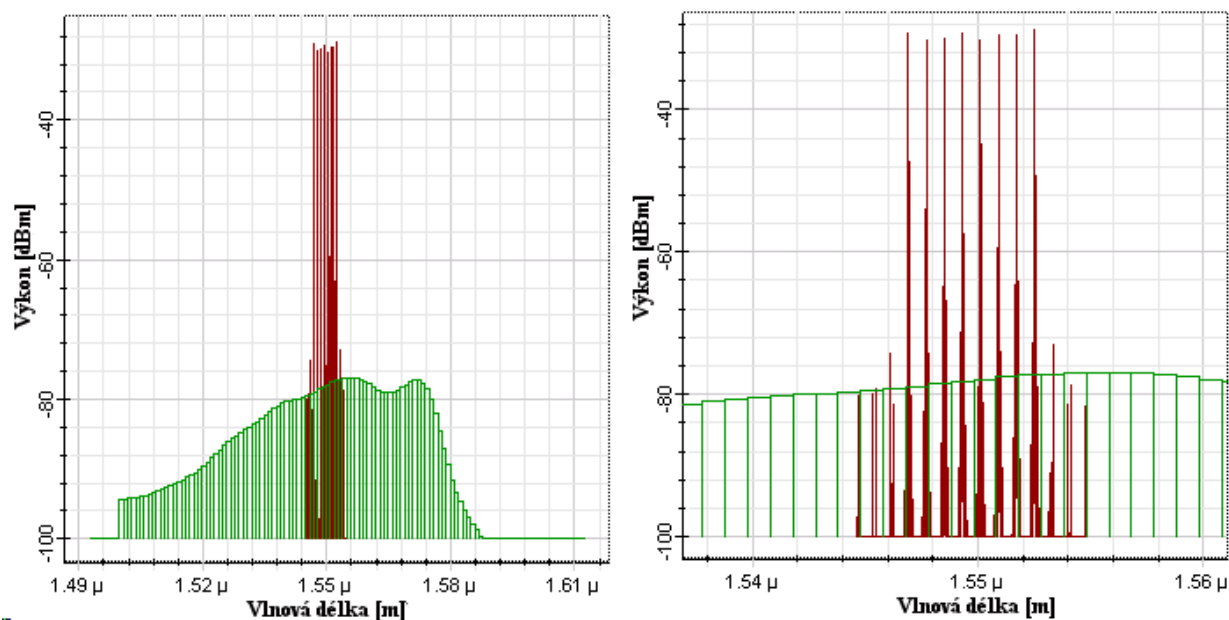


Obr. č. 21 Diagram oka ve scénáři s průběžným zesilovačem EDFA

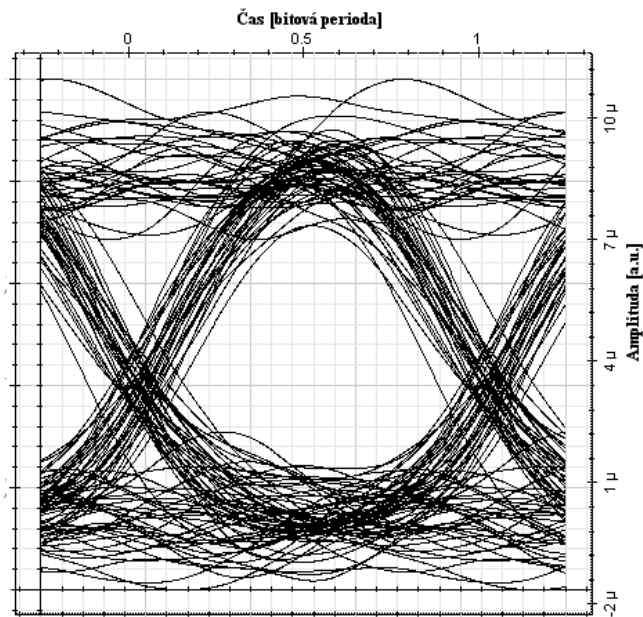
8.2.2 Ramanovský zesilovač

Ve scénáři s Ramanovským zesilovačem byla délka vlákna za zesilovačem 120 km, což spolu s 20 km vlákna v zesilovači činilo požadovaných 140 km použitých v předchozí simulaci.

Úroveň signálu, šumu a jejich rozdíly mezi jednotlivými kanály na vstupu zesilovače byly stejné jako v předcházející simulaci. Zesilovač dodal signálu zisk 25,4 dB. Po průchodu Ramanovským zesilovačem byla úroveň výstupního signálu v prvním kanálu $-4,92$ dBm a hodnota OSNR byla rovna 48,42 dB. Rozdíly mezi úrovněmi signálů jednotlivých kanálů dosahovaly 1,6 dB. Úroveň signálu v prvním kanálu před vstupem do demultiplexoru byla $-26,43$ dBm a hodnota OSNR 50,7 dB. Hodnota bitové chybovosti naměřená na přijímači byla $6,422 \cdot 10^{-13}$. K dosažení požadované bitové chybovosti bylo třeba vlákno za zesilovačem prodloužit o 1,1 km. Celková délka přenosové trasy tak dosáhla 231,1 km. Spektrum signálu a přidaného šumu před vstupem do demultiplexoru je vidět na obrázku 22 (Obr. č. 22). Diagram oka je vidět na obrázku 23 (Obr. č. 23).



Obr. č. 22 Spektrum signálu a šumu na konci vlákna ve scénáři s Ramanovským průběžným zesilovačem

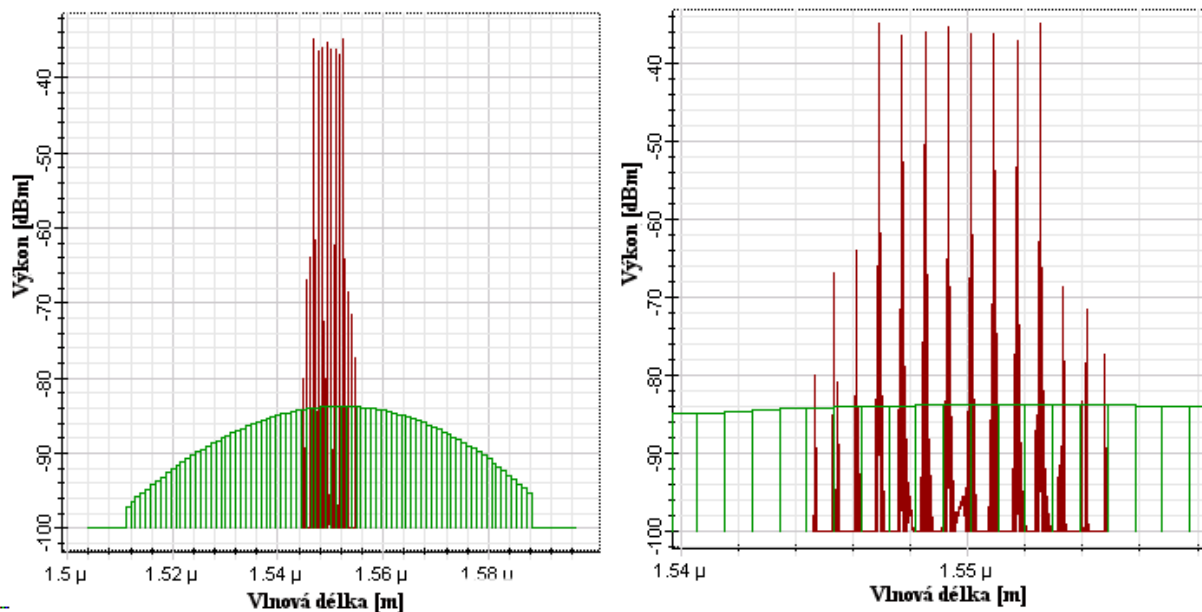


Obr. č. 23 Diagram oka ve scénáři s Ramanovským průběžným zesilovačem

8.2.3 SOA

Ve scénáři s polovodičovým zesilovačem nejprve proběhla simulace se stejnou délkou vláken jako v případě zesilovače EDFA. Z toho důvodu byly i úrovně signálu a šumu vstupujícího do zesilovače stejné. Zesilovač dodal signálu zisk 23,2 dB.

