

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE
FACULTY OF TRANSPORTATION SCIENCES

ING. LEOŠ BOHÁČ, PH.D.

VLIV OPTICKÝCH ZESILOVAČŮ NA KVALITU PŘENOSU V OPTICKÝCH TRASÁCH

INFLUENCE OF OPTICAL AMPLIFIERS ON OPTICAL-LINE TRANSMISSION QUALITY

Summary

An optical fiber as a transmission medium gained over the last ten years almost exclusive role in communication and data networks. Its advantages, such as huge bandwidth potential, small size, low weight, acceptable price and high resistance to the external interference are so attractive properties that a fiber is being applied today even in areas where originally only systems based on copper cable networks seemed to be usable.

The undeniable advantage of the optical fiber is mainly in those communication systems, where the high bit rate transmission of information between network nodes is required for a long distance of several tens, hundreds or even several thousands of kilometers. In recent years, however, the optical fiber as a medium also extensively finds its place in networking systems of smaller coverage, where it is attracting for its small size, low weight and sufficient margin of transmission capacity that ensures it will not be necessary in the short term to redesign a whole network and change the media, which significantly reduces the total costs of ownership. The fiber takes important role in these installations, where a high resistance to ambient electromagnetic interference is required, particularly where high number of cables is to be placed in reduced spaces.

It is not therefore surprising that the advantages of optical fiber and associated optical networks that form the superstructure of the system are attracted by industries such as aerospace and automotive. Optical networks allow for military and commercial applications in aviation to create a flexible communications infrastructure with high bandwidth, potentially low cost and weight. Key issues include the ability of associate optoelectronic components and resulting optical network architecture to perform required tasks even in a hostile environment. Practical solutions focused on the use of fiber optics in aircraft must comply with the requirements for the small size, weight and maximum power savings, something that cannot be easily achieved only with the individual components of the system. This can be solved only with integrated photonics and electronics. Every optical system based on optical fibers has its own limitations. For long-haul lines this is a limitation of the insertion loss of the fibers used in the path. In optical networks with a short length fiber its loss is not a issue, but rather that of other optical components such as splitters, modulators, polarizers, etc.

The today's trend in optical system design is to employ similar methods as are used for the manufacture of integrated electronic circuits, i.e. photonic integration (PIC). There are several initiatives running in Europe today striving to bring a very expensive technology of photonic chips manufacturing and integration closer to the end users. This activity theoretically in the near future might potentially lead to ease production of photonic chips performing specific function.

It should be said that the photonic integration in many cases requires the presence of an integrated component that amplifies the optical signal, i.e. the optical amplifier is needed. And this is just a topic closely elaborated in this work. The objective is to briefly analyze most of the constraints posed by the application of optical amplifiers on long-haul optical lines and to provide a deeper analysis of the issues that deployment of optical fiber amplifiers doped with Er element brings into the optical line design specifically when coping with compensation of chromatic dispersion.

Souhrn

Optické vlákno jako přenosové médium získalo za posledních deset let téměř výhradní postavení v komunikačních a datových sítích. Jeho nesporné výhody, jako je šířka pásma, rozměry, hmotnost, cena a odolnost proti vnějšímu rušení jsou natolik lákavé, že se začíná v praxi uplatňovat i v oblastech, kde původně zastávaly podobnou funkci jen systémy založené na metalických kabelových rozvodech.

Nesporná výhoda použití optického vlákna je především u těch komunikačních systémů, kde je požadován přenos mezi uzly sítě s velkou přenosovou rychlostí nebo na dlouhé vzdálenosti několika desítek, stovek až tisíc kilometrů. V posledních letech se ale optické vlákno jako médium též významně prosazuje u sítí a systémů s menší rozlohou, kde je atraktivní díky svým malým rozměrům, hmotnosti a dostatečné rezervě přenosové kapacity, která zaručuje, že nebude nezbytné v krátké době renovovat rozvody, což snižuje celkové náklady. Nezanedbatelnou roli v těchto instalacích, kde je často vysoká hustota kabelů, které musí být instalované do vymezených prostor, hraje i vysoká odolnost vlákna proti elektromagnetickému rušení z okolí a taktéž mezi vlákny samotnými.

Není tedy vcelku s podivem, že si předností optických vláken a s nimi spojených optických sítí, které tvoří jejich systémovou nadstavbu, všímají i obory jako je letectví a automobilový průmysl. Optické sítě umožňují pro vojenské a komerční aplikace v letectví vytvořit flexibilní komunikační infrastrukturu s vysokou propustností, potenciálně nízkou cenou a hmotností. Mezi klíčové úkoly patří schopnost přidružených optoelektronických komponent, systémů a výsledné optické síťové architektury plnit požadované úkoly i v „nehostinném“ prostředí. Praktická řešení zaměřená na využití vláknové optiky v letadlech musí splnit požadavky na minimální rozměry, hmotnost a maximální úsporu energie, něco co nelze jednotně zajistit jen s individuálními komponentami systému. Toto lze řešit jen integrovanou fotonikou a elektronikou.

Každý optický systém založený na optických vláknech má také svá omezení. U dlouhých tras se jedná o omezení dané konečným vložným útlumem použitých vláken na trase. U optických sítí s menším rozsahem sice není útlum vlákna kritickým faktorem, ale naopak další optické komponenty, jako jsou rozbočovače, modulátory, polarizátory apod.

Dnešním trendem v oblasti optických systémů je využití podobných metod pro návrh a výrobu optického systému, které se používají pro výrobu integrovaných elektronických obvodů, tj. fotonickou integraci (PIC). V rámci Evropy dnes existuje několik iniciativ, které se snaží přiblížit velice drahé technologie výroby fotonických čipů blíže uživatelům. Pokud se tato aktivita prosadí, bude možné si teoreticky nechat v blízké budoucnosti vyrobit na zakázku fotonický čip, který plní určitou funkci.

Dlužno říci, že fotonická integrace v mnoha případech bude vyžadovat přítomnost integrovaného prvku, který zesílí intenzitu signálu, tedy bude zapotřebí optický zesilovač. A právě toto téma souhrnně rozpracovává tato práce. Cílem je stručná analýza většiny omezení, které přináší aplikace optických zesilovačů nasazených na dlouhé optické trasy a hlubší rozbor problematiky nasazení vláknových zesilovačů, dopovaných prvkem Er v optických trasách, u nichž je zapotřebí kompenzovat jejich chromatickou disperzi.

Klíčová slova: optický vláknový zesilovač, polovodičový optický zesilovač, Erbiem dopované optické vlákno, optické nelinearity, zesílený šum spontánní emise, chromatické disperze, nelineární Schrödingerova rovnice, vlastní fázová modulace, čtyřvlnné směšování, DWDM.

Keywords: optical fiber amplifier, semiconductor optical amplifier, Erbium doped optical fiber, optical nonlinearities, amplified spontaneous emission noise, chromatic dispersion, nonlinear Schrödinger equation, self-phase modulation, four-wave mixing, DWDM.

Obsah

1	ÚVOD	6
2	TYPY OPTICKÝCH ZESILOVAČŮ	6
2.1	POLOVODIČOVÝ OPTICKÝ ZESILOVAČ	6
2.2	OPTICKÝ VLÁKNOVÝ ZESILOVAČ S DOTOVANÝM VLÁKNEM	7
2.3	RAMANŮV OPTICKÝ VLÁKNOVÝ ZESILOVAČ.....	8
2.4	POROVNÁNÍ RŮZNÝCH TYPŮ OPTICKÝCH ZESILOVAČŮ.....	8
3	VLIVY POUŽITÍ OPTICKÝCH ZESILOVAČŮ NA KVALITU OPTICKÉ TRASY A OPTICKÝCH SÍTÍ.....	9
4	MODEL OPTICKÉHO DOTOVANÉHO VLÁKNOVÉHO ZESILOVAČE	10
5	VLIV POLOHY OPTICKÉHO ZESILOVAČE NA KOMPENZACI DISPERZE OPTICKÉ TRASY POMOCÍ DCF VLÁKNA	13
6	ZÁVĚRY Z VÝZKUMU KOMPENZACE CHROMATICKÉ DISPERZE TRASY DCF VLÁKNEM	18
7	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	22
8	ODBORNÝ ŽIVOTOPIS	26

1 Úvod

Na dnešní optické telekomunikační systémy jsou neustále kladeny větší a větší nároky z hlediska přenosové kapacity. Návrh moderních optických transportních systémů se soustřeďuje na minimalizaci nákladů, větší spolehlivost a zvyšování informační propustnosti. Optické zesilovače v tomto ohledu hrají důležitou roli, protože nabízí realizace velice dlouhých optických tras se zachováním optické transparentnosti, která je klíčová pro neustálý proces navyšování kapacity v budoucnosti.

Tato práce si klade za cíl stručně provést souhrn různých typů optických zesilovačů a vlivů s ohledem na kvalitu přenosu. Dlužno říci, že tato problematika je velice rozsáhlá a není tedy možné v omezeném rozsahu této publikace provést detailní rozbor všech aspektů souvisejících s nasazením optických zesilovačů do optických tras. Z tohoto důvodu se další část práce cíleně soustřeďuje na detailnější analýzu jen jedné oblasti, která byla mnou v rámci výzkumných aktivit podrobněji zkoumána.

2 Typy optických zesilovačů

Optické zesilování signálu se stalo velice podstatnou funkcí v oboru optických vláknových systémů, použitých pro telekomunikační účely. Hlavní úlohou optického zesilovače je zesílit intenzitu optického signálu a pokrýt tak ztráty vznikající v předchozím úseku optického vlákna. I když jsou vložné ztráty u moderních optických vláken velice malé, na dlouhých úsecích několika set kilometrů nejsou již zanedbatelné a bez optického zesílení by nebylo možné takto dlouhé trasy opticky a vlnově transparentně provozovat.

Alternativním řešením je použití konverze z optické roviny do roviny elektrické, zde provedení regenerace signálu do patřičného stavu a opětovné převedení do roviny optické. Toto řešení se dnes v telekomunikační praxi také používá, nicméně pro optické systémy s vlnovým dělením kanálů je toto řešení příliš nákladné a také se celá trasa stává závislá na technologii použitých opakovačů, které jsou ve většině případů navrženy pro konkrétní optický systém, což znemožňuje snadný „upgrade“ na jiný, výkonnější systém v budoucnosti.

Optické zesilovače dnes tedy hrají velice důležitou roli v optických systémech a činí z optických tras vlnově transparentní, snadno „upgradovatelný“ systém.

Dnes existuje několik technických možností, jak lze zesílit optický signál. V následujících kapitolách stručně shrnu tři základní typy optických zesilovačů, tak, jak se s nimi dnes můžeme setkat v telekomunikační praxi, ale také ve výzkumu moderních optických komunikačních systémů. Dlužno říci, že všechny níže uvedené principy jsou založeny na stejném jevu stimulované emise záření, který v každém typu optického zesilovače vzniká přivedením patřičného zdroje čerpací energie.

2.1 Polovodičový optický zesilovač

Princip funkce polovodičového optického zesilovače spočívá ve využití aktivní vrstvy polovodičového laseru k zesílení optického záření. Aby však nedošlo k oscilačnímu optickému jevu (k němu dochází běžně u laserů), je nutné úplně nebo částečně odstranit vliv odrazných ploch na konci a začátku čipu. Polovodičové optické zesilovače prošly stadiem intenzivního výzkumu [1], [2] a [3]. Výhoda polovodičového zesilovače tkví ve snadné integraci na optický čip. Další výhodou je možnost použít polovodičový optický zesilovač jako optickou bránu, která propouští světlo pouze tehdy, protéká-li jejími svorkami budící proud (řádově desítky mA) [4], [5], [6]. Polovodičový optický zesilovač může výhodně fungovat také jako optický vlnový konvertor [7]. I když má polovodičový optický zesilovač celou řadu předností, jeho jistá nevýhoda spočívá v nemožnosti použít tento princip zesílení u systémů s vysokohustotní vlnovou multiplexací [8], [9], [10]. Vzhledem k velice krátké reakční době chování optického zisku uvnitř aktivní dutiny by docházelo ke vzniku silného intermodulačního zkreslení. Řešením tohoto problému je využití lineárního polovodičového optického zesilovače [11], [12], [13]. Principiální funkce spočívá v tom, že kolmo k dutině tradičního polovodičového zesilovače je vytvořen

laser s vertikální dutinou, který má distribuovaná Braggova zrcadla umístěná pod a nad aktivní dutinou (vertikálně tedy září příčná dutina vertikálního laseru). Ten poté funguje jako regulátor podélného zisku aktivní dutiny.

2.2 Optický vláknový zesilovač s dotovaným vláknem

Princip funkce optických vláknových zesilovačů je založen na dotaci optického vlákna (většinou SiO_2) vhodným prvkem vzácných zemin [14]. Zesilovací efekt vzniká přivedením čerpacího laserového zdroje záření s vlnovou délkou 980 nm nebo 1480 nm [14]. Nejvíce rozšířeným typem je v současnosti zesilovač, založený na dotaci chemického prvku Erbium (Er). Takto vyrobený zesilovač je schopen zesilovat přibližně ve spektrální oblasti od 1530 nm do 1565 nm, tedy ve třetím optickém telekomunikačním vlnovém pásmu.

