



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

EFEKTIVNÍ OPTICKÉ FUNKCE VE VLÁKNOVÝCH FOTONICKÝCH SÍTÍCH

EFFECTIVE OPTICAL FUNCTION IN FIBRE PHOTONICS NETWORKS

ZKRÁCENÁ VERZE DIZERTAČNÍ PRÁCE

SHORT VERSION OF DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. ONDŘEJ HAVLIŠ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Mgr. KAREL SLAVÍČEK, Ph.D.

BRNO 2024

ABSTRAKT

Dizertační práce se zaměřuje na efektivní optické funkce ve vláknových fotonických sítích, testbedech a multiband polygonu. Mezi tyto funkce lze zařadit optické zesilování, přepínání, směrování a filtraci optického spektra. Teoretická část práce se zabývá optickým zesilováním, kde jsou popsány jednotlivé druhy optických zesilovačů. Ty pro svoji funkci využívají různých principů, jako například využití jevu Ramanovského rozptylu, vláken dopovaných vzácnými zeminami – především Erbiem, a v poslední řadě polovodičových struktur. Praktická část práce je zaměřena na využití a ověření efektivních optických funkcí a jejich služeb tedy klasického přenosu telekomunikačních dat a přenosu ultra-stabilních veličin (přenos přesného času a ultra-stabilní frekvence) ve vláknové fotonické síti, testbedu a multiband polygonu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Obousměrný zesilovaný přenos, Filtrace optického spektra, Erbiem dopovaný vláknový zesilovač EDFA, Ramanův zesilovač RA, Polovodičový zesilovač SOA, DWDM, CESNET, Univerzální prostředí Testbed, Přenos ultra-stabilních veličin, Přesný čas, Ultra-stabilní frekvence, Multiband polygon.

ABSTRACT

This dissertation focuses on efficient optical functions in fiber photonic networks, testbeds and multiband polygon. These functions include optical amplification, switching, routing and filtering of the optical spectrum. The theoretical part of the thesis deals with optical amplification, where different types of optical amplifiers are described. These employ various principles for their function, such as the use of Raman scattering, rare earth doped fibers – primarily Erbium, and lastly semiconductor structures. The practical part of the work is focused on the use and verification of efficient optical functions and their services, i.e. transmission of classical telecommunication data and transmission of ultra-stable quantities (transmission of accurate time and ultra-stable frequency) in fiber photonic network, testbeds and multiband polygon.

KEYWORDS

Bidirectional amplified transmission, Filtration of optical spectrum, Erbium Doped Fibre Amplifier EDFA, Raman Amplifier RA, Semiconductor Optical Amplifier SOA, DWDM, CESNET, Testbed, Transmission of ultra-stable quantities, Accurate time, Ultra-stable frequency, Multiband polygon.

Obsah

1 Úvod	4
2 Současný stav poznání	6
2.1 Optické zesilování	6
2.2 Rozdělení optických zesilovačů	6
2.2.1 Podle způsobu optického čerpání	6
2.2.2 Podle umístění	7
2.3 Vláknové zesilovače, xDFA	8
2.3.1 Princip a uspořádání EDFA zesilovače	8
2.4 Polovodičové zesilovače	10
2.4.1 Proces stimulované emise záření u SOA zesilovače	10
2.4.2 Struktura SOA zesilovače	10
3 Cíle práce	12
4 Postup řešení	14
4.1 Testbed – Univerzální prostředí	14
4.1.1 Dynamický fotonický testbed	14
4.2 Obousměrné zesilovače pro speciální přenosy	16
4.2.1 Prototypy obousměrných optických EDFA zesilovačů	17
4.2.2 Prototyp polovodičového obousměrného zesilovače CLA SOA	22
4.3 Přenos ultra-stabilních veličin ve vláknových sítích	24
4.3.1 Princip přenosu ultra-stabilních veličin	27
4.3.2 Filtrace optického spektra pro přenos ultra-stabilních veličin	30
4.3.3 Možnosti vzniku a potlačení nežádoucího efektu samovolného laserování	38
4.4 Multiband polygon pro přenos ultra-stabilních veličin	40
4.4.1 Popis a instalace multiband polygonu	40
4.4.2 Měření stability linek přenosu ultra-stabilní frekvence	42
4.4.3 Výkonové vyvažování kaskády obousměrných zesilovačů	45
5 Výsledky řešení dizertační práce	54
6 Závěr	56
Literatura	58

1 Úvod

Mezi efektivní optické funkce ve vláknových fotonických sítích můžeme zařadit optické zesilování, přepínání, směrování a filtraci. Tyto umožňují regeneraci, přepínání, směrování a filtraci optických signálů, které obsahují důležité informace a data, jež se využívají v současné celosvětové síti nazývané internet. Bez těchto funkcí by si uživatelé internetu či jiné sítě nemohli efektivně mezi sebou vyměňovat informace, data, elektronickou poštu, využívat různé cloudové služby, uskutečňovat videokonferenční hovory a další služby, které v současném internetu uživatelé hojně používají ve svém virtuálním životě a v budoucím kvantovém internetu či jiné síti to bude bráno jako samozřejmost.