Hodnota úrovně výstupního signálu v prvním kanálu byla $-6,85$ dBm a odstup signálu od šumu 48,88 dB. Rozdíly v úrovních výkonů jednotlivých kanálů dosáhly 4,6 dB. Výkon signálu v prvním kanálu naměřený před vstupem do demultiplexoru klesl na hodnotu $-34,85$ dBm. Takto nízká úroveň již leží mimo dynamický rozsah detektoru, a proto byla bitová chybovost naměřená na přijímači rovna 1. Spektrum signálu a přidaného šumu naměřené před vstupem do demultiplexoru je vidět na obrázku (Obr. č. 24).

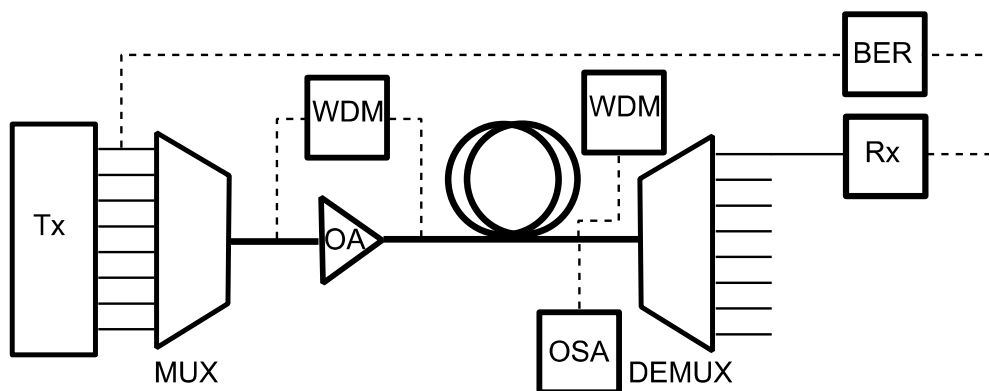


Obr. č. 24 Spektrum signálu a šumu na konci vlákna ve scénáři s průběžným zesilovačem SOA

Požadované bitové chybovosti 10^{-12} bylo dosaženo po zkrácení vlákna za zesilovačem na délku 78,3 km. Z důvodu saturace zisku zesilovače při vysoké úrovni vstupního signálu bylo současně potřeba prodloužit vlákno před zesilovačem na délku 135 km. Prodloužením vlákna před zesilovačem klesla úroveň vstupního signálu v prvním kanálu na hodnotu $-35,28$ dBm. Zisk dodaný zesilovačem vzrostl na hodnotu 25,28 dB. Úroveň signálu v prvním kanálu na výstupu zesilovače byla $-9,98$ dBm a odstup signálu od šumu 42,1 dB. Úroveň signálu v prvním kanálu naměřená před vstupem do demultiplexoru byla $-25,59$ dBm a odstup signálu od šumu byl 42,16 dB.

8.3 Výkonový zesilovač

Simulace se zesilovačem v zapojení jako booster proběhly s následujícím nastavením (viz Obr. č. 25). Signál z multiplexoru (MUX) byl navázán do zesilovače (OA), za kterým bylo připojeno optické vlákno. Změnou délky tohoto vlákna se postupně dosáhlo požadované bitové chybovosti. Úrovně signálu a šumu v jednotlivých kanálech na vstupu a výstupu zesilovače měřil dvouportový WDM analyzátor (WDM).



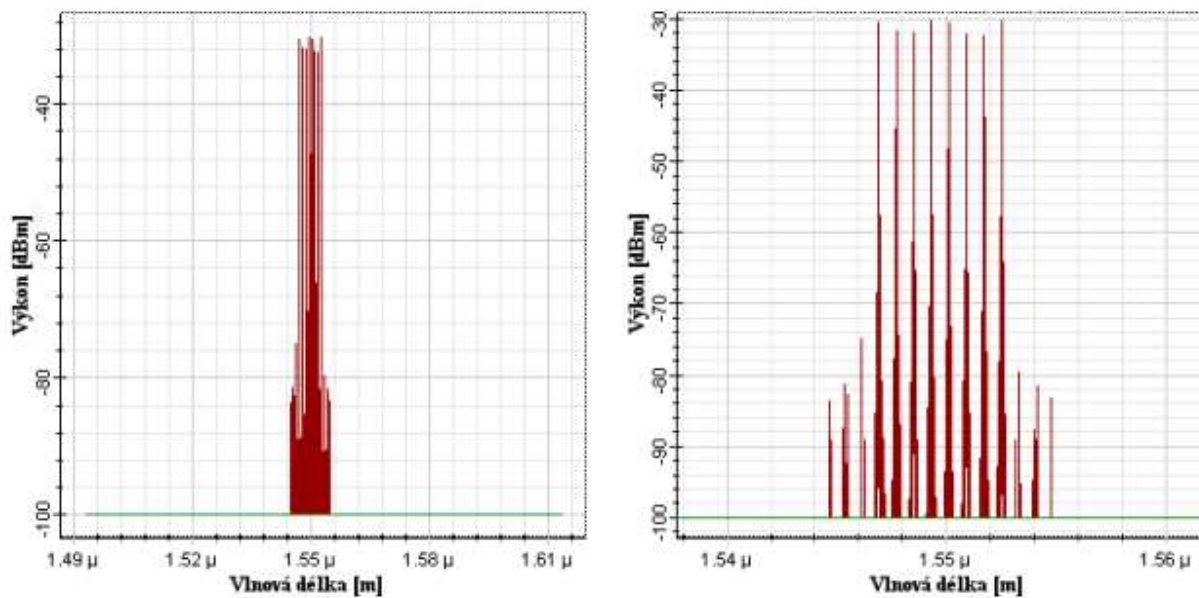
Obr. č. 25 Schéma zapojení při umístění jako výkonový zesilovač

Pro měření úrovně signálu a šumu před vstupem do demultiplexoru, byl na konci vlákna připojen jednoportový WDM analyzátor (WDM). Spektrum signálu zobrazoval spektrální analyzátor (OSA) připojený také na konci vlákna.

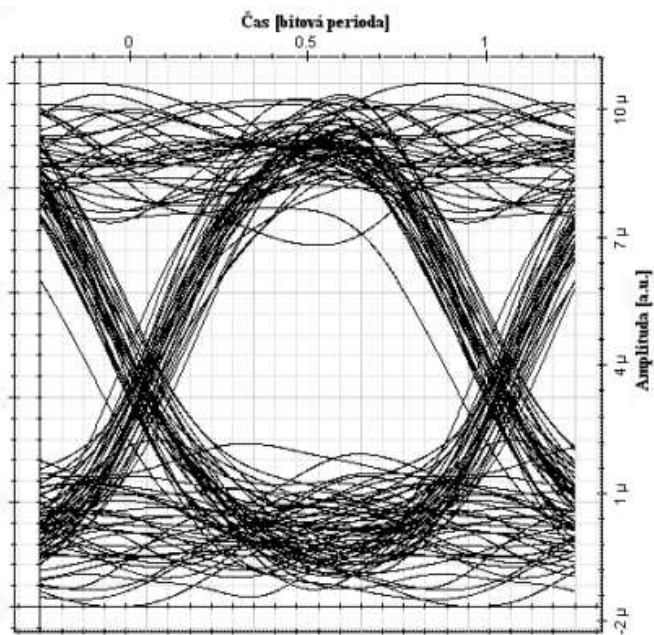
8.3.1 EDFA

První simulace proběhla s výkonovým zesilovačem EDFA. Signál vstupující do zesilovače měl úroveň výkonu v prvním kanále $-8,36$ dBm a hodnotu OSNR rovnu $91,64$ dB. Rozdíly mezi úrovněmi signálů jednotlivých kanálů nepřesáhly $0,1$ dB.

Průchodem zesilovačem EDFA byl signál zesílen o $12,74$ dB. Úroveň výkonu signálu v prvním kanálu měla na výstupu zesilovače hodnotu $4,38$ dBm a odstup signálu od šumu činil $73,54$ dB. Rozdíly mezi úrovněmi signálů jednotlivých kanálů dosahovaly $1,4$ dB. Při dosažení požadované bitové chybovosti byla délka vlákna za zesilovačem 166 km. Na konci tohoto vlákna byla naměřená úroveň signálu v prvním kanálu rovna $-30,25$ dBm a hodnota OSNR činila $69,75$ dB. Rozdíly úrovní signálů jednotlivých kanálů dosahovaly na konci vlákna $4,2$ dB. Bitová chybovost naměřená na přijímači měla hodnotu $1,204 \cdot 10^{-12}$. Spektrum signálu po průchodu vláknem je vidět na obrázku 26 (Obr. č. 26). Diagram oka je vidět na obrázku 27 (Obr. č. 27).