Problematika návrhu těchto zesilovačů je jak teoreticky, tak i prakticky, značně široká a není tedy možné se jí v tomto přehledu věnovat do detailu. Existuje celá řada odborných knih se zaměřením na tuto problematiku [14], [15], [16], [17]. Erbiem dotované zesilovače jsou dnes komerčně dostupné s možností výběru podle různých parametrů, k nimž zejména patří následující:

- zisk při malých vstupních optických signálech (dnes i kolem 50 dB, typicky kolem 20-35 dB)
- výstupní saturační výkon (většinou kolem 10-30 dBm, ale mohou být i jednotky wattů při dotaci prvky Er a Yb)
- šumové číslo F (pohybuje se v rozmezí od 4 do 8 dB, průměrně kolem 5 dB)
- závislost šumového čísla na vlnové délce
- závislost zisku na výstupní optické úrovni (popř. jiná křivka, která charakterizuje saturační vlastnosti zesilovače)

Erbiem dotovaný vláknový zesilovač (EDFA) je pro pomalou reakci [60] změny zisku na vstupním výkonu velice výhodný u systémů s vysokohustotní vlnovou multiplexací (DWDM), protože na rozdíl od polovodičového optického zesilovače není zdrojem nelineárního zkreslení.

Jistým problémem u prvních aplikací EDFA zesilovačů bylo, že zisk nebyl konstantní podél celého vlnového spektra, ale vykazoval vcelku patrné převýšení v oblasti nižších vlnových délek [60]. Toto při aplikaci u systémů DWDM vede na konci trasy ke značnému rozdílu v přijímaných úrovních, což může způsobit zvýšenou chybovost některých kanálů. Situace je o to horší, když jsou v optické trase zařazeny EDFA zesilovače v kaskádě, protože v tomto případě dochází ke zvýraznění ziskové špičky [61]. Toto potom může vést k neúnosnému rozdílu v optické úrovni mezi krajními DWDM kanály až o 30 dB a více [61]. Proto se první EDFA zesilovače používaly jen pro horní části ziskového spektra od 1540 – 1560 nm, kde je zisk rovnoměrný, avšak za cenu zúžení spektra na cca 20 nm, což je v dnešní době nepostačující. Proto se začaly zkoumat možnosti spektrálního vyrovnání zisku po celém použitelném C-pásmu [18],[19],[20],[21],[22],[23]. V dnešní době existuje více možností, jak toto spektrální vyrovnání realizovat. Většinou se jedná o použití optických filtrů uvnitř zesilovače (flattening filtr) např. na bázi vláknových Braggových mřížek [18],[21].

U EDFA zesilovačů dnes existují následující problémy, které se intenzivně zkoumají:

- možnost použít zesilovač v širším spektru [24],[25], důvodem je samozřejmě možnost přenosu většího počtu DWDM kanálů jedním optickým vláknem. V dnešní době lze použít EDFA zesilovač také v L-pásmu za cenu snížení inverze a zvětšení délky Er dotovaného vlákna v zesilovači [26],[27],[28]. Dále se zkoumá vliv posunu vlnové délky čerpacího zdroje, popř. možnost použití generovaného spontánního šumu (ASE) jako alternativní pumpy [29],[30]
- problém s dynamikou zisku při vydělování DWDM kanálů - ten souvisí s tím, že při vydělení či výpadku určitého počtu DWDM kanálů v optickém vlákně dojde u EDFA zesilovače ke změně zisku s relativně dlouhou časovou periodou (několik desítek mikrosekund až milisekundy). Tato vlastnost způsobuje problémy při návrhu plně optických sítí, kde je cílem flexibilní vydělování a začleňování kanálů tak, aby se jednotlivé kanály vzájemně co do výkonu neovlivňovaly [31]

- použití Er prvku pro výrobu planárních zesilovačů, jedná se o podobu EDFA v integrované planární verzi [32],[33].

Za účelem zvětšení šířky použitelného spektra se zkoumají možnosti jiných prvků dotace, jako je Praseodymium (Pr) [34],[35],[36] nebo Neodymium (Nd) [37] pro oblast v okolí 1300 nm nebo Thullium (Tm) [38] pro využití v pásma S-Band od 1490 nm.

2.3 Ramanův optický vláknový zesilovač

Poslední ze třídy optických zesilovačů, které se v dnešní době s nástupem vysokohustotního systému sdružování používají, jsou zesilovače, které ke své funkci využívají jevu stimulovaného Ramanova rozptylu (SRS), vznikajícího při dostatečně silném výkonu optického signálu (pumpy), navázaného do jednovidového (0,5 - 1 W) [39],[40]. Při této konfiguraci dochází k zesílení optického signálu ve spektrálním pásmu kolem 50 nm (jen pásmo rozumně použitelné pro zesílení), posunutého o 100 nm nad vlnovou délku výkonného čerpacího zdroje. Zesilovací účinek vznikající při vzniku Ramanova rozptylu je známý celou řadu let, nicméně až v poslední době s dostupností dostatečně výkonných polovodičových laserů začíná tento jev nacházet reálné uplatnění v optických systémech jako zesilovač. Na rozdíl od EDFA nebo polovodičových zesilovačů je Ramanův zesilovač distribuovaným typem optického vláknového zesilovače, u něhož se zesiluje signál průběžně podél celého úseku optického vlákna za předpokladu, že dosahuje optický výkon čerpacího zdroje dostatečné prahové hladiny pro vznik Ramanova rozptylu.

Flexibilita použití Ramanovo zesilovače spočívá v možnosti nasazení v širší spektrální oblasti. Dnes se Ramanův zesilovač používá většinou v kombinaci s EDFA zesilovači na optické trase.

2.4 Porovnání různých typů optických zesilovačů

Porovnání některých vlastností s dotovanými typy je v souhrnu uvedeno v Tab.1. Kromě výše uvedených parametrů se Ramanův zesilovač vyznačuje také obecně nižším šumem.

Tab.1 - Porovnání vlastností Ramanova zesilovače a vláknových zesilovačů s dotací prvky vzácných zemin

Charakteristiky	Dotovaný vláknový zesilovač	Ramanův zesilovač
Pásmo zesílení	závisí na dotačním prvku	závislá jen na λ čerpacího optického zdroje
Šířka pásma	30 nm, širší pro více dopantů	48 nm, širší pro více čerpacích zdrojů s různými λ
Zisk	20 dB nebo více, závisí na koncentraci iontů, výkonu čerpacího zdroje a délce vlákna	4–15 dB, úměrný výkonu čerpacího zdroje a délce vlákna
Saturační výkon	závisí na materiálu	přibližně se rovná výkonu čerpacích zdrojů
λ čerpacího zdroje	980 nm nebo 1480 nm pro EDFA	100 nm níže položený, než je vlnová délka signálu (jedná se o špičku zisku)

3 Vlivy použití optických zesilovačů na kvalitu optické trasy a optických sítí

Optické zesilovače, jak již bylo popsáno dříve, tvoří nezbytnou součást optického systému, pokud je zapotřebí překlenout dlouhé vzdálenosti, kdy útlum optického vlákna je natolik značný, že by intenzita přijímaného signálu na straně detektoru přijímacího systému byla tak malá, že by zanikla v šumu a nebylo by možné signál v přijímači kvalitně přijmout.

S pozitivními vlastnostmi optických zesilovačů jdou ruku v ruce i negativní vlastnosti, nebo i jiné možnosti, které by nebylo možné díky přítomnosti zesilovače v trase realizovat (např. solitonový přenos).

V této kapitole bude proveden stručný rozbor kritických aspektů, které mohou výrazně ovlivnit kvalitu trasy, a je tedy nutné se jimi blíže zabývat. Vzhledem k rozsáhlosti problematiky není možné se v požadovaném rozsahu věnovat všem aspektům. Proto se v následující stati zaměřím jen na užší oblast této rozsáhlé problematiky, kterou jsem se zabýval ve svém výzkumu, tj. na zkoumání vlivu použití optického vláknového zesilovače na kompenzaci disperze s použitím disperzi kompenzujícího vlákna (DCF).

Zkoumání vlivů použití optických zesilovačů na kvalitu trasy lze rozdělit do dvou základních kategorií, a to na oblast jednobandových optických systémů a vícebandových vlnových systémů, které jsou založeny na přenosu několika desítek až stovek modulovaných vlnových délek, které se přenáší vláknem současně.

Optický zesilovač umožňuje zesílení optického signálu na takové hladině optického výkonu, že se mnohdy dostáváme do nelineárního režimu optického vlákna. Další neméně významnou omezující vlastností optických zesilovačů je limitovaná šířka pásma, která se systémově uplatní u širokopásmových vícebandových optických systémů s vlnovou multiplexací. Se spektrem zisku také souvisí zužující se pásmo zesílení u kaskádově řazených zesilovačů (nejčastěji EDFA) vlivem jevu „gain peaking“. Tyto nedostatky se však dají odstranit vhodným filtrem. U polovodičových zesilovačů, které mají rychlou reakci zisku, se setkáváme s jevy silného intermodulačního zkreslení, které pokud není vhodně kompenzováno (viz dříve), vylučuje použití tohoto typu zesilovače na trase ve vícebandových optických systémech s vlnovou multiplexací. Nezanedbatelnou roli u každého optického zesilovače hraje také všudypřítomný optický šum, který se u optických zesilovačů projevuje jako důsledek zesílené spontánní emise záření (ASE) v aktivní části optického zesilovače (dutina u polovodičového zesilovače nebo načerpaný úsek vlákna u vláknového zesilovače).

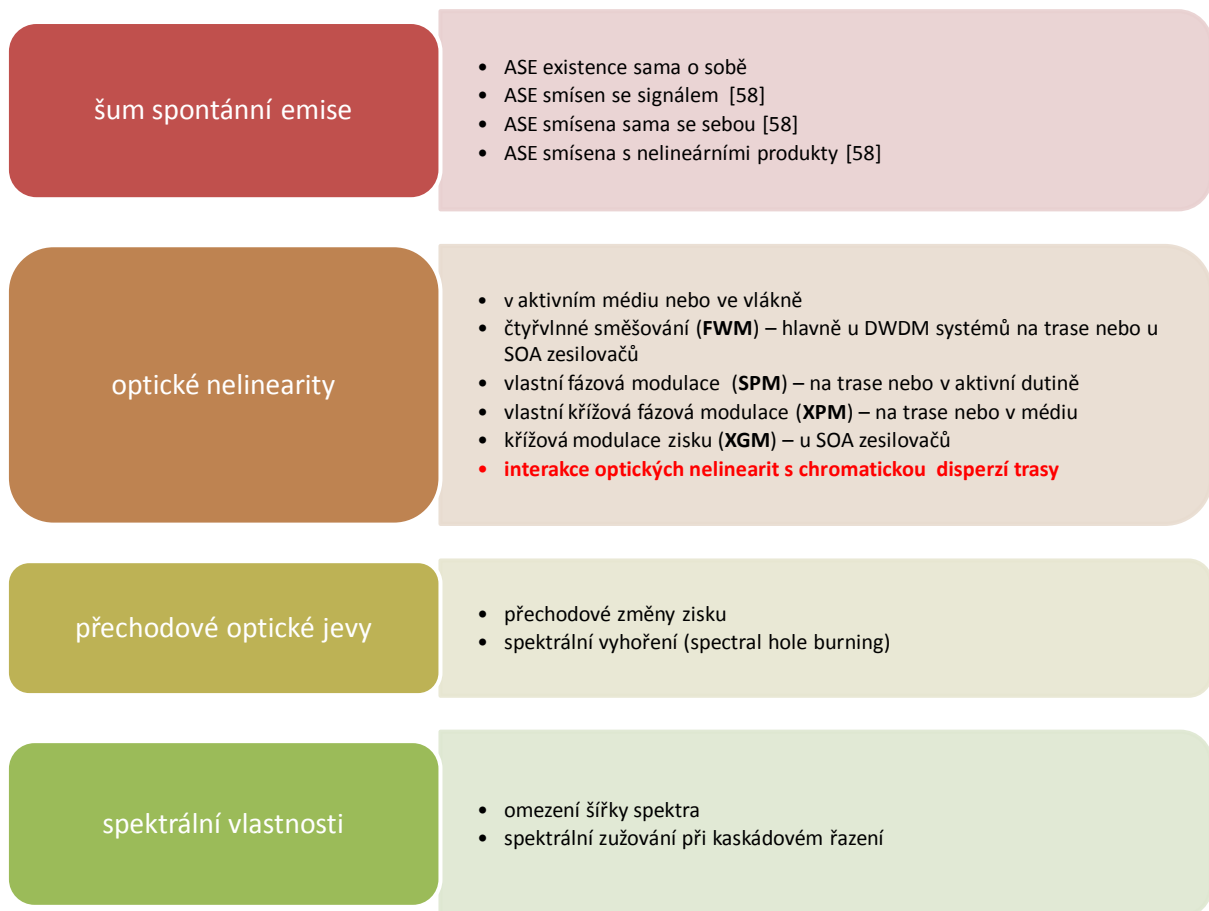
Dalším velice významným omezujícím faktorem nasazení zesilovačů do optických vláknových sítí je jejich dynamické chování zisku pro jednotlivé kanály u vícebandového systému. V tomto případě může docházet k dynamické změně zisku (optický přechodový efekt) v závislosti na přítomnosti či nepřítomnosti signálů v sousedních nebo i vzdálených kanálech. Tato problematika není dnes ještě uspokojivě řešena, aby se případné řešení dalo efektivně (cena, snadnost výroby, spolehlivost) nasadit v praxi.