Současný stav poznání dizertační práce se především zaměřuje na optické zesilování. Ostatní funkce jako přepínání a filtrace byly zmíněny v praktické části práce. Na začátku práce jsou popsány základní parametry optických zesilovačů. V navazujících podkapitolách jsou zmíněny základní druhy optických zesilovačů, jakožto vláknový zesilovač využívající erbiem dopované vlákno, Ramanův zesilovač a polovodičový zesilovač. Další část se věnuje hybridním konfiguracím využití jednotlivých zmiňovaných typů zesilovačů. Závěr teoretické části je věnován srovnáním jednotlivých typů zesilovačů v podobě výhod a nevýhod.

Kapitola výsledky dizertační práce je rozdělena na několik částí a zaměřuje se na praktické využití efektivních optických funkcí, především optického zesilování, přepínání a filtraci optických signálů v různých testbedech, infrastruktúře pro přenos ultra-stabilních veličin a multiband polygonu.

První část je zaměřena na univerzální prostředí, tedy testbedy, a to především na dynamický fotonický testbed a longhaul testbed. Dynamický fotonický testbed se vyznačuje různou rekonfigurací a uspořádáním různých optických komponent, ať už pasivních či aktivních. Longhaul testbed umožňuje testování různých systémů na dlouhé vzdálenosti.

Druhá část se věnuje vývoji prototypů obousměrných optických zesilovačů pro přenos ultra-stabilních veličin, převážně na principu vláknového zesilovače využívajícího erbiem dopované vlákno a polovodičový zesilovač. Vývoj různých typů těchto obousměrných optických zesilovačů je brán hlavně z hardwarové stránky a výsledky jsou opřeny o užité vzory a patenty sdružení CESNET (Czech Education and Scientific NETwork – Česká síť pro vzdělání a vědu), na kterých jsem se aktivně podílel.

Třetí část popisuje přenos ultra-stabilních veličin ve vláknových sítích. V této části je chronologicky popsána infrastruktura a potřebné zařízení pro přenos ultra-stabilních veličin, jak jej provozuje sdružení CESNET, jenž je průkopníkem v této oblasti na území České republiky, jak efektivně využít vláknovou optickou infrastrukturu pro tento specifický druh přenosu. Dále je charakterizován obecný popis principu přenosu ultra-stabilních veličin včetně filtrace optického spektra pro tento druh přenosu. Následně jsou zmíněny různé možnosti vzniku a potlačení nežádoucího efektu samovolného laserování, tedy různé principy či postupy jak jej eliminovat, aby nedocházelo k degradaci přenosu.

Poslední část praktických výsledků práce je zaměřena na realizaci a popis multiband polygonu na území České republiky. Multiband polygon umožňuje různé konfigurace optické topologie, díky které bylo možné si ověřit přenos ultra-stabilních veličin, tedy stabilitu optické linky na různých vlnových délkách za pomoci dvou odlišných metod end-to-end a in loop. Dále byla v multiband polygonu ověřena metoda výkonového vyvažování kaskád obousměrných optických vláknových zesilovačů využívající erbiem dopované vlákno.

2 Současný stav poznání

2.1 Optické zesilování

První zmínky a pokusy s optickým zesilováním se datují k přelomu 70. a 80. let, kdy se rozvíjely první prototypy optických zesilovačů. Optické zesilovače vznikly za účelem kompenzace výkonových ztrát, ke kterým dochází během přenosu v optické trase na delší vzdálenosti. Značný vliv na výkonovou ztrátu během přenosu udávají vlastnosti optického vlákna. Jako nežádoucí vlastnosti optického vlákna lze uvést nečistotu materiálu, mikroohyby, makroohyby, zpětný rozptyl a další vlastnosti, u kterých dochází ke ztrátám energie v optickém vlákně, neboli útlumu během přenosu signálu. Tento typ útlumu se nazývá měrný útlum a jeho jednotka se udává v dB/km. Nelze opomenout, že na útlum signálu mají značný vliv veškeré optické komponenty, které se nachází v optické trase, jako jsou například: optické konektory, svary, útlumové články, vazební členy (couplery, výkonové děliče a splitery) a mnohé další pasivní ale i některé aktivní komponenty. Uvedené komponenty vkládají do optické trasy vložný útlum, který je dán nežádoucími vlastnostmi dané komponenty a jeho jednotka se udává v dB.