Obr. č. 26 Spektrum signálu a šumu na konci vlákna ve scénáři s výkonovým zesilovačem EDFA

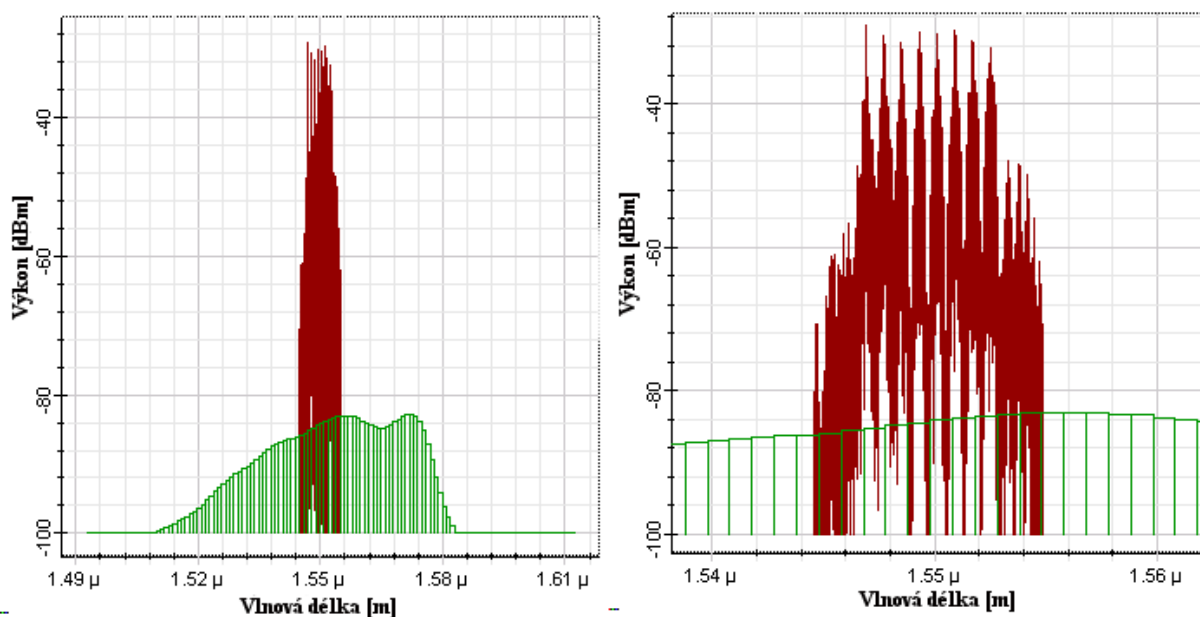


Obr. č. 27 Diagram oka ve scénáři s výkonovým zesilovačem EDFA

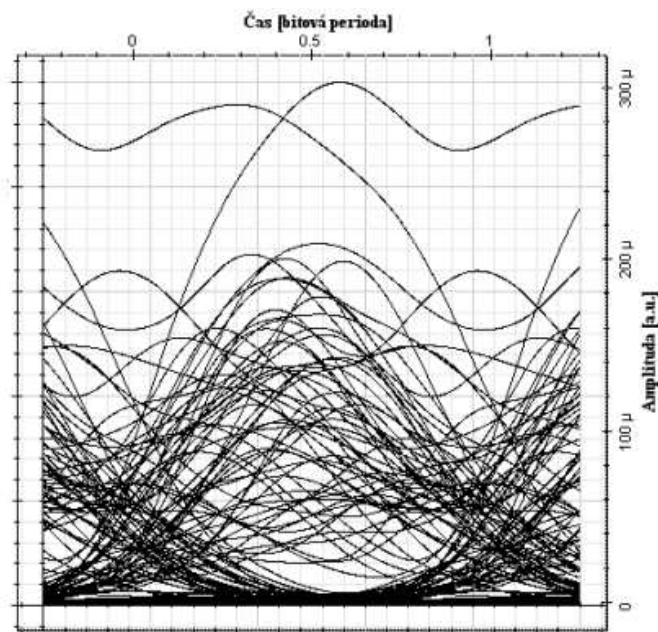
8.3.2 Ramanovský zesilovač

V následující simulaci byl za multiplexor umístěn Ramanovský zesilovač s délkou vlákna 20 km. Pro dosažení stejné délky trasy jako v předcházejícím scénáři bylo za zesilovač připojeno vlákno o délce 146 km. Úroveň výkonu signálu a šumu vstupujícího do zesilovače byla shodná s úrovní v předchozím scénáři. Zesilovač dodal signálu zisk 24,32 dB.

Po průchodu zesilovačem byla úroveň výstupního signálu v prvním kanálu rovna 15,95 dBm. Odstup signálu od šumu měl hodnotu 70,27 dB. Rozdíly mezi úrovněmi signálů jednotlivých kanálů dosahovali 1,9 dB. Na konci vlákna byla úroveň signálu v prvním kanálu rovna -32,34 dBm, OSNR 51,17 dB a rozdíly mezi úrovněmi signálů jednotlivých kanálů činily maximálně 1,9 dB. Bitová chybovost naměřená na přijímači měla hodnotu $1,804 \cdot 10^{-2}$. Spektrum signálu před vstupem do demultiplexoru je vidět na obrázku 28 (Obr. č. 28). Diagram oka je vidět na obrázku 29 (Obr. č. 29).



Obr. č. 28 Spektrum signálu a šumu na konci vlákna ve scénáři s Ramanovským výkonovým zesilovačem



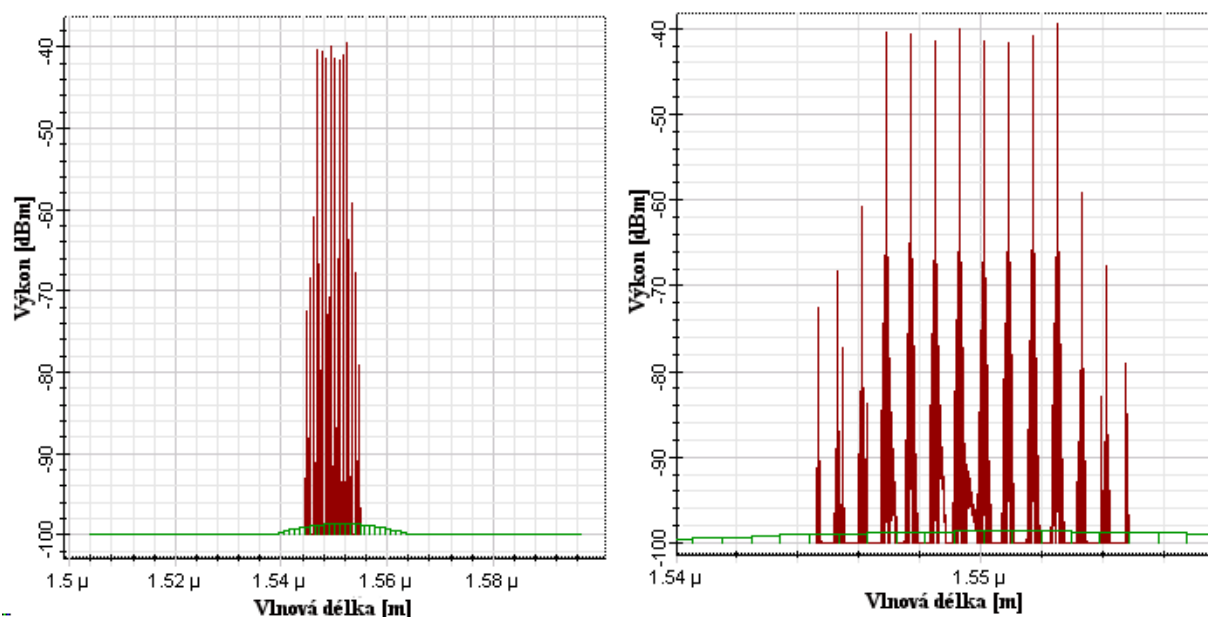
Obr. č. 29 Diagram oka ve scénáři s Ramanovským výkonovým zesilovačem

Pro dosažení požadované bitové chybovosti bylo nutné nejprve omezit výkon signálu vstupujícího do zesilovače. Proto byl mezi multiplexor a zesilovač zařazen optický atenúátor s hodnotou útlumu 2 dB. Úroveň výkonu vstupního signálu v prvním kanálu klesla na hodnotu $-10,36$ dBm a OSNR na 89,69 dB. Po průchodu zesilovačem, který dodal signálu zisk 21,89 dB byla úroveň signálu v prvním kanálu rovna 11,53 dBm a odstup signálu od šumu byl 68,17 dB.