V zásadě lze na zobecněné rovině nalézt následující efekty, které úzce souvisí s nasazením optických zesilovačů do vláknového komunikačního řetězce:

- a) zdroj přídavného šumu spontánní emise záření (ASE) a jeho interakce se signálem a popř. nelineárními spektrálními produkty na optickém detektoru přijímače [41],[42],[43],[44]
- b) spektrální omezení zisku pro velký počet kaskádově řazených optických zesilovačů [61]
- c) optické nelinearity
 - a. nelineární optická interakce záření uvnitř aktivní části optického média (převážně jen u polovodičových zesilovačů, kdy dochází ke křížové interakci dvou záření, buď jako změna zisku, a nebo změna optické fáze) [45]

- b. nelineární interakce záření v přilehlém úseku vlákna díky vyššímu výstupnímu výkonu optického zesilovače na jeho výstupu [46],[47],[48],[49],[50]
- c. nelineární interakce optického záření s chromatickou disperzí trasy – zde lze najít optický režim, který se stává místo omezujícího spíše produktivním. Jedná se o režim solitonového přenosu [51],[52],[53],[54],[55],[56]
- d) přechodové jevy u vícekanálových optických systémů s vlnovým dělením (více vlnových délek záření přenášených vláknem současně) [57].

Jak je patrné, vliv optického zesilovače na kvalitu přenosu má velice široký záběr a bylo by možné zde uvést velký rozsah prací věnovaných této problematice. Vzhledem však k požadovanému omezenému rozsahu této publikace se zaměřím jen na tu oblast, kterou jsem se zabýval ve svém výzkumu, tj. oblast vlivu EDFA zesilovačů na kompenzaci optické trasy pomocí disperzi kompenzujících vláken. Vliv zesilovačů je přehledně znázorněn na obr.1 s vyznačením oblasti, kterou se dále budu podrobněji zabývat v další části práce.



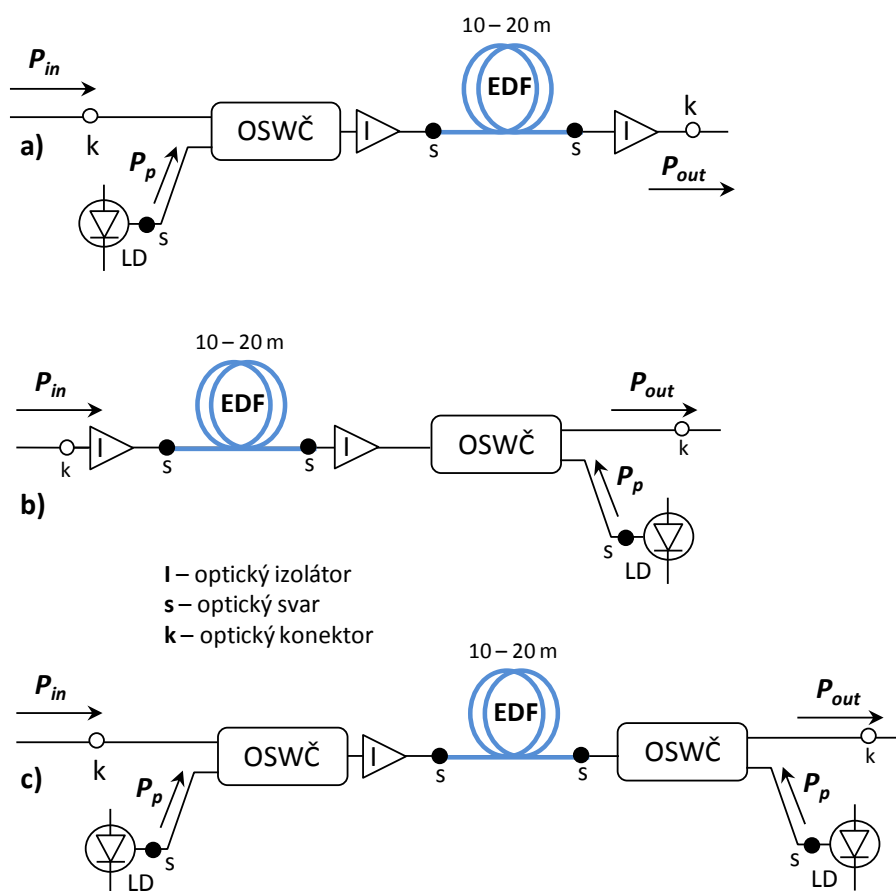
obr.1 – Souhrn efektů ovlivňujících kvalitu optické trasy (červeně je označena oblast, která je dále více rozpracována)

4 Model optického dotovaného vláknového zesilovače

Funkce optického vláknového zesilovače je založena na principu vzniku stimulované emise na atomech příměsí vzácných zemin, které jsou při výrobě vpraveny do materiálu optického vlákna. Základní myšlenka optického zesilování je v podstatě shodná s principem jakéhokoliv laseru, kde též dochází k zesilovacímu procesu. Principiální rozdíl mezi zesilovačem a laserem je ale v tom, že zatím co u laseru se generované záření vhodnou zpětnou vazbou vrací zpět do zesilovacího optického média a vzniká tak optický oscilátor (tedy laser), u zesilovače se cíleně tomuto jevu snažíme vyhnout, aby optická zpětná

vazba nevznikla a aktivní médium pouze zesilovalo. Pokud by k tomu došlo, stal by se ze zesilovače laser. Mimo jiné, optický vláknový zesilovač lze s výhodou též použít pro výrobu vláknových laserů.

Praktická principiální konfigurace dílčích komponent optického vláknového zesilovače je naznačena na obr.2. Jednou z nejpodstatnějších částí optického vláknového zesilovače, která ovlivňuje velice výrazně jeho výslednou kvalitu a parametry, je dotované vlákno, v našem obrázku označené jako EDF. Pro oblast požadovaných telekomunikačních pracovních vlnových délek se nejčastěji používají prvky jako Erbium (Er), Thulium (Tm), Ytterbium (Yb), Praseodym (Pr) a Neodym (Nd). Největšího komerčního uplatnění v telekomunikační praxi však doznaly zesilovače s optickým vláknem dopovaným erbiem, protože oblast zisku v tomto případě velice dobře pokrývá oblast vlnových délek v okolí 1550 nm, která se dnes v praxi používá nejčastěji pro vícekanálové telekomunikační systémy s vlnovou multiplexací, provozované na jednovidových vláknech. Ostatní dopanty lze použít, pokud je zapotřebí, aby optický vláknový zesilovač pracoval i v jiném rozsahu vlnových délek. Např. Thulium je vhodné jako dopant pro zesilování v pásmu 1450 nm – 1490 nm, což je tzv. S pásmo, Praseodymium se hodí pro zesilování v oblasti vlnové délky 1300 nm, což je také dnes používaná telekomunikační oblast, avšak jen na kratší vzdálenosti.



OSWČ – vlnově selektivní vazební článek
EDF – erbiem dopované optické SMF vlákno
LD – laserová čerpací dioda (980 nm, 1480 nm)

P_{in} – vstupní výkon signálu
 P_{out} – výstupní výkon signálu
 P_p – optický výkon čerpacího laseru LD

obr.2 – Principiální praktická realizace erbiem dotovaného vláknového jednostupňového zesilovače (EDFA); a) v tomto případě se erbiem dopované vlákno čerpá ve stejném směru ve kterém prochází zesilovaný signál zesilovačem (dopředné čerpání – „forward pumping“; b) v tomto případě se jedná o čerpání proti směru průchodu signálu (zpětné čerpání – „backward pumping“; c) zde se erbiem dopované vlákno cíleně čerpá v obou směrech současně (obousměrné čerpání – „bidirectional pumping“.

Podobně jako u modelu laseru, tak i zde (principy jsou podobné) lze pro matematický popis, či simulační model, použít kinetické rovnice (*rate equations*) [59]. Celý model je založen na ustáleném

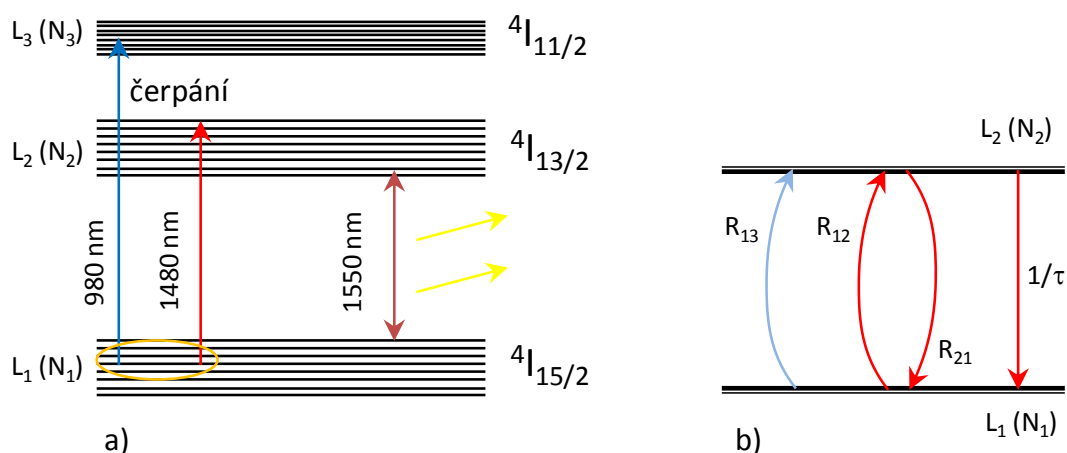
stavu obsazení populačních kvantových hladin a popisuje průběh výkonů (signál, čerpání a šum) podél souřadnice z dotovaného vlákna. Optické signály, které se šíří dopovaným EDF (Erbium Doped Fiber) vláknem reagují s lokálně excitovanými atomy erbia do daných kvantových hladin, což vede pro konkrétní vlnovou délku prostřednictvím stimulované emise nebo absorpce záření buď k zesílení, nebo útlumu užitečného signálu.

Ke spontánní emisi dochází také a ta je potom zesilovačem zesílena. U erbiem dotovaného vlákna hrají úlohu zesilování ionty erbia Er^{3+} , u nichž lze vhodným optickým čerpáním zajistit přechod jejich elektronů mezi různými kvantovými hladinami. Atomy Erbium umožňují celou řadu přechodů mezi svými kvantovými stavy, nicméně, pro vlnové délky našeho zájmu jsou důležité jen ty, které jsou naznačené na obr.3a.

V tomto případě se jedná o využití tří atomových excitačních stavů. Pro zesilovací efekt je zapotřebí, stejně jako u laseru, zajistit populační inverzi, tj. dosáhnout, aby na vyšší energetické hladině bylo více elektronů, než na nižší energetické hladině, k čemuž při termální rovnováze nedochází a je tedy nutné přivést čerpací energii do dotovaného vlákna. Pro případ EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) zesilovače lze použít záření o dvou vlnových délkách, 980 nm nebo 1480 nm.

První vlnová délka čerpání se používá u zesilovačů s požadavkem na nižší šum a je dnes častější, než dříve používaná vlnová délka 1480 nm, která ale umožňuje větší efektivitu čerpání a vyšší výstupní výkon. V některých případech se používají dvoustupňové zesilovače, které používají obě tyto čerpací vlnové délky.

V případě čerpání z hladiny L_1 zdrojem záření o vlnové délce 980 nm se atomy erbia dostávají velice rychle z hladiny L_3 a potom do hladiny L_2 (doba přechodu mezi L_3 a L_2 je kolem $1 \mu s$), což výrazně zmenšuje možnost vzniku stimulované emise z hladiny L_3 , čímž lze přejít od kvantového modelu se třemi hladinami na model se dvěma hladinami, viz. obr.3b.



obr.3 – Atomové úrovně iontu erbia v optickém vlákne; a) tříúrovňový systém s přechodovým stavem L_3 , který lze zjednodušit na dvouúrovňový b)

Výraznou výhodou je, že atom erbia zůstává na hladině L_2 relativně dlouhou dobu τ (od 8 ms až do 10 ms) a umožní zde tak vznik účinné stimulované emise záření. V tomto případě parametr R_{13} [1/s] na obrázku obr.3b představuje rychlost absorpce čerpacích fotonů z čerpacího zdroje, R_{12} [1/s] je rychlost stimulované absorpce a R_{21} [1/s] rychlost stimulované emise záření, která souvisí se zesílením zesilovače.