První opakovače byly založeny na EOE (Electric-Optic-Electric – Elektro-opticko-elektrické) konverzi, kde bylo nutné převádět elektrický a zesílený signál zpět na optický, což bylo příliš pomalé, složité, neefektivní a především náročné z pohledu výrobního hlediska. Takové řešení bylo a je nevhodné pro vysokorychlostní přenosy z důvodu pomalé odezvy elektroniky, která nestačí zpracovat rychlý optický signál. Proto bylo nutno hledat řešení v podobě čistě optických zesilovačů, které tuto EOE konverzi zcela opomíjejí.

Čistě optický zesilovač pracuje pouze v optické doméně, čímž je umožněno přímé zesílení optického signálu. Jinými slovy, nepotřebuje jej převádět na elektrický signál pro potřeby regenerace. Princip zesilovače je založen na existenci stimulovaného rozptylu záření v materiálu vyžadujícím optické čerpání energie.

Mezi základní parametry optických zesilovačů můžeme zařadit: zisk, křivku zisku, saturace zisku, šířku pásma zesilovače, SNR, šumové číslo, ASE, maximální výstupní výkon a vložný útlum. Tyto jednotlivé jsou popsány v dizertační práci.

2.2 Rozdělení optických zesilovačů

2.2.1 Podle způsobu optického čerpání

Pro správnou funkci optického zesilovače je nezbytné dodání potřebné energie v podobě optického čerpání. Základní typy zesilovačů jsou:

- **SOA** (Semiconductor Optical Amplifier – Polovodičový zesilovač) – energie je dodána ve formě elektrického proudu,
- **xDFA** (xDoped Fiber Amplifier – xDopovaný vláknový zesilovač, kde x je vzácný chemický prvek, např. Erbium, Thulium a další) – energie je dodána ve formě záření z pumpy s konkrétní vlnovou délkou,
- **Ramanův zesilovač** – energie je generována jako postranní vid záření v úzkém pásmu kolem jiné vlnové délky vlivem Ramanova rozptylu.

Z principu funkce zesilovače vyplývají různé možnosti nasazení v optickém přenosovém systému, jelikož různé způsoby optického čerpání vedou k odlišným vlastnostem zesilovačů.

Níže v textu budou obecně zmíněny pouze optické zesilovače typu EDFA a SOA. Podrobný popis a ostatní druhy jsou zmíněny v samotné dizertační práci.

2.2.2 Podle umístění

Podle umístění optického zesilovače v optickém komunikačním přenosovém systému lze zesilovače rozdělit na tři typy:

- **Booster – výkonový zesilovač**

Umísťuje se hned na začátek optického přenosového systému. Bude-li brán v potaz DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing – Hustý vlnový multiplex) přenosový systém, tak se výkonový zesilovač umísťuje hned za optickým multiplexerem, jenž slučuje všechny optické signály z jednotlivých vysílačů do jednoho optického vlákna. Poté tyto optické signály vstupují do výkonového zesilovače, kde dojde k zesílení na stejnou maximální možnou hodnotu.

- **Inline – linkový zesilovač**

Umísťuje se na trase optického vlákna, typicky ve vzdálenosti 50–80 km od počátku trasy nebo jakmile výkonová úroveň signálu klesne pod hodnotu -22 dBm. Při praktickém nasazení zesilovače je vhodné udržovat výkonovou úroveň signálu nad -25 dBm, jelikož při této hodnotě dochází již k zesilování nežádoucích signálů. V tomto případě dochází k zesílení optického šumu, což vede ke vzniku chyb během přenosu.

- **Preamp – předzesilovač**

Umísťuje se na konec optického přenosového systému. V případě DWDM přenosového systému se předzesilovač umísťuje před optický demultiplexer. Úkolem optického předzesilovače je zvýšení úrovně signálu před vstupem na přijí-

mač optimálně na výkonovou hodnotu blíží se -13 dBm, tato hodnota závisí na typu přijímače.

2.3 Vláknové zesilovače, xDFA

Optické vláknové zesilovače využívají k zesílení signálu optické vlákno dopované vzácnými zeminami, v němž dochází k zesílení.