Úroveň výkonu signálu na konci vlákna o délce 180 km byla rovna $-24,15$ dBm a odstup signálu od šumu byl 48,95 dB. Rozdíly mezi úrovněmi signálů jednotlivých kanálů dosahovali 1,6 dB. Bitová chybovost naměřená na přijímači byla $1,084 \cdot 10^{-12}$.

8.3.3 SOA

V této simulaci byl za multiplexor připojen polovodičový zesilovač. Za zesilovač bylo stejně jako v případě zesilovače EDFA zapojeno vlákno o délce 166 km. Zesilovač dodal signálu zisk 2,17 dB. Úroveň signálu v prvním kanálu na výstupu zesilovače byla $-6,19$ dBm a odstup signálu od šumu byl 59,28 dB. Úroveň signálu v prvním kanálu naměřená před vstupem do demultiplexoru byla $-39,42$ dBm a OSNR byla 59,29 dB. Bitová chybovost naměřená na přijímači byla rovna 1. Spektrum signálu a šumu před vstupem do demultiplexoru je vidět na obrázku 30 (Obr. č. 30).



Obr. č. 30 Spektrum signálu a šumu na konci vlákna ve scénáři s výkonovým zesilovačem SOA

Pro dosažení požadované bitové chybovosti bylo třeba před zesilovač umístit optický atenuátor s hodnotou útlumu 25 dB a zároveň zkrátit vlákno za zesilovačem na délku 70 km. Po těchto úpravách klesla úroveň signálu v prvním kanálu na vstupu zesilovače na hodnotu $-33,36$ dBm. Zesilovač dodal signálu zisk 24,6 dB. Úroveň výkonu signálu v prvním kanálu před vstupem do demultiplexoru byla $-22,71$ dBm a odstup signálu od šumu byl 44,47 dB.

Po provedení všech simulací a porovnání výsledků naměřených s jednotlivými zesilovači je zřejmé, že nejvhodnější pro nasazení v přenosovém systému s WDM je zesilovač EDFA. Vzdálenosti, na které umožňuje přenos s bitovou chybovostí 10^{-12} , jsou o desítky kilometrů delší než v případě polovodičového zesilovače. Ve srovnání s Ramanovským zesilovačem jsou rozdíly ve vzdálenostech menší, ale významným faktorem omezujícím použitelnost Ramanovských zesilovačů je jejich vysoká cena.

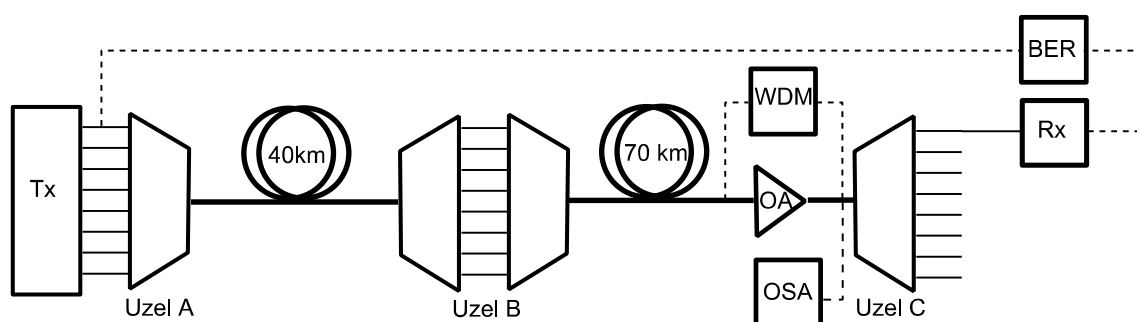
Při zapojení zesilovačů doprostřed přenosové trasy je systém s jediným zesilovačem schopen dosáhnout přijatelné bitové chybovosti na vzdálenost přesahující 250 km. Zapojení zesilovače doprostřed přenosové trasy ovšem nemusí být vždy možné, nebo může být jeho realizace příliš nákladná. Nejvhodnější tedy je zapojení jako předzesilovač, kdy systém se zesilovačem EDFA dosáhl bitové chybovosti 10^{-12} s vláknem dlouhým 215 km.

8.4 Distribuované vs. koncentrované umístění zesilovačů

Při návrhu optické sítě a rozmístění zesilovačů je potřeba zvážit, kolik zesilovačů a s jakým ziskem je vhodné nasadit. Výkonný zesilovač je schopen kompenzovat ztráty vzniklé na delším úseku, ale zároveň vnáší do vlákna více šumu. Následující simulace porovnává výkonnost systému s jedním zesilovačem a systému s několika méně výkonnými zesilovači.

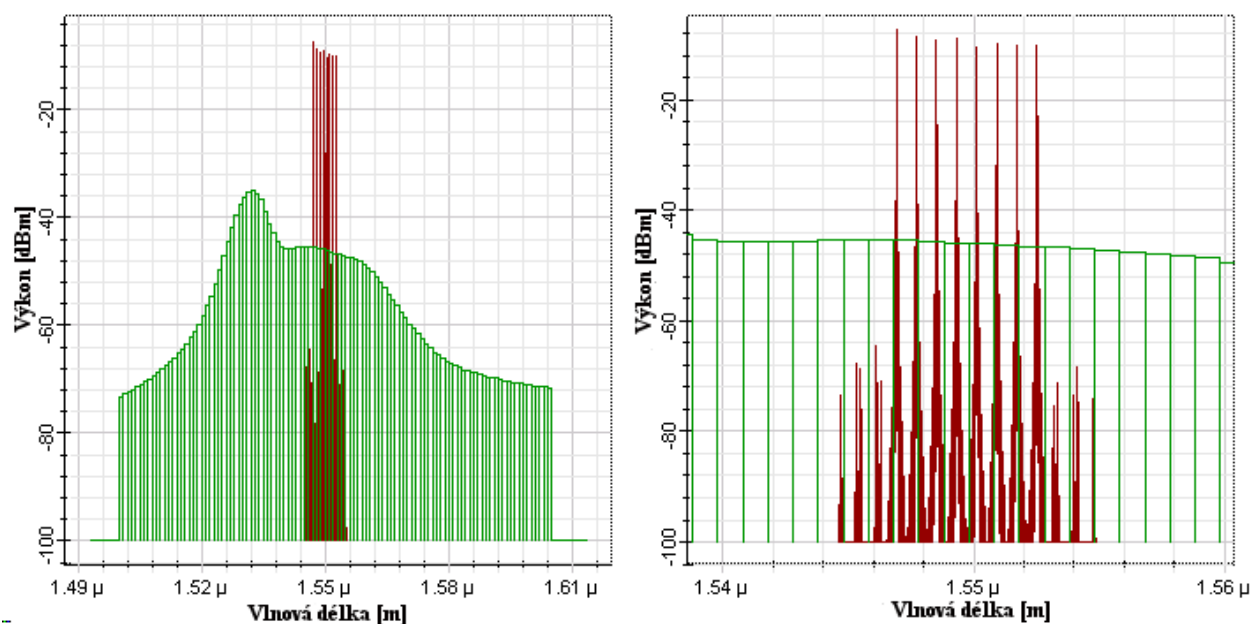
8.4.1 Koncentrované rozmístění zesilovačů

V prvním scénáři byl na trase mezi uzly A a C (viz Obr. č. 31) umístěn jeden zesilovač EDFA. Délka dopovaného vlákna v zesilovači byla 5 m. Zesilovač obsahoval laser o výkonu 100 mW, který do vlákna ve směru šíření signálu čerpal světlo s vlnovou délkou 980 nm. Zesilovač byl umístěn před přijímačem v uzlu C a byl nastaven tak, aby byl schopen plně kompenzovat ztráty vzniklé na předcházejícím úseku i ztráty způsobené demultiplexorem. Délka vlákna mezi uzly A a B byla 40 km, mezi uzly B a C bylo umístěno vlákno dlouhé 70 km. Navázáním signálu do přenosové trasy v uzlu A byl výkon signálu utlumen o 5 dB, v uzlu C byl útlum 5 dB způsoben naopak vydělením signálu z přenosové trasy. Průchodem přes uzel B byl výkon signálu snižen o 10 dB. Výkonová úroveň signálu v prvním kanálu vstupujícího do zesilovače byla $-45,33$ dBm a odstup signálu od šumu byl 54,67 dB. Rozdíly mezi úrovněmi výkonů jednotlivých kanálů nepřesahovaly 0,2 dB.