Pro odvození chování celého EDFA zesilovače lze vyjít z následujících kinetických rovnic, které určují, jakým způsobem se bude měnit výkon daného signálu podél celého úseku z erbiem dotovaného vlákna od začátku až na konec. Detailní rozbor níže uvedených rovnic lze dále nalézt v [59],[60],[62].

$$\frac{dP_p}{dz} = (N_2\sigma_p^{(e)} - N_1\sigma_p^{(a)})\Gamma_p P_p - \alpha_p P_p \quad (1)$$

$$\frac{dP_s}{dz} = (N_2\sigma_s^{(e)} - N_1\sigma_s^{(a)})\Gamma_s P_s - \alpha_s P_s \quad (2)$$

$$\frac{dP_A^+(v_j)}{dz} = (N_2\sigma_{v_j}^{(e)} - N_1\sigma_{v_j}^{(a)})\Gamma_s P_A^+(v_j) + N_2\sigma_{v_j}^{(e)}\Gamma_s h v_j \Delta v_j - \alpha_{v_j} P_A^+(v_j) \quad (3)$$

$$\frac{dP_A^-(v_j)}{dz} = -(N_2\sigma_{v_j}^{(e)} - N_1\sigma_{v_j}^{(a)})\Gamma_s P_A^-(v_j) - N_2\sigma_{v_j}^{(e)}\Gamma_s h v_j \Delta v_j + \alpha_{v_j} P_A^-(v_j) \quad (4)$$

kde,

P_p, P_s, P_A – optické výkony čerpacího laseru, signálu a šumu (P^+ dopředný, P^- zpětný) [W]

N_1, N_2 – hustota obsazení základní a excitované kvantové hladiny [$1/m^3$]

$\sigma_p, \sigma_s, \sigma_{v_j}$ – kvantové „cross sekce“ interakce fotonů s elektrony na dané kvantové hladině na dané vlnové délce (s – signálu, p – čerp. pumpy, v_j – uvažované šumové složce frekvence v_j) [m^2]

$\alpha_p, \alpha_s, \alpha_{v_j}$ – faktor útlumu pro na dané vlnové délce (s – signálu, p – čerp. pumpy, v_j – uvažované šumové složce frekvence v_j) [$1/m$]

Γ - činitel překrytí příčné oblasti vidu a oblasti dotace s ionty erbia [-]

h – Plankova konstanta. [J.s]

Výše uvedený model je použit v následující části práce pro modelování vlastností EDFA zesilovačů, které zde plní na trase funkci předzesilovače a výkonového zesilovače, bez nutnosti průběžných zesilovačů.

5 Vliv polohy optického zesilovače na kompenzaci disperze optické trasy pomocí DCF vlákna

Většina dnes instalovaných optických vláken (ve formě kabelů) jsou vlákna jednovidová dle doporučení G.652 ITU (*International Telecommunication Union*) s nulovou disperzí skupinové rychlosti *GVD* (*Group Velocity Dispersion*) při vlnové délce $\lambda = 1300$ nm. Tato vlákna však ve vlnovém pásmu v okolí vlnové délky $\lambda = 1550$ nm vykazují již tak velkou disperzi skupinové rychlosti *GVD*, že je nezbytné provést její kompenzaci, aby se zabránilo nadměrné intersymbolové interferenci *ISI* (*InterSymbol Interference*), a tím i zvětšené bitové chybovosti *BER* (*Bit Error Rate*). Tato intersymbolová interference je tím závažnější, čím větší rychlostí se data optickým vláknem přenáší a její vliv roste obecně s druhou mocninou přenosové rychlosti, což je dáno tím, že se zvětšením rychlosti se zkrátí délka bitového intervalu a zároveň se zvětší šířka pásma signálu (dáno klasickým principem modulace), což má vliv na roztažení pulsu, které je úměrné právě šířce spektra signálu. Výše uvedená *ISI* je výrazná typicky pro přenosové rychlosti větší než 2,5 Gbit/s.

Pro kompenzaci výše uvedené disperze lze použít různé metody, jako je:

- kompenzace prostřednictvím disperzi kompenzujícího vlákna *DCF* (*Dispersion Compensating Fiber*),
- kompenzace pomocí speciálně vytvořené struktury v jádru vlákna známém pod pojmem *FBG* (*Fiber Bragg Gratings Fiber*),
- elektronickou kompenzací disperze, což však není optická metoda, ale elektronická metoda, při níž se disperze kompenzuje až při převodu optického signálu na signál elektrický,
- exotické metody pro kompenzaci disperze, jako je např. vidová konverze apod.

I přes nové metody kompenzace, které mají své výhody, jako je elektronická kompenzace trasy nebo kompenzace pomocí FBG mřížek, se stále jeví metoda kompenzace trasy pomocí DCF vlákna jako použitelná. I když by se mohlo zdát, že proces kompenzace disperze optického vlákna trasy je pouze o tom, jak do trasy začlenit příslušné kompenzátory, v praxi tomu tak není. Moderní optické systémy používají optické zesilovače, které jsou schopné zesílit optický signál na hodnoty úrovně až několik desítek dBm. V telekomunikacích se vždy snažíme navrhnout takový systém, aby mezi přijímačem a vysílačem nemusel být žádný mezilehlý prvek, pokud se jedná čistě o trasu bod-bod. Mezilehlé prvky, většinou aktivní komponenty, totiž znamenají problémy. Je nutné pro ně na trase vyčlenit místo, zavést k nim zdroj energie (většinou tyto prvky přímo nebo nepřímo provádí optické zesílení signálu nebo jeho elektrickou regeneraci a k tomu je zapotřebí elektrická energie), provést instalaci a monitorování. V neposlední řadě jakýkoliv prvek na trase je zdrojem poruch. Z hlediska modelu spolehlivosti se tedy jedná o sériové řazení, tj. výpadek libovolného uzlu na trase bod - bod (neuvažují zde komplexní síť, tam by to bylo poněkud složitější) znamená výpadek celé trasy. Z výše uvedených důvodů je vždy snaha, aby trasa byla složena jen z pasivního optického vlákna s minimálním počtem vložených komponent, protože každá taková komponenta vnáší do trasy útlum. Vzhledem k velice malému měrnému útlumu (α) standardních jednovidových vláken při vlnové délce 1550 nm kolem 0,2 dB/km znamená už jen jeden 1 dB vložného útlumu v trase navíc ekvivalent úseku trasy kolem 5 km. Délka trasy je tedy ovlivněna v prvním přiblížení jejím útlumem.

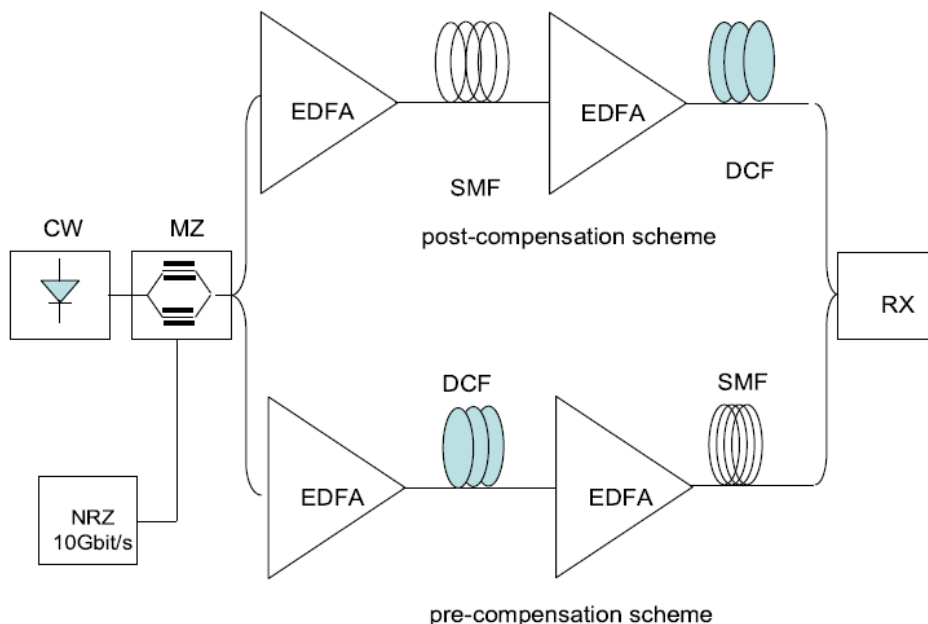
Optický přijímač není schopen přijímat signály slabší, než odpovídá limitu jeho celkového vlastního šumu (limit daný šumem fotodetektoru a celé elektronické části až k rozhodovacím obvodům) a samozřejmě deformacím signálu způsobeným např. disperzí vlákna. Jinými slovy, pro každý přijímač existuje tzv. „U“ křivka citlivosti, která určuje, v jakém intervalu úrovní vstupního výkonu vykazuje přijímač požadované hodnoty bitové chybovosti. V celé řadě aplikací se požadují hodnoty maximální bitové chybovosti v rozmezí od 10^{-9} do 10^{-12} . Vzhledem k omezením přijímače nelze tedy zvětšit délku trasy, aniž bychom zároveň adekvátně k tomu nezvětšovali i výkon na straně vysílače. A zde je zásadní problém. Optické vlákno se při zvětšujících se výkonech začíná chovat jako nelineární prvek, což má výrazný vliv na šířící se signál. Dlužno dodat, že toto nelineární zkreslení se vzájemně ovlivňuje s lineárním zkreslením, kterým je nahoře zmíněná disperze skupinové rychlosti GVD. Nelinearita optického vlákna způsobuje na výkonu závislou změnu fáze optického signálu (*SPM – Self Phase Modulation*), nebo pokud se setkají dva pulsy u systému WDM, dojde k jejich fázovému ovlivnění (*XPM – Cross Phase Modulation*), popř. ke vzniku nových vlnových délek, které původně ve spektru signálu na vstupu vlákna nebyly přítomné (*FWM – Four Wave Mixing*). Všechny výše uvedené jevy, včetně dalších jako je např. Ramanův rozptyl, jsou vzájemně svázané nelineární Schredingerovou rovnicí (NLSE).

Pokud se nyní vrátíme zpět k řešené problematice kompenzace disperze pomocí disperzi kompenzujícího vlákna DCF a přidáme nutnost použití optických zesilovačů na trasách (nebo v trasách, kde je značný počet pasivních prvků s velkým vložným útlumem), dostaneme se do situace, kdy řešení kompenzace touto metodou není triviální, protože pro zvětšující se výkony na vstupu optického vlákna se začnou různým způsobem uplatňovat všechny výše zmíněné jevy s interakcí mezi sebou navzájem. Situace je ještě o to horší, že každý optický zesilovač kromě svého vlastního zesílení signálu vkládá do trasy také svůj vlastní přídatný optický šum, označovaný jako ASE (*Amplified Spontaneous Noise*). Analýzou šumu EDFA zesilovače jsem se podrobně zabýval ve své publikaci [58]. Jinými slovy, výkonnost optické trasy, tj. velikost bitové chybovosti (BER) na straně přijímače a délka trasy závisí na výkonové úrovni signálu, který zavedeme do různého typu vlákna, dále na pozici DCF vlákna vzhledem k jednovidovému vláknu trasy (SMF) a také na velikosti residuální disperze.

V tomto odstavci shrnu provedenou numerickou analýzu řešení kompenzace disperze optické trasy DCF vláknem pro případ optických tras, které nevyžadují nutnost mezilehlých optických zesilovačů pro přenosovou rychlost 10 Gbit/s jen s aplikací EDFA zesilovačů na straně vysílače nebo přijímače.

Při analýze se vycházelo z uspořádání a zapojení jednotlivých prvků trasy podle obr.4. Jako zdroj záření byl použit polovodičový DFB (*Distributed Feedback laser*) laser (výstupní výkon $P_{out} = 0$ dBm, spektrální šířka $FWHM = 10$ MHz) externě modulovaný Mach-Zehnder modulátorem (zhašecí poměr $ER = 15$ dB),

buzený pseudonáhodnou binární kombinací $2^{10}-1$ a vytvářející na svém výstupu optický signál typu NRZ (Non-Return-to-Zero).



obr.4 – Schéma zapojení testovací trasy; horní větev odpovídá situaci, kdy se kompenzační vlákno DCF zapojí až po průchodu signálu celou trasou (post-compensation); spodní větev odpovídá situaci, kdy se DCF vlákno zapojí za výkonový zesilovač (tzv. booster), který zesiluje výkon vysílače; jako vysílač byl použit model externě modulovaného polovodičového laseru s Mach-Zehnder modulátorem a modulační rychlostí 10 Gbit/s.

Za vysílačem je nasazen výkonový optický zesilovač (booster), jehož úkolem je zesílit optický signál. Za ním je použito alternativně buď DCF vlákno a další optický zesilovač, který kompenzuje ztráty vzniklé na DCF vláknu (pre-compensation), nebo přímo SMF vlákno trasy s optickým předzesilovačem, umístěným přímo před optický přijímač, jehož úkolem je kompenzovat ztráty vzniklé na trase samotné (post-compensation). Toto uspořádání dovoluje umístit DCF vlákno s optickým zesilovačem buď na stranu vysílače, nebo na stranu přijímače. Parametry použitých vláken jsou v tabulkách Tab.1 a Tab.2.

Aby bylo možné nezávisle nastavit výkon v obou větvích, jednou pro SMF vlákno a podruhé pro DCF vlákno, jsou na výstup zapojeny dva EDFA zesilovače se šumovým číslem $N_f = 4,5$ dB. Optický přijímač se interně skládá z optického pásmového filtru s gausovským profilem výkonové přenosové funkce se šířkou pásma $FWHM = 40$ GHz, dále potom z fotodetektoru s citlivostí $A = 1$ A/W.

Šum fotodiody je modelován termálním šumem s výkonovou hustotou 15 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$. Na elektrické straně poté následuje dolní propust (Besselův filtr pátého řádu) s hraničním kmitočtem 7 GHz.