Pro zesilovací efekt se používá jeden z níže uvedených prvků vzácných zemin:

- **Erbium (Er)**: pro vlnové délky v pásmu 1520–1610 nm,
- **Praseodymium (Pr)**: pro vlnové délky kolem 1300 nm,
- **Ytterbium (Yt)**: pro vlnové délky v pásmu 1055–1090 nm,
- **Neodymium (Nd)**: pro vlnové délky v pásmu 908–942 nm,
- **Thulium (Tm)**: pro vlnové délky v pásmu 1450–1510 nm.

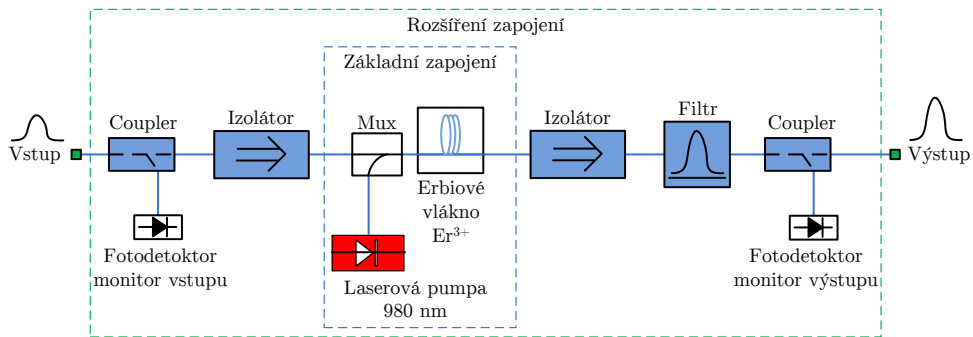
Z výše uvedených typů vláknových optických zesilovačů se v současné době nejvíce v telekomunikacích využívá erbiem dotovaný vláknový zesilovač EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier – Erbiem dotovaný vláknový zesilovač), který byl vynalezen v roce 1985 [1]. Tento vynález vedl k revoluci v optických komunikacích, protože umožnil nahrazení 3R regenerátorů na linkách limitovaných útlumem vlákna, a tím pádem umožnil vytváření opticky transparentních sítí. V současnosti je technologie vláknových zesilovačů na bázi erbiem dopovaného vlákna z pohledu finančních nákladů, pracovního spektra vlnových délek a generovaného zisku, nejvhodnějším optickým zesilovačem pro WDM (Wavelength Division Multiplexing – Vlnový multiplex) systémy pracující v C a L pásmu.

2.3.1 Princip a uspořádání EDFA zesilovače

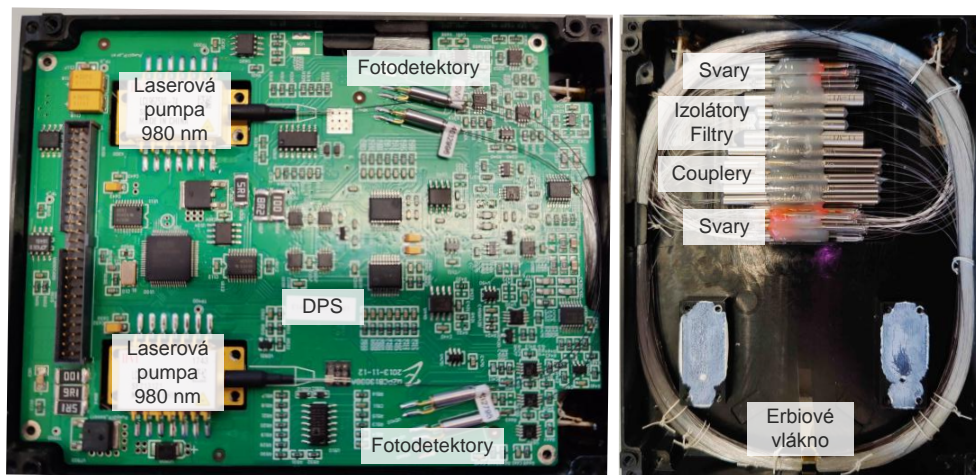
Princip EDFA zesilovače je v obecné rovině totožný s principem práce tří-hladinových laserů. Vlivem navázaného záření z laserové pumpy s vlnovou délkou 980 nm nebo 1480 nm do erbiového vlákna o délce několika metrů, dochází k excitaci atomů dopovaného vzácného prvku, v tomto případě iontů Erbium Er^{3+} [2]. Podrobný popis principu přechodu mezi jednotlivými hladinami je vysvětleno v dizertační práci.