Obr. č. 31 Schéma zapojení pro koncentrované rozmístění zesilovačů

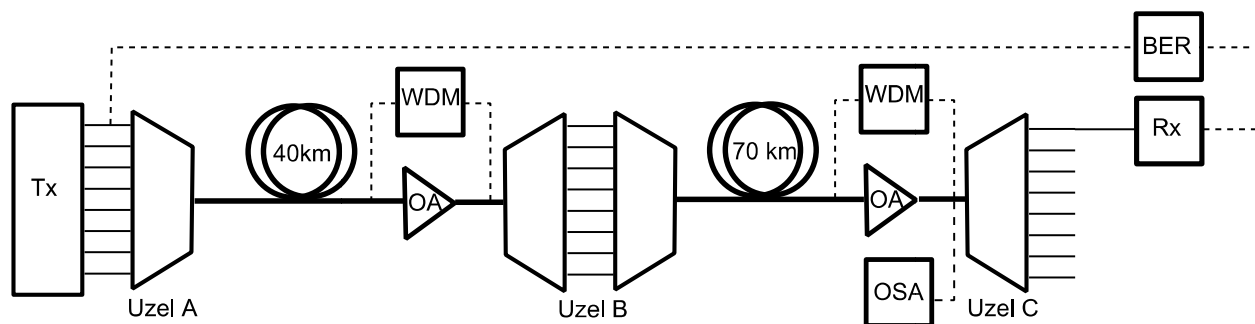
Po průchodu zesilovačem byla naměřená hodnota výkonu signálu v prvním kanálu rovna $-10,11$ dBm a OSNR 36,47 dB. Rozdíl v úrovni signálu mezi jednotlivými kanály dosahoval 2,9 dB. Spektrum signálu a přidaného šumu po průchodu optickým zesilovačem se ziskem 35 dB je vidět na obrázku (Obr. č. 32). Hodnota bitové chybovosti naměřená na přijímači byla $6,457 \cdot 10^{-50}$.



Obr. č. 32 Spektrum signálu a šumu před vstupem do uzlu C

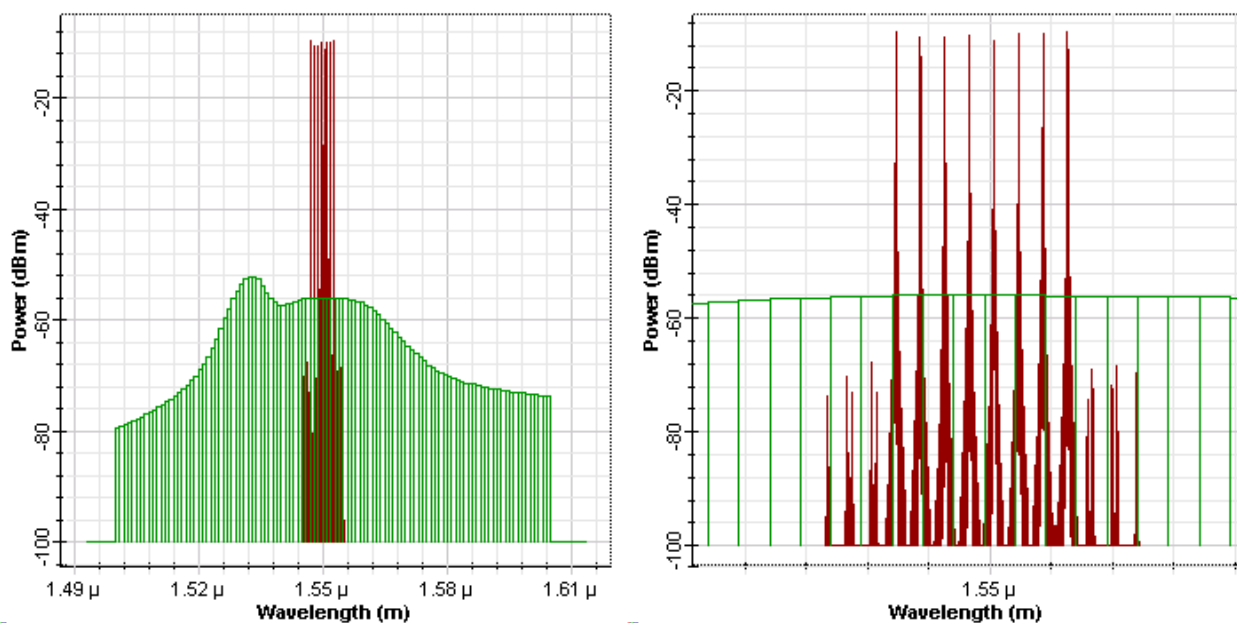
8.4.2 Distribované rozmístění zesilovačů

Ve druhém scénáři byl zesilovač umístěn před každým uzlem. První zesilovač obsahoval čerpací zdroj s výkonem 23 mW a zesiloval signál z vysílače o 10 dB. Zesilovač před uzlem C poskytoval zisk 25 dB. Schéma zapojení je vidět na obrázku (Obr. č. 33).



Obr. č. 33 Schéma zapojení pro distribuované rozmístění zesilovačů

Signál vstupující do předzesilovače na konci přenosové trasy měl úroveň výkonu v prvním kanálu $-35,69$ dBm a OSNR $60,27$ dB. Po průchodu druhým zesilovačem byla úroveň výkonu signálu v prvním kanálu rovna $-9,69$ dBm a OSNR $45,35$ dB. Rozdíly mezi jednotlivými kanály dosahovaly 2 dB. Bitová chybovost naměřená na přijímači byla rovna 0. Spektrum signálu a šumu po průchodu druhým zesilovačem je vidět na obrázku (Obr. č. 34).



Obr. č. 34 Spektrum signálu a šumu po průchodu zesilovačem před uzlem C

Ze simulací je vidět, že pokud je zesilovač poskytující určitý zisk nahrazen více zesilovači, které dohromady poskytují stejný zisk, dojde ke snížení hodnoty ASE a zvýšení OSNR. Dalšího zlepšení těchto hodnot lze dosáhnout v případě, že je velikost zisku mezi jednotlivé zesilovače rozložena rovnoměrně [12]. Při rozložení zisku mezi více zesilovačů je možné využít zařízení s menšími rozměry a cenou. Větší počet zesilovačů a jejich umístění v každém uzlu také usnadňuje případné rozšíření stávající sítě. Při návrhu sítě je potom nutné zvážit, zda zlepšení přenosových vlastností systému zapojením více zesilovačů ospravedlňuje vyšší pořizovací náklady.

9 Návrh metropolitní sítě

Metropolitní síť je rozlehlá počítačová síť, která obsluhuje velké, především městské oblasti s vysokou koncentrací účastníků. Vzdálenost mezi jednotlivými uzly může dosahovat až stovek kilometrů [9]. Metropolitní sítě hrají velmi významnou roli při rozšiřování síťových služeb. Slouží jako spojnice mezi dálkovými a přístupovými sítěmi. Na jednu stranu musí uspokojit potřebu neustále se zvyšujících přenosových rychlostí v dálkových transportních sítích. Na druhou stranu musí být schopná uspokojit také rostoucí požadavky na konektivitu a podporu různých technologií využívaných v přístupových sítích [14].

V dřívějších dobách metropolitní sítě využívaly časového multiplexu a byly navrhovány pro omezený soubor služeb a typů provozu. V dnešní době využívají z důvodů navýšení přenosových rychlostí vlnový multiplex a propojují široké spektrum klientských protokolů jak mezi jednotlivými lokálními sítěmi, tak do sítí dálkových.

Moderní metropolitní optická síť by měla splňovat několik základních požadavků. Jak již bylo řečeno, měla by podporovat co největší množství protokolů a služeb. Měla by poskytovat vysoké přenosové rychlosti a efektivně využívat vlnové délky. Dále musí být spolehlivá a odolná proti selhání. A také by měla být zajištěna možnost jejího rozšiřování jak z hlediska přenosových rychlostí, tak z hlediska počtu síťových uzlů. To vše samozřejmě s co možná nejnižšími náklady.