Tab. 1 – Optické parametry použitého vlákna trasy

Parametry standardního (SMF) optického vlákna použitého v optické trase	
měrný útlum - α [dB/km]	0,22
koeficient chromatické disperze - D_{ch} [ps.nm ⁻¹ km ⁻¹]	16
koeficient disperzního sklonu S [ps.nm ⁻² km ⁻¹]	0,06
nelineární koeficient - n_2 [m ² /W]	$2,7 \cdot 10^{-20}$
efektivní plocha jádra - A_{eff} [μm^2]	80

Tab. 2 – Optické parametry použitého kompenzačního vlákna (DCF)

Parametry disperzi kompenzujícího vlákna DCF	
měrný útlum - α [dB/km]	0,55
koeficient chromatické disperze - D_{ch} [ps.nm ⁻¹ km ⁻¹]	-80
koeficient disperzního sklonu S [ps.nm ⁻² km ⁻¹]	0,09
nelineární koeficient - n_2 [m ² /W]	$2,6 \cdot 10^{-20}$
efektivní plocha jádra - A_{eff} [μm^2]	22

V této konfiguraci se poté prováděla simulace celé trasy numerickým řešením NLSE, která vystihuje všechny lineární a nelineární vlastnosti obou vláken. Principy numerického řešení jsou uvedené v habilitační práci.

Zaměříme se nyní na výsledky pro horní větev na obr.4. Byla provedena detailní simulace pro délku SMF od 230 km do 290 km po 10 km kroku. V úvahu také byly vzaty další proměnné, jako je délka DCF vlákna, vstupní úroveň signálu do SMF a DCF vlákna trasy s cílem zjistit meze, při nichž je možné dosáhnout bitové chybovosti lepší než 10^{-15} . Simulací bylo zjištěno, že nejdelší délka trasy s jednovidovým vláknem (SMF), která splňuje výše uvedené požadavky, je $L_{smf} = 270$ km. Také bylo s jistým překvapením zjištěno, že této maximální délky lze dosáhnout tehdy, když trasa není z hlediska celkové disperze zcela kompenzována, ale naopak existuje jistá hodnota kladné disperze. Z tohoto důvodu byl zaveden pomocný parametr nazvaný jako míra kompenzace *DCR* (*Dispersion Compensation Ratio*)

$$DCR = \frac{|L_{DCF} \cdot D_{DCF}|}{L_{SMF} \cdot D_{SMF}} \quad (5)$$

kde,

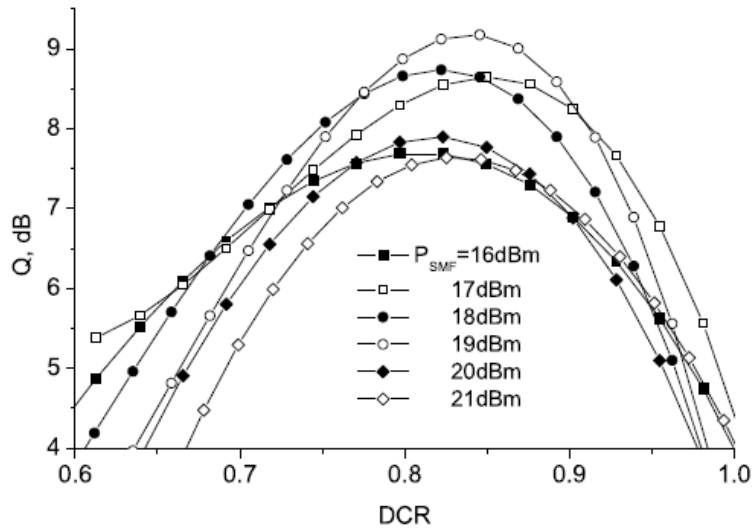
- L_{DCF} – délka kompenzačního DCF vlákna [km]
- L_{SMF} – délka optického vlákna trasy [km]
- D_{DCF} – koeficient chromatické disperze DCF vlákna [ps.nm⁻¹km⁻¹]
- D_{SMF} – koeficient chromatické disperze SMF vlákna [ps.nm⁻¹km⁻¹]

Na obrázku obr.5 je názorně vidět závislost velikosti Q faktoru na míře kompenzace DCR a vstupní úrovni výkonu navázaného do SMF vlákna. V tomto případě byla vstupní úroveň výkonu signálu na vstupu DCF vlákna držena na hodnotě $P_{DCF} = 0$ dBm.

Q faktor je parametr, který přímo souvisí s bitovou chybovostí optické trasy a je definován jako:

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (6)$$

kde μ_0 a μ_1 jsou střední hodnoty signálu v rozhodovacím okamžiku pro log. 0 a log.1, kdy se odečítá velikost signálu v rozhodovacím obvodu a σ_0 a σ_1 jsou střední kvadratické odchylky signálu v rozhodovacím okamžiku. Vlivem šumu a dalších vlivů není nikdy velikost signálu v rozhodovacím okamžiku stejná, ale proměnná, je to náhodná veličina.

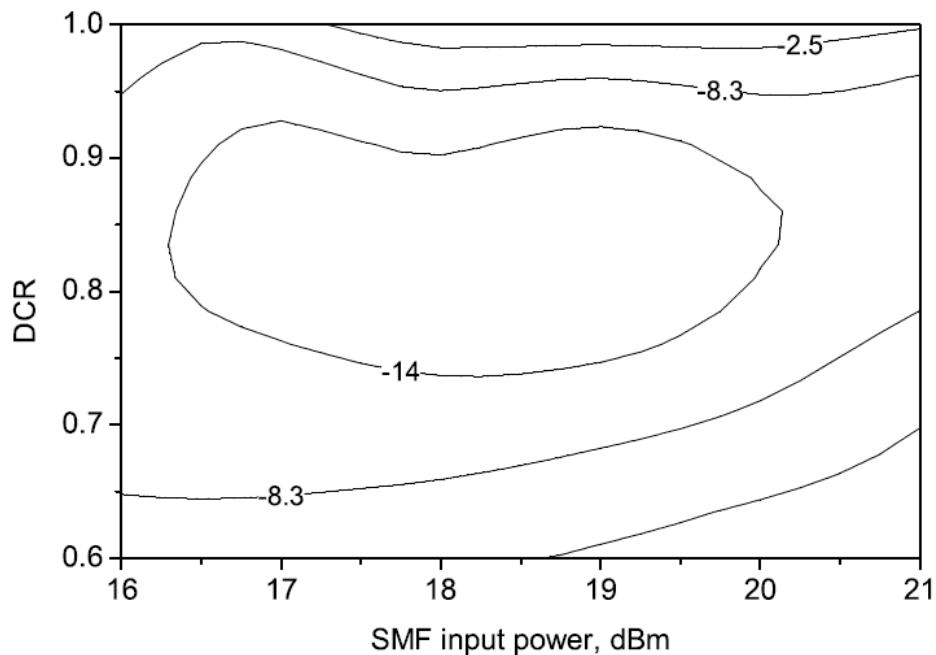


obr.5 – Závislost Q faktoru na velikosti míry kompenzace trasy DCR pro postkompenzační schéma (DCF vlákno až na konci trasy) pro následující parametry: $L_{SMF} = 270$ km, $P_{SMF} = 16, 17, 18, 19, 20$ a 21 dBm, $P_{DCF} = 0$ dBm.

Čím více se od sebe liší střední hodnoty obou binárních stavů a čím menší jsou oba rozptyly, tím častěji a správně se od sebe oba stavy odliší a tím je i menší bitová chybovost. Za předpokladu, že signál při odečtu v rozhodovacím obvodu má Gaussovo rozdělení pro obě logické hodnoty, lze mezi Q a bitovou chybovostí BER nalézt následující analytický vztah:

$$BER = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{|V_{th} - \mu_1|}{\sigma_1} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{|V_{th} - \mu_0|}{\sigma_0} \right) \right] \quad (7)$$

kde $\operatorname{erfc}()$ je doplňková chybová funkce a V_{th} je rozhodující hladina v rozhodovacím obvodu, kdy při jejím překročení se okamžitá hodnota napětí vyhodnotí jako příjem log.1 a naopak jako log.0.

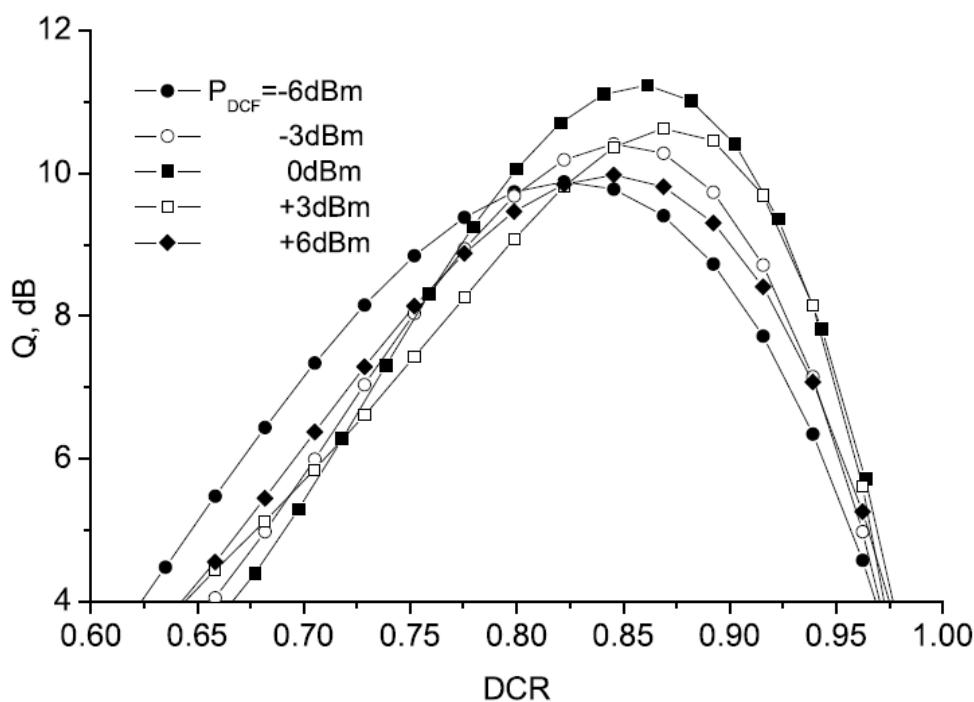


obr.6 – Konturový graf znázorňující oblast $\log(BER)$ jako funkce P_{SMF} a DCR pro postkompenzační schéma: $L_{SMF} = 270$ km, $P_{DCF} = 0$ dBm.

Pro postkompenzační schéma byl vytvořen graf (obr. 5) a konturový graf (obr. 6), na němž jsou vidět oblasti hodnot DCR a P_{SMF} , pro něž lze dosáhnout bitové chybovosti menší než 10^{-14} . Největšího Q faktoru a tedy i nejmenšího BER lze dosáhnout při kombinaci parametrů $DCR = 0,85$ a $P_{SMF} = 19$ dBm.

Dalším zajímavým problémem byla optimalizace vstupní úrovně výkonu pro různé délky DCF vlákna. Výsledky z této simulace jsou vyneseny na obr.7. Na tomto obrázku je vynesena hodnota Q faktoru při konstantním výkonu navázaného do vlákna trasy s úrovní $P_{SMF} = 19$ dBm a proměnnou velikostí úrovně výkonu navázaného do DCF vlákna. Z obrázku vyplývá, že optimální hodnotou je v tomto případě výkonová úroveň $P_{DCF} = 0$ dBm a maximálního Q faktoru bylo dosaženo při míře kompenzace $DCR = 0,85$. Dále byla zafixována hodnota DCR na hodnotě 0,85 a měnila se vstupní úroveň záření navázaného do DCF a SMF vlákna v rozsahu od 16 dBm do 21 dBm po 0,5 dB kroku. Výsledky jsou vyneseny na obr. 8. Na obr. 9 je vynesena závislost zlogaritmované bitové chybovosti BER ($\log(BER)$), z níž je patrná odpovídající oblast optimálních výkonů pro obě vlákna.

Pro případ předkompenzační, kdy se připojuje DCF vlákno na začátek trasy, se podařilo dosáhnout maximální délky trasy $L_{SMF} = 220$ km. Podobné grafické závislosti jako pro postkompenzační režim byly simulovány i pro předkompenzační metodu a jsou patrné z obr. 10, obr. 11, obr. 12 a obr. 13. Další detaily analýzy lze také nalézt v mé publikaci [63].