Při návrhu metropolitní sítě s využitím technologie WDM je potřeba zvážit několik faktorů. Při návrhu spojů je nutné brát v úvahu ztráty optického signálu, SNR, disperzi a nelineární efekty. Vložením optického cross-connectu nebo add/drop multiplexoru je možné měnit trasu signálu a zvýšit komplexnost návrhu. Směrováním vlnových délek lze vytvořit různé virtuální topologie. Důležité je také implementovat strategie pro ochranu a obnovu přenosových tras a systém pro správu sítě.

9.1 Volba topologie

Pro výstavbu metropolitní sítě se nabízí několik vhodných topologií (kruh, hvězda, mesh), každá z nich s sebou nese nějaké výhody a nevýhody.

Topologie mesh poskytuje největší přenosovou kapacitu. V síti s takovou topologií existuje k cíli vždy několik alternativních cest, což je výhodné z hlediska zabezpečení proti selhání některého z prvků sítě. Na druhou stranu je při větší počtu možných cest potřeba

implementace složitých algoritmů pro určení záložní trasy, a tím dochází ke zpomalení reakce na selhání. Navíc výstavba sítí s takovou topologií je velmi finančně náročná.

Hvězdicová topologie je levnějším řešením než topologie mesh a nabízí vyšší přenosovou kapacitu než topologie kruhová. Nevýhodou této topologie je především silná závislost na funkci centrálního uzlu a obtížnější ochrana přenosových cest.

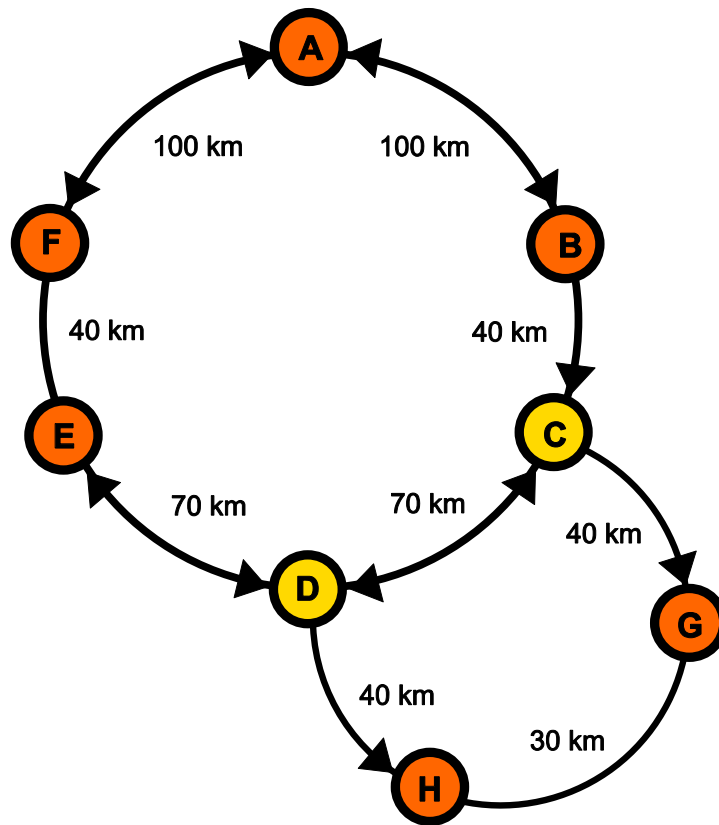
Většina současných metropolitních sítí má kruhovou topologii, protože byly budovány na již existujících trasách pro technologie SONET/SDH. Kruhová topologie má oproti ostatním několik výhod, díky kterým se stala častou volbou při návrhu metropolitních sítí. Co se přenosové kapacity týče, nemůže se kruhová s mesh topologií rovnat, ale kruhová topologie je odolnější a mnohem levnější alternativou.

Pro navrhovanou metropolitní síť jsem zvolil topologii se vzájemně propojenými kruhy. Topologie využívající vzájemně propojené kruhy je jeden z ekonomicky nejefektivnějších způsobů návrhu a výstavby metropolitní sítě. Vzájemně propojené kruhy nabízejí řešení pro implementaci topologie podobné mesh ovšem s jednodušším směrováním a zabezpečením proti poruchám.

V každém kruhu je pro každý směr přenosu vyhrazeno jedno vlákno. Tento dvojitý kruh plní zároveň ochranou funkci. Při porušení jednoho vlákna je signál přepojen na korespondující kanál v druhém vlákne. Tím se sice prodlouží přenosová trasa, ale vzhledem k tomu, že náhradní trasa je předem daná, nedochází ke zpoždění při jejím určování.

Navrhovaná síť je tvořena dvěma propojenými kruhy jak je vidět na obrázku (Obr. č. 35). Větší kruh obsahuje šest uzlů, z nichž dva jsou využity k propojení s menším kruhem, který obsahuje další dva uzly. Vzdálenosti mezi jednotlivými uzly jsou v rozmezí od 30 do 100 km. Propojení jednotlivých kruhů pomocí dvou uzlů je důležité z hlediska ochrany přenosových cest, kdy v případě propojení pouze jedním uzlem není zajištěna alternativní cesta při selhání tohoto uzlu.

Uzly této sítě jsou tvořeny ROADM druhého stupně. Pouze uzly zajišťující vzájemné propojení jednotlivých kruhů jsou čtvrtého stupně. Tím jsou sníženy náklady oproti topologii mesh, která v každém uzlu využívá dražší zařízení vyššího stupně. Pro případ pozdějšího rozšíření sítě je vhodné v uzlech, ve kterých se v budoucnu předpokládá připojení dalších sítí, volit multiplexory s vyšším než momentálně potřebným stupněm [13].



Obr. č. 35 Topologie sítě a rozmístění zesilovačů

9.2 Ochrana přenosových tras

K ochraně přenosových cest bude využit mechanismus SNCP (Sub-Network Connection Protection). SNCP je ochranný mechanismus využívaný v sítích SDH. Signál je k cíli vysílán po dvou odlišných trasách, přijímač podle předem stanovených kritérií určí jednu trasu jako pracovní a druhou jako ochrannou. Při výpadku pracovní linky mezi uzly se signál přepne na ochrannou trasu.

Výhodou tohoto řešení je především jeho jednoduchost. K přepínání cest v případě poruchy linky není potřeba žádný zvláštní signalizační protokol. Mechanismus pracuje samostatně v každém uzlu a vždy vybírá pro signál cestu s vyšší kvalitou. Hlavní nevýhodou je spotřeba síťových prostředků pro ochranné cesty.

9.3 Volba vlnových délek

Jak již bylo zmíněno dříve, přenosové pásmo optického vlákna je rozděleno na oblasti s nízkými hodnotami útlumu tzv. okna. Současné systémy WDM prakticky využívají k přenosu tři tato okna. Okno C (Conventional) se nachází v pásmu 1525 až 1565 nm. Měrný

útlum optických vláken je v tomto oknu 0,2 dB/km a využívá jej k přenosu většina metropolitních a dálkových sítí. Šířka tohoto okna činí 40 nm a může obsahovat 50 kanálů s odstupem 100 GHz nebo 100 kanálů s odstupem 50 GHz. Pásmo L (Long) začíná na 1570 nm a sahá k 1620 nm. Toto pásmo vykazuje nepatrně vyšší hodnotu útlumu než pásmo C. Pásmo S (Short) se nachází kolem vlnové délky 1310 nm. Důležitou vlastností tohoto okna je velmi malá hodnota materiálové a vlnododové disperze pro vlákna definovaná standardem ITU-T G.652. Hodnota měrného útlumu je 0,5 dB/km.

Standard ITU-T G. 694.1 z roku 2002 specifikuje rozmístění kanálů DWDM od 1528,7 nm po 1563,86 nm s odstupem 100 GHz. Při zmenšení odstupů mezi kanály se zvyšuje pravděpodobnost přeslechů a více se projevují nelinearity vlákna jako čtyřvlnové směšování. Odstup 50 GHz limituje přenosovou rychlost v jednom kanálu na 10 Gb/s.

Pro přenos v navrhované metropolitní síti jsem zvolil 8 vlnových délek v rozmezí 1546,1 až 1551,7 nm s odstupem 0,8 nm. Tyto vlnové délky jsou zvoleny tak, aby po průchodu zesilovačem EDFA byly rozdíly mezi jednotlivými zesílenými kanály co možná nejmenší.

9.4 Umístění zesilovačů

Jak již bylo řečeno, můžeme v síti umístit zesilovač třemi způsoby. Jako výkonový zesilovač, průběžný zesilovač a předzesilovač. Při umístění zesilovače doprostřed přenosové trasy je možné realizovat spoje s velmi nízkou chybovostí na větší vzdálenosti než při umístění zesilovačů na jednom z konců přenosové trasy. Umístění uprostřed trasy však s sebou nese řadu nevýhod a komplikací. Přenosové vlákno může být v místě plánovaného umístění zesilovače obtížně dostupné. Dále v daném místě nemusí být přítomen napájecí zdroj, což si může vyžádat další investice. Navíc je z hlediska budování a správy sítě výhodnější mít co nejvíce zařízení pohromadě.

Pokud tedy pomineme umístění zesilovače doprostřed přenosové trasy, jeví se jako nejlepší možnost umístit jej v každém uzlu jako předzesilovač. Zde bude kompenzovat ztrátu vzniklou na předcházejícím úseku, případně i ztrátu, ke které dojde navázáním do multiplexoru. Díky tomu, že je předzesilovač umístěn vždy na konci vlákna dlouhého desítky kilometrů, nemůže být úroveň výkonu signálů vstupujících do zesilovače dostatečně vysoká, aby mohla způsobit saturaci zisku. Díky tomu není nutné omezovat úroveň vstupního signálu attenuátorem jako v případě výkonového zesilovače. V simulacích dosáhl systém

s předzesilovačem EDFA požadované bitové chybovosti 10^{-12} na trase o 50 km delší než systém s výkonovým zesilovačem EDFA.

Nyní se nabízejí dvě možnosti rozmístění zesilovačů v síti. První možnost je umístit zesilovače s vysokým ziskem jen v některých uzlech sítě. Tím se sníží celkový počet instalovaných zesilovačů a dojde k úspoře nákladů. Druhá možnost je umístit zesilovač do každého uzlu avšak s nižším ziskem. Z měření vyplývá, že dva zesilovače s menším ziskem vnášejí do vlákna méně šumu než jeden zesilovač s vysokým ziskem. Navíc je tento distribuovaný způsob rozmístění vhodný také z důvodů případného budoucího rozšiřování sítě.

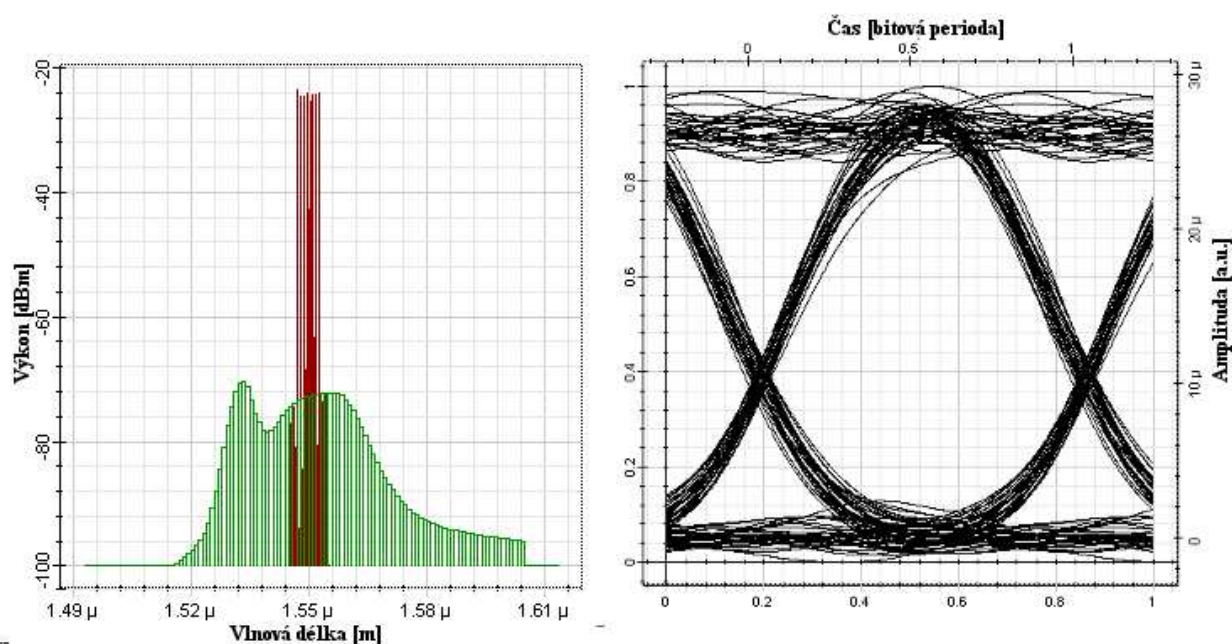
9.5 Ověření funkčnosti návrhu

Funkčnost návrhu jsem ověřoval simulacemi dvou scénářů. V prvním scénáři urazil signál nejdelší možnou trasu v síti bez poruchy. Ve druhém scénáři byla simulace provedena pro stav sítě s poruchou jednoho uzlu. I v tomto případě byla zvolena nejdelší možná trasa, kterou může signál urazit.

9.5.1 Plně funkční síť

V tomto scénáři jsou všechny prvky sítě plně funkční. Trasa signálu vede z bodu A do bodu H (viz Obr. č. 35). Zvolená trasa reprezentuje nejdelší možnou cestu, kterou může signál při této konfiguraci sítě urazit. Celková délka trasy činila 210 km. V uzlu A byl signál utlumen o 5 dB. Při průchodu uzly B, C a G byl signál vždy utlumen o 10 dB. V cílovém uzlu H byl signál utlumen o 5 dB. Celková hodnota útlumu této trasy tedy činila 82 dB.

Na trase byly celkem tři zesilovače. Předzesilovače EDFA umístěné v uzlech B, C a G. Každý ze zesilovačů měl délku vlákna 5 m a výkon čerpacího laseru 30 mW. Zesilovač v uzlu B dodal signálu zisk 27,3 dB, zesilovač v uzlu C 20,2 dB a zesilovač v uzlu G 18,6 dB. Úroveň výkonu signálu v prvním kanálu na výstupu uzlu H činila $-24,07$ dBm, hodnota OSNR byla 48,37 dB a bitová chybovost naměřená na přijímači byla $3,352 \cdot 10^{-68}$. Spektrum signálu na výstupu uzlu H a diagram oka je vidět na obrázku (Obr. č. 36).

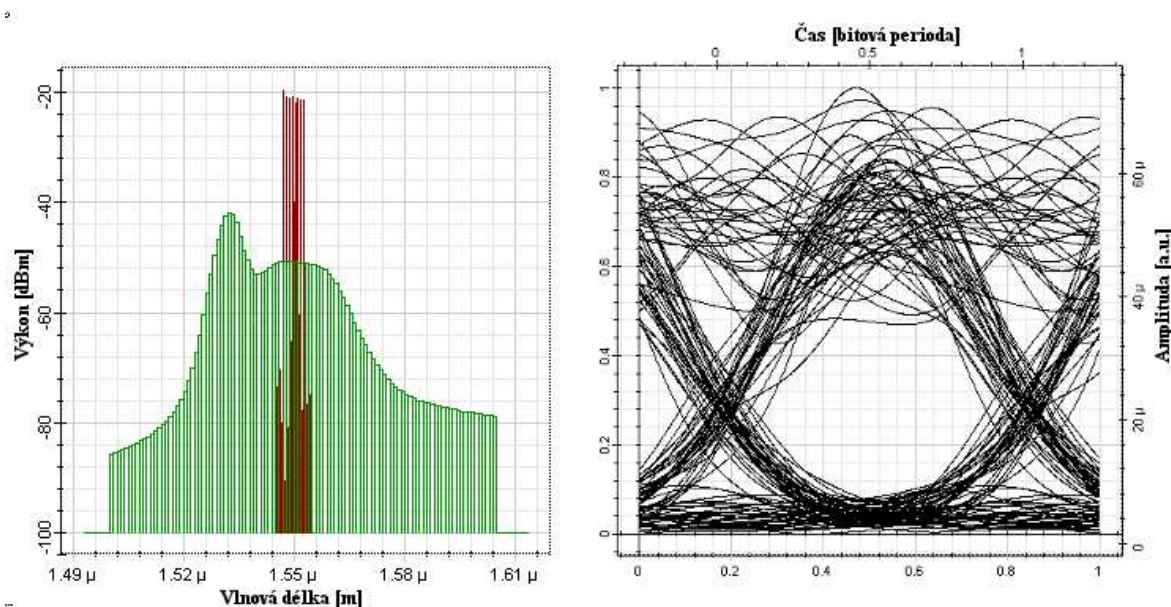


Obr. č. 36 Spektrum signálu a šumu a diagram oka na výstupu uzlu H

9.5.2 Sít' s poruchou

V tomto scénáři byla simulována situace, kdy došlo k poruše jednoho z uzlů nebo přerušení vlákna. Nejdelší možná trasa, kterou musí signál v této situaci urazit, vede z bodu E do bodu F při selhání vlákna mezi těmito body (viz Obr. č. 35). Celková délka trasy činila 380 km. Koncové uzly E a F vnesly do trasy útlum 5 dB. Každý z mezilehlých uzlů D, C, B a A utlumil procházející signál o 10 dB. Celková hodnota útlumu na této trase činila 126 dB.