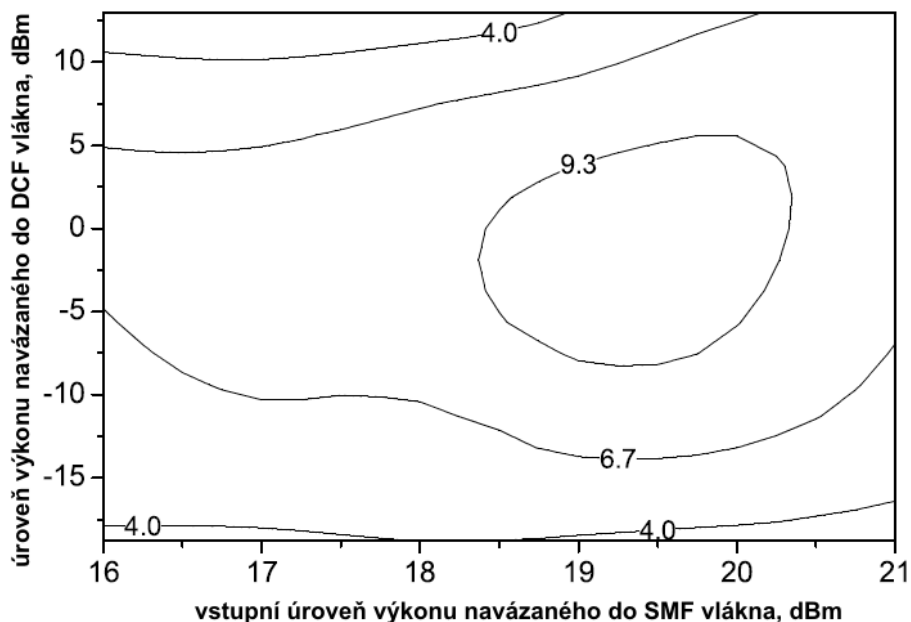


obr.7 – Závislost velikosti Q faktoru na míře kompenzace DCR při změně velikosti navázaného výkonu do DCF vlákna pro postkompenzační režim: $L_{SMF} = 270$ km, $P_{SMF} = 19$ dBm, $P_{DCF} = -6, -3, 0, 3$ a 6 dBm.

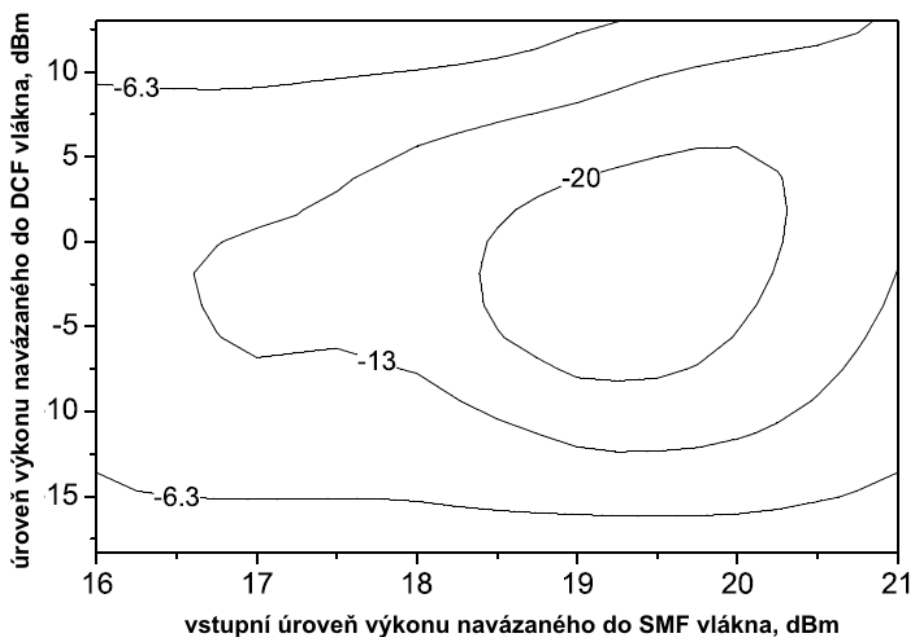
6 Závěry z výzkumu kompenzace chromatické disperze trasy DCF vláknem

Studiem vlastností optické trasy s jednovidovým vláknem ITU G.652 bylo zjištěno, že pro dlouhé optické trasy s přenosovou rychlostí větší nebo rovnou 10 Gbit/s je nezbytné provést kompenzaci chromatické disperze optické trasy. Snahou výzkumu bylo nalézt řešení pro případy v praxi, kdy je zapotřebí z ekonomických důvodů zajistit, aby po celé optické trase nebyly instalovány žádné optické zesilovače. Na základě simulací bylo zjištěno, že postkompenzační metoda vyrovnání chromatické disperze trasy vykazuje lepší výsledky než předkompenzační metoda, kdy je vstupní úroveň navázaného výkonu do DCF a SMF vlákna vhodně optimalizována, včetně nastavení optimálního kompenzačního poměru DCR. S dostatečnou rezervou lze dosáhnout bitové chybovosti 10^{-15} pro délku

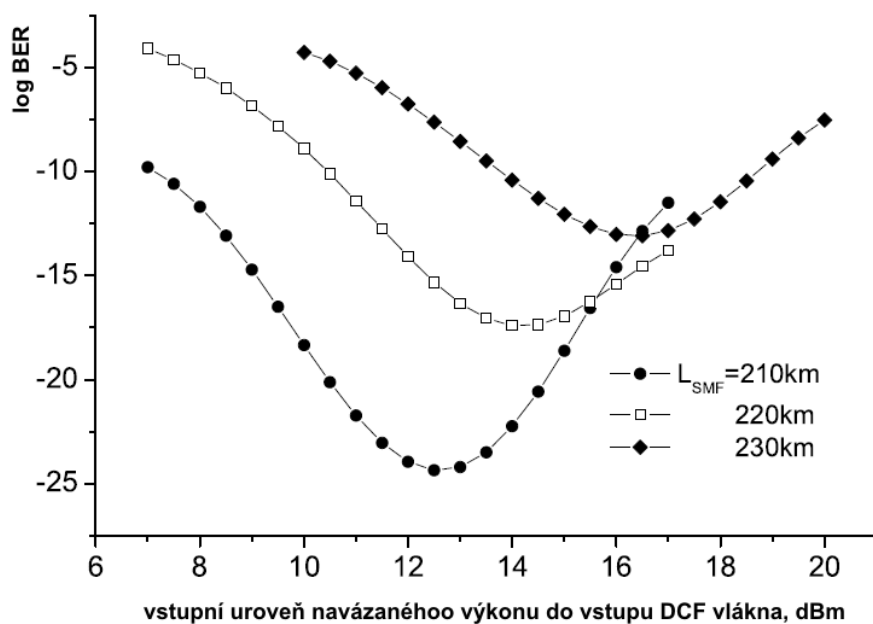
trasy 270 km pro postkompenzační metodu a 220 km pro předkompenzační metodu. V těchto případech je optimální míra kompenzace v rozmezí mezi $0,75 < \text{DCR} < 0,9$ pro postkompenzační metodu a $0,85 < \text{DCR} < 0,95$ pro předkompenzační metodu, přičemž předkompenzační schema je méně citlivé na DCR míru kompenzace než postkompenzační. Výsledky simulace byly experimentálně ověřeny v síti CESNET na optické trase Praha-Brno a taktéž byly tyto výsledky úspěšně publikovány v impaktovaném mezinárodním časopise Fiber and Integrated Optic [63].



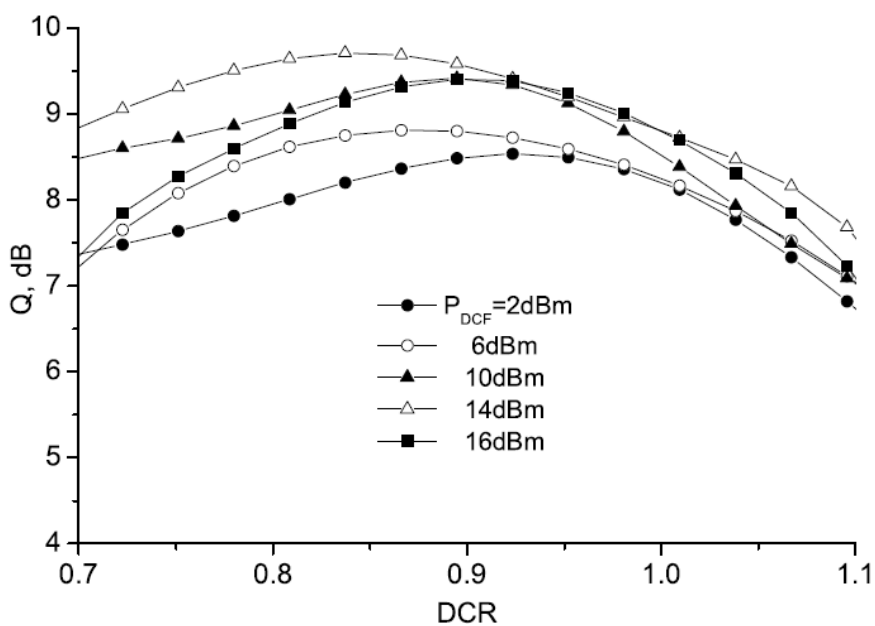
obr.8 – Konturový graf znázorňující oblast Q faktoru jako funkce úrovně výkonu navázaného do SMF vlákna (vodorovná osa) a DCF vlákna (svislá osa) pro postkompenzační schéma: $L_{\text{SMF}} = 270$ km, $L_{\text{DCF}} = 45,9$ km, ($\text{DCR} = 0,85$)



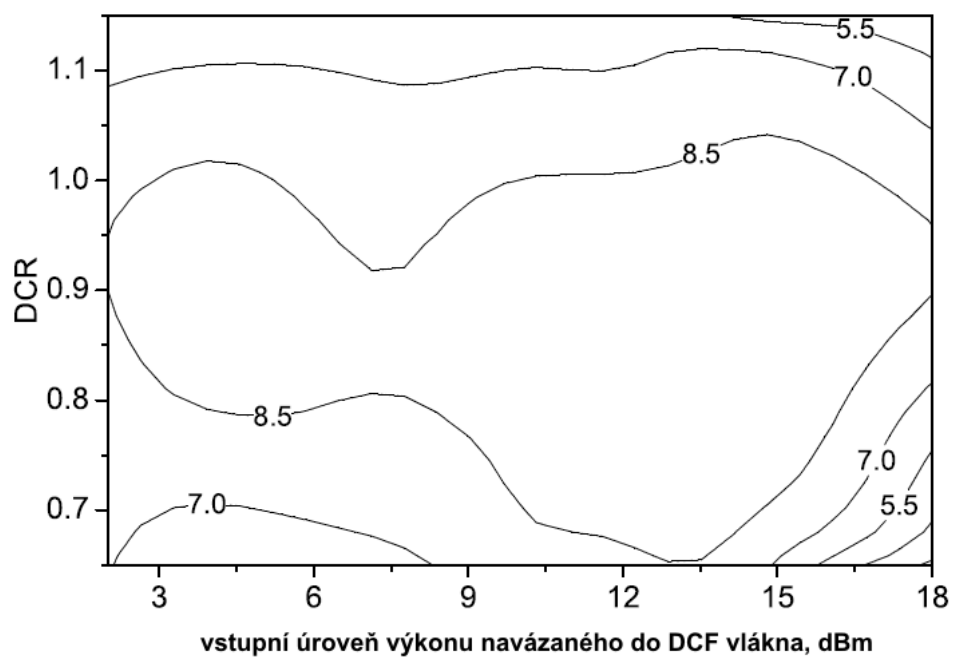
obr.9 – konturový graf znázorňující oblast $\log(\text{BER})$ jako funkce úrovně výkonu navázaného do SMF vlákna (vodorovná osa) a DCF vlákna (svislá osa) pro postkompenzační schéma: $L_{\text{SMF}} = 270$ km, $L_{\text{DCF}} = 45,9$ km, ($\text{DCR} = 0,85$)



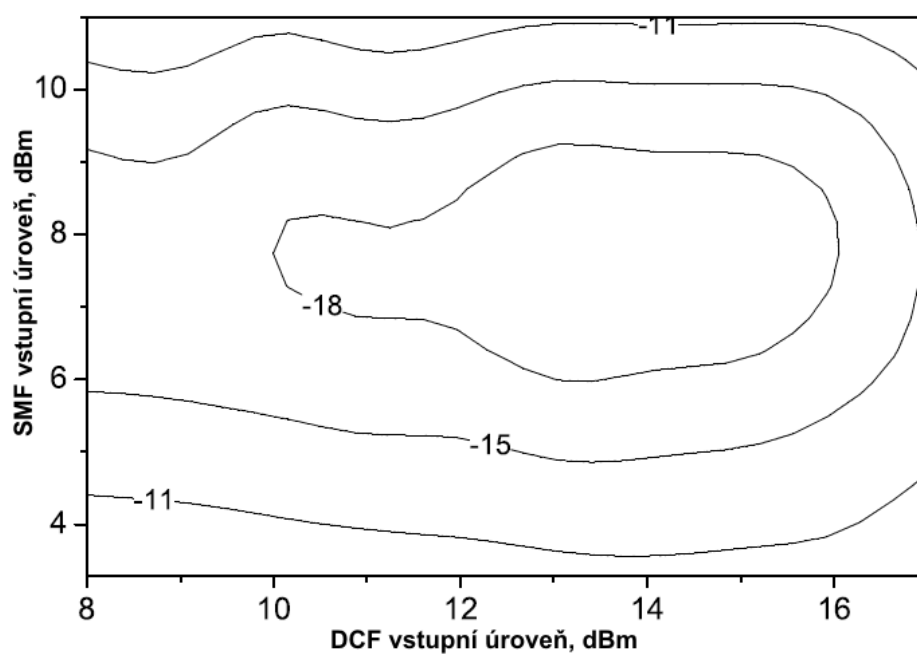
obr.10 – log(BER) jako funkce úrovně výkonu navázaného do DCF vlákna pro předkompenzační schéma: $L_{SMF} = 210, 220$ a 230 km, $P_{SMF} = 14$ dBm, $DCR = 1,0$



obr.11 – Závislost velikosti Q faktoru na míře kompenzace DCR při změně velikosti navázaného výkonu do DCF vlákna pro předkompenzační režim: $L_{SMF} = 220$ km, $P_{SMF} = 8$ dBm, $P_{DCF} = 2, 6, 10, 14$ a 18 dBm.



obr.12 - konturový graf znázorňující oblast Q faktoru jako funkce úrovně výkonu navázaného do DCF vlákna (vodorovná osa) a míry kompenzace DCR pro předkompenzační schéma: $L_{SMF} = 220$ km, $P_{SMF} = 8$ dBm.



obr.13 – Konturový graf znázorňující oblast $\log(BER)$ jako funkce úrovně výkonu navázaného do SMF vlákna (svislá osa) a DCF vlákna (vodorovná osa) pro předkompenzační schéma: $L_{SMF} = 220$ km, $L_{DCF} = 37,4$ km, (DCR = 0,85).