Na trase byly umístěny celkem čtyři zesilovače. V každém z uzlů D, C, A a F byl umístěn jeden předzesilovač EDFA. Zesilovač v uzlu D dodal signálu zisk 24,3 dB, zesilovač v uzlu C 23,8 dB, zesilovač v uzlu A 30,6 dB a zesilovač v uzlu F 22,9 dB. Úroveň výkonu signálu v prvním kanálu na výstupu uzlu F byla -21,4 dBm, hodnota OSNR byla 29,62 dB a bitová chybovost naměřená na detektoru byla $1,968 \cdot 10^{-9}$. Spektrum signálu a diagram oka na výstupu uzlu F je vidět na obrázku (Obr. č. 37).



Obr. č. 37 Spektrum signálu a šumu a diagram oka na výstupu uzlu F

Simulace potvrdily funkčnost návrhu jak při normálním provozu, tak v případě selhání některého z prvků sítě, kdy ani při nejhorším možném scénáři nepřekročila bitová chybovost systému hodnotu 10^{-9} .

Závěr

V této práci jsem se seznámil s optickými zesilovači využívanými v optických přenosových systémech. Uvedl jsem důvody proč je vhodné nasazení optických zesilovačů a podrobně popsal jednotlivé typy vhodné pro použití v dálkových sítích.

Optické zesilovače lze rozdělovat podle jejich umístění na optické trase. Na výkonový zesilovač umístěný hned za vysílačem jsou kladeny jiné nároky než na průběžný zesilovač nebo předzesilovač. Dále se zesilovače dělí podle principu, na kterém v nich dochází k zesilování signálu. Prvním druhem jsou zesilovače vláknové, ve kterých dochází k zesílení signálu na optickém vlákně. Toto vlákno může být dotováno příměsemi vzácných zemin, nebo se může jednat o standardní přenosové vlákno. Druhým typem jsou zesilovače polovodičové. U těchto zesilovačů je signál zesílen v polovodičové struktuře.

Vláknové zesilovače jsou obzvláště vhodné pro použití jako průběžné zesilovače. Jejich hlavními přednostmi jsou vysoká hodnota zisku a vysoký saturační výkon. Při zapojení se sadou filtrů zplošťujících spektrum zisku jsou vhodné k nasazení v systémech WDM.

Hlavními výhodami polovodičových zesilovačů jsou jejich nízká cena a kompaktní rozměry. Velmi dobře se uplatňují při zapojení jako výkonový zesilovač, u kterého není vyšší hodnota šumu zásadní problém. Díky svým vlastnostem jsou polovodičové zesilovače vhodné pro konverzi vlnových délek v systémech WDM. Mohou zajišťovat také obnovu tvaru pulsů a optické směrování.

Provedl jsem simulace a měřil výkonnost přenosových systémů s každým ze tří nejběžnějších typů optických zesilovačů. Nejvyšší výkonnost dosahovaly systémy, ve kterých byl zapojen některý z vláknových zesilovačů (EDAF, Ramanovský zesilovač). Systémy s polovodičovými zesilovači dosahovali mnohem horších výsledků. Dosah linek s polovodičovými zesilovači byl při požadované bitové chybovosti 10^{-12} o desítky kilometrů nižší, než v případě vláknových zesilovačů. Pro nasazení v navrhované metropolitní síti jsem na základě výsledků simulací zvolil zesilovač EDFA. Jeho výhodou oproti Ramanovskému zesilovači je nižší cena a potřeba méně výkonného čerpacího zdroje.

V simulacích jsem také porovnával výkonnost systémů v závislosti na umístění zesilovače na přenosové trase. Největší dosah měly linky s průběžným zesilovačem. Z důvodů uvedených v kapitole 9.4 jsem pro navrhovanou metropolitní síť zvolil umístění zesilovače jako předzesilovač. Při simulacích se ukázalo, že při zapojení jako výkonový zesilovač je

výkon zesilovače ovlivněn vysokou úrovní vstupního signálu a dochází k saturaci zisku. Z toho důvodu bylo v simulacích s Ramanovským a polovodičovým zesilovačem třeba omezit úroveň vstupního signálu zapojením atenuátoru před zesilovač. V dalších simulacích jsem porovnal velikost přidaného šumu při zapojení jednoho výkonného nebo dvou méně výkonných zesilovačů. Simulace ukázaly, že zapojení více zesilovačů s menším výkonem je z hlediska přidaného šumu vhodnější.

Nakonec jsem provedl návrh metropolitní sítě s vlnovým multiplexem. Jako vhodnou topologii jsem zvolil topologii s dvěma propojenými kruhy. Určil jsem vhodná optická vlákna a vlnové délky, na kterých by měl systém pracovat. Simulacemi jsem ověřil funkčnost návrhu jak v normálním stavu, tak ve stavu s poruchou.

Použitá literatura

- [1] FILKA, M. *Optoelectronics for telecommunications and informations*. Texas: Inc., Publishers, 2009. ISBN 978-0-615-33185-0.
- [2] CONNELLY, M. *Semiconductor Optical Amplifiers*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2004. 169s. ISBN 0-7923-7657-9.
- [3] BECKER, Philippe C.; OLSSON, N. Anders; SIMPSON, Jay R. *Erbium-Doped Fiber Amplifiers : Fundamentals and Technology*. San Diego : Academic Press, 1999. 460 s. ISBN 0-1208-4590-3.
- [4] HEADLEY, Clifford; AGRAWAL, Govind. *Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems*. San Diego : Elsevier Academic Press, 2004. 392 s. ISBN 0-12-044506-9.
- [5] MITSCHKE, Fedor. *Fiber Optics : Physics and Technology*. London : Springer, 2010. 392 s. ISBN 978-3-642-03702-3.
- [6] GUMASTE, Ashwin; ANTONY, Tony. *DWDM Network Designs and Engineering Solutions*. Indianapolis : Cisco Press, 2002. 368 s. ISBN 1-58705-074-9.
- [7] RAMAMURTHY, Byrav; INESS, Jason; MUKHERJEE, Biswanath. Optimizing Amplifier Placements in a Multiwavelength Optical LAN/MAN: The Equally Powered-Wavelengths Case. *Journal of lightwave technology*. 1998, 09, s. 1560-1569.
- [8] CHAUGULE, Sachin; MORE, Ashish. WDM and Optical Amplifier : Wavelength Division Multiplexing. *2010 2nd International Conference on Mechanical and Electronics Engineering (ICMEE 2010)*. 2010, 2, s. 232-236.
- [9] IWATSUKI, Katsumi; KANI, Jun-ichi; SUZUKI, Hiro. Access and Metro Networks Based on WDM Technologies. *Journal of lightwave technology*. 2004, 11, s. 2623-2630.
- [10] ROCHA, M.L., et al. Amplifier placement in metro-scaled wavelength-routed network. *Electronics letters*. 2003, 3, s. 302-305.
- [11] ELLINAS, G.; ANTONIADES, N. Evolving Trends for WDM Metro Network Architectures. *Journal of lightwave technology*. 2005, 5, s. 300-302.

[12] FERNANDEZ, P., et al. A new amplifier placement scheme to reduce noise in WDM networks. *Communications World*. 2001, 1, s. 119-124.

[13] JENKINS, David W.; SCHOLTENS, Dale A. Metro WDM Network Design & Evolution: Positioning for the Transition to Optical Meshes. *74.1717E Rev. B*. 2011, 2, s. 1-9.

[14] BERTHOLD, Joseph; BLAIR, Loudon; SIMMONS, Jane M. Optical Networking: Past, Present, and Future. *Journal of lightwave technology*. 2008, 9, s. 1104-1118.