7 Seznam použité literatury

- [1] TURKIEWICZ, Jaroslaw. *Transmission and switching utilizing 1310 nm SOAs Applications of 1310 nm semiconductor optical amplifiers in fibre-optic telecommunication systems*. Saarbrücken: VDM Verlag Dr. Müller, 2010. ISBN 36-392-1577-X.
- [2] CONNELLY, Michael J. *Semiconductor optical amplifiers*. London: Kluwer Academic, c2002, x, 169 p. ISBN 07-923-7657-9.
- [3] WANG, Niloy K. Dutta. *Semiconductor optical amplifiers*. 2nd edition. World Scientific Pub Co Inc. ISBN 98-144-8903-4.
- [4] Ito, T.; Yoshimoto, N.; Magari, K.; Sugiura, Hideo. Wide-band polarization-independent tensile-strained InGaAs MQW-SOA gate, *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol.10, no.5, pp.657,659, May 1998
- [5] Yoshimoto, N.; Magari, K.; Ito, T.; Kawaguchi, Y.; Kishi, K.; Kondo, Y.; Kadota, Y.; Mitomi, O.; Yoshikuni, Y.; Hasumi, Y.; Tohmori, Y.; Nakajima, O. Spot-size converted polarization-insensitive SOA gate with a vertical tapered submicrometer stripe structure, *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol.10, no.4, pp.510,512, April 1998
- [6] Yoshimoto, N.; Ito, T.; Magari, K.; Kawaguchi, Y.; Kishi, K.; Kondo, Y.; Kadota, Y.; Mitomi, O.; Yoshikuni, Y.; Hasumi, Y.; Tohmori, Y.; Nakajima, O. Four-channel polarisation-insensitive SOA gate array integrated with butt-jointed spot-size converters, *Electronics Letters*, vol.33, no.24, pp.2045,2046, 20 Nov 1997
- [7] Yamashita, S.; Set, S.Y.; Matsumoto, D. Polarization-independent self-pumped wavelength convertor using the four-wave mixing in a semiconductor optical amplifier, *Lasers and Electro-Optics, 1999. CLEO/Pacific Rim '99. The Pacific Rim Conference on*, vol.4, no., pp.1163,1164 vol.4, Aug. 30 1999-Sept. 3 1999
- [8] Cho, Pak S.; Khurgin, J.B. Suppression of cross-gain modulation induced crosstalk in semiconductor optical amplifier using return-to-zero differential phase-shift-keying, *Lasers and Electro-Optics, 2003. CLEO '03. Conference on*, vol., no., pp.2 pp.,, 6-6 June 2003
- [9] Zhihong, Li; Guifang, Li. Linear and nonlinear crosstalk suppression for DWDM RZ-DPSK transmitter using a saturated SOA as power booster amplifier," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol.18, no.7, pp.811,813, April 1, 2006
- [10] Awaji, Y., Inoue, J., Sotobayashi, H., Kubota, F., Ozeki, T. Nonlinear inter-channel cross talk of linear optical amplifier (LOA) in DWDM applications, *Optical Fiber Communications Conference, 2003. OFC 2003*, vol., no., pp.441, 443 vol.2, 23-28 March 2003
- [11] Francis, D.A.; Dijaili, S.P.; Walker, J. D., "A single-chip linear optical amplifier," *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 2001. OFC 2001*, vol.4, no., pp.PD13,PD13, 17-22 March 2001
- [12] Van den Hoven, G., "Linear optical amplifiers," *Lasers and Electro-Optics Society, 2002. LEOS 2002. The 15th Annual Meeting of the IEEE*, vol.2, no., pp.891,892 vol.2, 10-14 Nov. 2002
- [13] Tong, D.T.K.; Wu, M.C.; Dijaili, S.M., "Intrinsic intermodulation distortion characteristics of linear optical amplifier," *Lasers and Electro-Optics, 2003. CLEO '03. Conference on*, vol., no., pp.3 pp.,, 6-6 June 2003
- [14] DESURVIRE, Emmanuel. *Erbium-doped fiber amplifiers: device and system developments*. New York: J. Wiley, c2002, xlv, 763 p. ISBN 04-714-1903-6.
- [15] DESURVIRE, Emmanuel. *Erbium-doped fiber amplifiers: principles and applications*. New York: John Wiley, 1994, xxvii, 770 s. ISBN 04-715-8977-2.
- [16] ABU-AISHEH, Akram. *Pre-amp EDFA Noise Analysis for Optimal Optical Receiver Performance Preamp EDFA noise Analysis*. Saarbrücken: VDM Verlag Dr. Müller, 2009. ISBN 36-392-1921-X.
- [17] Giles, C.R.; Desurvire, E., "Modeling erbium-doped fiber amplifiers," *Lightwave Technology, Journal of*, vol.9, no.2, pp.271,283, Feb 1991

- [18] Rochette, M.; LaRochelle, S.; Guy, M.; Lauzon, J.; Trepanier, F., "Experimental investigation of erbium-doped fiber amplifier gain equalization schemes using short-period Bragg gratings," *Lasers and Electro-Optics, 1999. CLEO '99. Summaries of Papers Presented at the Conference on*, vol., no., pp.12,, 28-28 May 1999
- [19] Flood, F.A.; Tonguz, O.K., "Individual versus end-to-end gain equalization in erbium-doped fiber amplifier chains: a comparison," *Global Telecommunications Conference, 1994. GLOBECOM '94. Communications: The Global Bridge., IEEE*, vol.2, no., pp.1190,1194 vol.2, 28 Nov- 2 Dec 1994
- [20] Hyo Sang Kim; Seok Hyun Yun; Hyang-Kyun Kim; Namkyoo Park; Byoung-Yoon Kim, "Dynamic gain equalization of erbium-doped fiber amplifier with all-fiber acousto-optic tunable filters," *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 1998. OFC '98., Technical Digest*, vol., no., pp.136,138, 22-27 Feb. 1998
- [21] Flores-Llamas, I.; Moumtadi, F.; Delgado-Hernandez, J.C., "Gain Equalization for Erbium-Doped Fiber Amplifiers by the Synthesis of a Long-Period Fiber Grating," *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA), 2011 IEEE*, vol., no., pp.333,337, 15-18 Nov. 2011
- [22] Shehadeh, F.; Vodhanel, R.S.; Gibbons, C.; Ali, M., "Comparison of gain control techniques to stabilize EDFAs for WDM networks," *Optical Fiber Communications, 1996. OFC '96*, vol., no., pp.190,191, 25 Feb.-1 March 1996
- [23] Tonguz, O.K.; Flood, F.A., "Gain equalization of EDFA cascades," *Lightwave Technology, Journal of*, vol.15, no.10, pp.1832,1841, Oct 1997
- [24] Yam, S. S -H; Akasaka, Y.; Kubota, Y.; Inoue, H., "100-nm cascaded hybrid doped fiber amplifier for coarse wavelength division multiplexing," *Optical Fiber Communication Conference, 2005. Technical Digest. OFC/NFOEC*, vol.3, no., pp.3 pp. Vol. 3,, 6-11 March 2005
- [25] Masuda, H.; Kawai, S.; Suzuki, K-I; Aida, K., "Wideband, gain-flattened, erbium-doped fibre amplifiers with 3 dB bandwidths of >50 nm," *Electronics Letters*, vol.33, no.12, pp.1070,1072, 5 Jun 1997
- [26] Abu Bakar, M.H.; Mahdi, M.A.; Yeo Kwok Shien, "L-band erbium-doped fiber amplifier pumped by 1455 nm laser source for repeaterless transmission systems," *Electronic Design, 2008. ICED 2008. International Conference on*, vol., no., pp.1,4, 1-3 Dec. 2008
- [27] Flood, F.A., "L-band erbium-doped fiber amplifiers," *Optical Fiber Communication Conference, 2000*, vol.2, no., pp.102,104 vol.2, 7-10 March 2000
- [28] Harun, S.W.; Tamchek, N.; Ahmad, H., "Two-stage L-band erbium doped fiber amplifier," *Communications, 2003. APCC 2003. The 9th Asia-Pacific Conference on*, vol.1, no., pp.317,319 Vol.1, 21-24 Sept. 2003
- [29] Adikan, F.R.M.; Mahdi, M.A.; Dimyati, K.; Ahmad, H., "A study of gain and noise figure performance of an L-band erbium doped fibre amplifier (EDFA) with 980 nm and amplified spontaneous emission (ASE) pumps," *TENCON 2000. Proceedings*, vol.3, no., pp.417,420 vol.3, 2000
- [30] Adikan, F.R.M.; Noor, A. S M; Mahdi, M.A., "Optimum pumping configuration for L-band EDFA incorporating ASE pump source," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol.16, no.6, pp.1465,1467, June 2004
- [31] Luo, C.; Zyskind, J.L.; Sun, Y.; Srivastava, A.K.; Sulhoff, J.W.; Wolf, C.; Ali, M.A., "Performance degradation of all-optical gain-clamped EDFAs due to relaxation-oscillations and spectral-hole burning in amplified WDM networks," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol.9, no.10, pp.1346,1348, Oct. 1997
- [32] Barbier, D., "The present and future of EDWA technology," *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 2002. OFC 2002*, vol., no., pp.11,, 17-22 Mar 2002
- [33] Zimmerman, D.R.; Spiekman, L.H., "Amplifiers for the masses: EDFA, EDWA, and SOA amplets for metro and access applications," *Lightwave Technology, Journal of*, vol.22, no.1, pp.63,70, Jan. 2004

- [34] Nishida, Y.; Yamada, M.; Kanamori, Terutoshi; Kobayashi, K.; Temmyo, J.; Sudo, Shoichi; Ohishi, Y., "Development of an efficient praseodymium-doped fiber amplifier," *Quantum Electronics, IEEE Journal of* , vol.34, no.8, pp.1332,1339, Aug 1998
- [35] Wannemacher, S., "Praseodymium doped fibre amplifier for optical amplification at 1300 nm," *Global Telecommunications Conference, 1996. GLOBECOM '96. 'Communications: The Key to Global Prosperity* , vol.3, no., pp.1618,1623 vol.3, 18-22 Nov 1996
- [36] Whitley, T.J., "A review of recent system demonstrations incorporating 1.3- μm praseodymium-doped fluoride fiber amplifiers," *Lightwave Technology, Journal of* , vol.13, no.5, pp.744,760, May 1995
- [37] Szela, J.; Napierala, M.; Beres-Pawlik, E.; Jedrzejewski, K., "Neodymium doped fiber laser," *Mediterranean Winter, 2008. ICTON-MW 2008. 2nd ICTON* , vol., no., pp.1,3, 11-13 Dec. 2008
- [38] Bayart, D., "TDPA for amplification in the S-band," *Lasers and Electro-Optics Society, 2001. LEOS 2001. The 14th Annual Meeting of the IEEE* , vol.2, no., pp.411,412 vol.2, 2001
- [39] Davey, S.T.; Williams, D.L.; Ainslie, B. J.; Rothwell, W. J M; Wakefield, B., "Optical gain spectrum of $\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$ Raman fibre amplifiers," *Optoelectronics, IEE Proceedings J* , vol.136, no.6, pp.301,306, Dec 1989
- [40] Nakashima, Takashi; Seikai, Shigeyuki; Nakazawa, M., "Configuration of the optical transmission line using stimulated Raman scattering for signal light amplification," *Lightwave Technology, Journal of* , vol.4, no.6, pp.569,573, Jun 1986
- [41] Jacobsen, G.; Bertilsson, K.; Xiaopin, Z., "WDM transmission system performance: influence of non-Gaussian detected ASE noise and periodic DEMUX characteristic," *Lightwave Technology, Journal of* , vol.16, no.10, pp.1804,1812, Oct 1998
- [42] Lyubomirsky, I.; Frankel, M.Y., "On the beating of ASE and XPM noise in optical receivers," *Photonics Technology Letters, IEEE* , vol.15, no.11, pp.1588,1590, Nov. 2003
- [43] Pastor, D.; Mut, F.; Capmany, J.; Marti, J., "Interchannel power equalization and ASE noise rejection in multistage EDFA amplified WDM systems employing fibre gratings," *Optical Fibre Gratings (Digest No. 1997/037), IEE Colloquium on* , vol., no., pp.14/1,14/6, 7 Feb 1997
- [44] Bosco, G.; Carena, A.; Curri, V.; Poggiolini, P., "ASE-noise limit of direct-detection receivers: duobinary vs. IMDD," *Lasers and Electro-Optics Society, 2002. LEOS 2002. The 15th Annual Meeting of the IEEE* , vol.2, no., pp.776,777 vol.2, 10-14 Nov. 2002
- [45] Ezra, Y.B.; Lembrikov, B.I.; Haridim, M., "Specific Features of XGM in QD-SOA," *Quantum Electronics, IEEE Journal of* , vol.43, no.8, pp.730,737, Aug. 2007
- [46] Marsden, A.; Maruta, A.; Kitayama, K., "Dynamic lightpath establishment incorporating the effects of FWM-induced crosstalk enhancement in wavelength-routed optical networks," *Broadband Communications, Networks and Systems, 2008. BROADNETS 2008. 5th International Conference on* , vol., no., pp.338,340, 8-11 Sept. 2008
- [47] Kwong, W.C.; Guu-Chang Yang; Keng-Duan Chang, "Locating FWM crosstalk in high-capacity WDM lightwave systems," *Communications, 2001. ICC 2001. IEEE International Conference on* , vol.3, no., pp.726,730 vol.3, 2001
- [48] Bogoni, A.; Poti, L., "Effective channel allocation to reduce inband FWM crosstalk in DWDM transmission systems," *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of* , vol.10, no.2, pp.387,392, March-April 2004
- [49] Rouf, A.; Islam, M.S., "A new approach of unequally spaced channel allocation for FWM crosstalk suppression in WDM transmission system," *Electrical & Computer Engineering (ICECE), 2012 7th International Conference on* , vol., no., pp.35,38, 20-22 Dec. 2012
- [50] Sunnerud, H.; Hansryd, J.; Andrekson, P.A.; Karlsson, M., "Impact of PMD on FWM crosstalk in WDM systems," *Optical Fiber Communication Conference, 2000* , vol.3, no., pp.34,36 vol.3, 7-10 March 2000

- [51] Elschner, R.; Richter, T.; Schubert, C., "Characterization of FWM-induced crosstalk for WDM operation of a fiber-optical parametric amplifier," *Optical Communication (ECOC), 2011 37th European Conference and Exhibition on* , vol., no., pp.1,3, 18-22 Sept. 2011
- [52] Rothnie, D.M.; Zeiler, W.; Bayvel, P.; Midwinter, John E., "Modelling of transmission nonlinearities and fibre parameter optimisation in dense WDM systems with optical amplifiers," *High Speed and Long Distance Optical Transmission, IEE Colloquium on* , vol., no., pp.17/1,17/6, 18 Apr 1996
- [53] Nuyts, R.J.; Yong-Kwan Park; Gallion, P., "Dispersion equalization of a 10 Gb/s repeatered transmission system using dispersion compensating fibers," *Lightwave Technology, Journal of* , vol.15, no.1, pp.31,42, Jan 1997
- [54] Nuyts, R.J.; Park, Y-K, "Performance improvement of 10 Gb/s standard fiber transmission systems by using the SPM effect in the dispersion compensating fiber," *Optical Communication, 1996. ECOC '96. 22nd European Conference on* , vol.2, no., pp.257,260 vol.2, 19-19 Sept. 1996
- [55] Nuyts, R.J.; Park, Y-K; Gallion, P., "Performance improvement of 10 Gb/s standard fiber transmission systems by using the SPM effect in the dispersion compensating fiber," *Photonics Technology Letters, IEEE* , vol.8, no.10, pp.1406,1408, Oct. 1996
- [56] Molina, A.G.; Rodriguez, C.C.; Soto, A.M.C., "Benefits and drawbacks of SPM in single-channel 10 Gb/s DPSK transmission," *Communications Conference (COLCOM), 2012 IEEE Colombian* , vol., no., pp.1,5, 16-18 May 2012
- [57] Karasek, M.; Kanka, J.; Bohac, L.; Krcmarik, D.; Radil, J.; Vojtech, J., "Surviving-Channel-Power Transients in Second-Order Pumped Lumped Raman Fiber Amplifier: Experimentation and Modeling," *Lightwave Technology, Journal of* , vol.25, no.3, pp.664,672, March 2007
- [58] Boháč, L. Analysis of EDFA Amplifier Noise Behind the Detector. In 11th International Conference RTT 2009 [CD-ROM]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2009, p. 0162_0009. ISBN 978-80-01-04410-0.
- [59] P. C. Becker, N. A. Olsson, and J. R. Simpson. Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Fundamentals and Technology. (San Diego, Academic Press, 1999).
- [60] E. Desurvire, Erbium-Doped Fiber Amplifiers. (New York, Wiley, 1994).
- [61] Zeiler, W.; Di Pasquale, F.; Bayvel, P.; Midwinter, John E., "Modeling of four-wave mixing and gain peaking in amplified WDM optical communication systems and networks," *Lightwave Technology, Journal of* , vol.14, no.9, pp.1933,1942, Sep 1996
- [62] Giles and E. Desurvire, Modeling erbium-doped fiber amplifiers, *Journal of Lightwave Technology* 9, 271-283,1991.
- [63] Karásek, M., Radil, J., Boháč, L., Optimization of NRZ Data Transmission at 10 Gbit/s over G.652 without in-line DFAs. *Fiber and Integrated Optics*. 2004, vol. 23, no. 4, p. 297-310. ISSN 0146-8030.

8 Odborný životopis

Ing. Leoš Boháč, Ph.D.

Dosažené vzdělání:

- 2001 Ph.D., Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze, obor telekomunikační technika
- 1992 Ing., Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze, obor telekomunikační technika

Pedagogická činnost:

- zajišťuje a garantuje výuku v předmětech:
 - Optické systémy a sítě,
 - Optické přenosové systémy,
 - Advanced networking technologies,
 - Počítačové a komunikační sítě,
 - Síťové technologie I a II.,
 - Communication in Data Networks,
 - Komunikace v datových sítích
- je autorem nebo spoluautorem vysokoškolských skript:
 - BOHÁČ, Leoš a Pavel BEZPALEC. Datové sítě: přednášky. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2011, 204 s. ISBN 978-80-01-04694-4.
 - BOHÁČ, Leoš a Michal LUCKI. Optické komunikační systémy. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2010, 165 s. ISBN 978-80-01-04484-1.
 - BOHÁČ, Leoš a Pavel BEZPALEC. Komunikace v datových sítích: cvičení. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 2006, 121 s. ISBN 80-010-3536-0.
- pod jeho vedením bylo úspěšně obhájeno 46 magisterských, 19 bakalářských a 3 Ph.D. práce

Průběh praxe a externí spolupráce

Praktické projekty a výzkum

- **ČSA** – projekt mezinárodní virtuální privátní datové sítě,
- **ČSL** – projekt implementace datové sítě pro navigaci letadel do přistávacích boxů,
- **CESNET, UFE-AVČR** – dlouhodobá spolupráce na vývoji vysokorychlostních optických systémů a jejich nasazení v akademické síti CESNET
- **VŠB** – spolupráce na projektu zavedení VoIP do prostředí sítě CESNET
- **Safibra** – výzkum a vývoj optických senzorů pro detekci narušení kritické infrastruktury
- **CSc Computer Services** – projekty implementace datových služeb,
- **Colsys automatic** – projekt nasazení datových sítí pro aplikace na letišti Praha Ruzyně,
- **Hirschmann** – projekt zavedení systému Ethernet do sítí na letištích a jiných průmyslových aplikacích
- **SVM** – výzkum a vývoj mikrovlnného pojítka a 10 Gbit/s optického pojítka,
- **Pražská teplárenská** – projekt koncepce řídicí datové průmyslové sítě,
- **Pražská energetika** – projekt koncepce sítě integrovaného SmartGrid systému,
- **Cisco** – dlouhodobá spolupráce v projektu Cisco Networking Academy
- **ČTU** – výzkum a projekt na testování LTE sítí
- **ČSSZ** – projekt interního standardu telekomunikační sítě

Vědomostní transfer:

- **ČEZ, atomová elektrárna Temelín** – možnosti optických vláken a systémů pro aplikaci v atomové elektrárně,
- **Siemens** – principy datových sítí a technologií,
- **Policie české republiky** - komunikační protokoly,
- **Česká televize** – funkce a možnosti ATM sítí,
- **Česká pojišťovna** – datové sítě a jejich nasazení,
- **České radiokomunikace** – datové sítě v prostředí ČRa,

Odborné stáže:

- TGM, Institute of Technologie, Vienna, Austria
- University of Central England in Birmingham
- Florida State College at Jacksonville

Udělené granty:

- úspěšný řešitel nebo spoluřešitelem celkem **17** projektů (F1, G1 a A) Fondu rozvoje VŠ.

Název projektu	Rok	Uděлил
Research and Development of the 10Gbit/s Data Modul for High-Rate Free Space Optical Lines and Microwave Lines	2010-12	Ministerstvo průmyslu a obchod ČR
The modern structure of photonic sensors and new innovative principles for intrusion detection systems, integrity and protection of critical infrastructure "GUARSENSE"	2010-2015	Ministerstvo vnitra ČR
Adaptive High-rate Point-to-point Microwave Line Featured by the Transmission Rate of 256 Mbit/s and Adaptive Power Control System	2008-10	Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR
Optimization of Data Transmission at 10 Gbps over G.652 Fibers without the Deployment of EDFA with Respect to Maximum Transmission Distance	2004-2006	Grantová agentura ČR

Další odborné aktivity:

- člen oponentní komise evropského výzkumného projektu GEANT Open Calls, 2013
- člen technické normalizační komise TNK 98 Vláknová optika
- člen Programme committee, Optical communication 2013, Prague, Hotel Olympic
- člen Programme committee, Optical communication 2012, Prague, Hotel Olympic
- člen Programme committee, 11th International Conference on Knowledge in Telecommunication Technologies and Optics, Hotel Orle Gniazdo, Poland
- člen Programme committee, 12th International Conference on Knowledge in Telecommunication Technologies and Optics, Malenovice, in Silesian Beskid
- člen Programme committee, 13th International Conference on Knowledge in Telecommunication Technologies and Optics, Malenovice, in Hradec nad Moravici
- člen redakční rady odborného online časopisu Access Server, ISSN 1214-9675, <http://access.feld.cvut.cz/>

Seznam některých vybraných publikací:

- Boháč, L. The Soliton Transmission in Optical Fibers. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*. 2010, vol. 8, no. 5, p. 107-110. ISSN 1804-3119.
- Boháč, L. Analysis of EDFA Amplifier Noise Behind the Detector. In 11th International Conference RTT 2009 [CD-ROM]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2009, p. 162. ISBN 978-80-01-04410-0.
- Karásek, M., Kaňka, J., Boháč, L., Krčmařík, D., Radil, J. Surviving-Channel-Power Transients in Second-Order Pumped Lumped Raman Fiber Amplifier: Experimentation and Modeling. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*. 2007, vol. 25, no. 3, p. 664-672. ISSN 0733-8724.
- Krčmařík, D., Karásek, M., Boháč, L. Comparison of XPM Products using a Self-developed Program. In Proceedings of the 6th Conference on Telecommunications [CD-ROM]. Lisboa: Instituto de Telecomunicações - Lisboa, 2007, p. 509-512. ISBN 978-989-8109-01-9.
- Lucki, M., Boháč, L. Band Gap Structure as the Photonic Crystal Fiber Guidance Mechanism. In *Photonic Crystals and Fibers*. Bellingham: SPIE, 2005, p. 1F-1-1F-8. ISBN 0-8194-5957-7.
- Lucki, M., Boháč, L. Photonic Band Gap as a New Type of a Guidance Mechanism in Photonic Crystal Fibers. In *Electronics and Telecommunications - Papers*. Riga: Riga Technical University, 2005, p. 32-35.
- Lucki, M., Boháč, L. Flexible Control of Dispersion in Index Guiding Photonic Crystal Fibers Governed by Geometrical Parameters. In *Photonic Crystal Materials and Devices III*. Bellingham, WA: The International Society for Optical Engineering, 2006, vol. 6182, p. 61822F-1-61822F-9. ISBN 0-8194-6238-1.
- Lucki, M., Boháč, L., Burčík, J. Chosen Aspects of Negative Dispersion Generation in Index Guiding Photonic Crystal Fibers. In *Photonic Crystal Fibers*. Bellingham: SPIE, 2007, p. 65880W1-65880W10. ISBN 978-0-8194-6716-4.
- Lucki, M., Boháč, L., Vodrážka, J. A Short Overview of the Most Actual Problems in the Area of Fiber Bending and Chromatic Dispersion in Photonic Crystal Fibers. In Proceedings of SPIE - Photonic Crystal Fibers II. Bellingham: SPIE, 2008, p. 69900X-1-69900X-12. ISBN 978-0-8194-7188-8.
- Karásek, M., Radil, J., Boháč, L. Optimization of NRZ Data Transmission at 10Gbit/s over G.652 without in-line DFAs. *Fiber and Integrated Optics*. 2004, vol. 23, no. 4, p. 297-310. ISSN 0146-8030.
- Radil, J., Boháč, L., Karásek, M. Optical networking in CESNET2 gigabit network, *ANNALES DES TELECOMMUNICATIONS-ANNALS OF TELECOMMUNICATIONS* Volume: 58, Issue: 11-12, Pages: 1829-1848, 2003