Obrázek 2.1 znázorňuje blokové uspořádání komponent u EDFA zesilovače jak základního, tak rozšířeného typu. Základní uspořádání je tvořeno hlavními prvky, a to laserovou pumpou o vlnové délce 980 nm, která může být zapojena v dopředném, zpětném a nebo obou směrech, dále multiplexorem a speciálním optickým vláknem, které je dopováno Erbiem Er^{3+} . V multiplexoru dochází ke sloučení slabého přenášeného optického signálu se signálem z laserové pumpy. Sloučený signál vstupuje do optického vlákna dopovaného Erbiem, kde dochází k excitaci signálu a tedy jeho zesílení.

Dvojice optických izolátorů, připojených z každé strany vlákna, zamezuje zpětnému šíření signálu ze záření, aby nedošlo k poškození laseru. Izolátor na vstupu optického zesilovače zabraňuje záření vzniklému při spontánní emisi, aby nedocházelo k narušování předchozí fáze zesilování. Izolátor na výstupu zamezuje vysílání laserových paprsků a možnému poškození v případě, že se výstupní paprsek odrazí zpět do zesilovače. Za výstupním izolátorem laseru se nejčastěji připojuje optický filtr, který vhodně upravuje spektrum zesíleného signálu. Filtr zajišťuje zploštění křivky zisku v C pásmu. Dále jsou zde couplery, které vydělují velmi malou část optického signálu k připojeným fotodetektorům, jež monitorují výkonové úrovně optického signálu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače. Provedení EDFA modulu obsahují dvě stage v tomto případě předzesilovač (booster) a výkonový zesilovač (preamp) je znázorněno na obrázku 2.2.



Obr. 2.1: Blokové zapojení vláknového zesilovače EDFA [2].



Obr. 2.2: Provedení modulu EDFA zesilovače obsahující booster a preamp.

2.4 Polovodičové zesilovače

U tohoto typu zesilovače se zisk generuje ve struktuře polovodiče, nikoliv v materiálu optického vlákna, jak je známo u EDFA zesilovače nebo Ramanova zesilovače. Z toho vyplývá, že čerpání není optické, jako u předchozích zmíněných typů. U polovodičového zesilovače SOA je energie dodána v podobě elektrického budícího pole. Pro konstrukci SOA jsou vhodné polovodičové materiály, které se vyznačují dobrou kvantovou účinností. Kvantová účinnost je dána maximálním počtem generovaných fotonů, který je vztažen k počtu excitovaných nosičů náboje. Jako příklad těchto prvků lze uvést: arsen (*As*), gallium (*Ga*), hliník (*Al*), indium (*In*) a fosfor (*P*). Pro konstrukci SOA se používají sloučeniny těchto prvků např. *GaAs*, *AlGaAs*, *InGaAs*, *InGaAsP*, *InAlGaAs*, a *InP* [3].

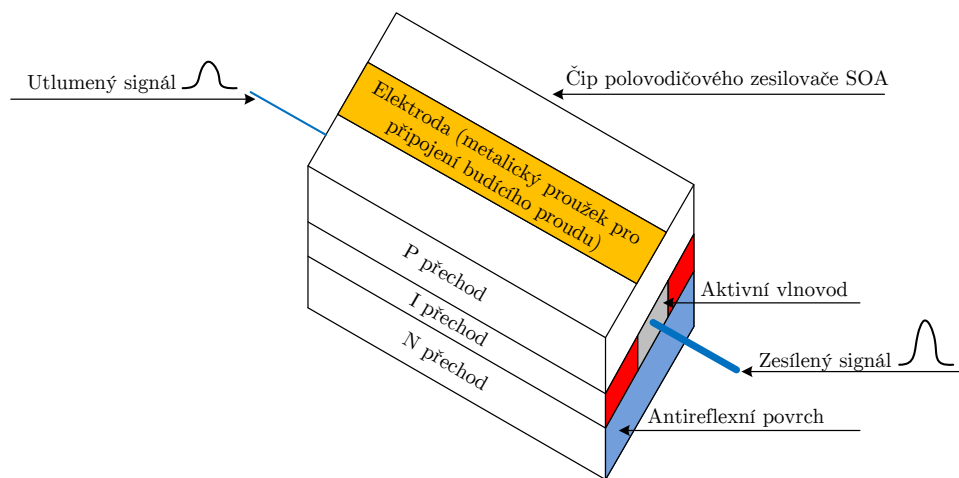
2.4.1 Proces stimulované emise záření u SOA zesilovače

Nejprve dochází k stimulované absorpci, kdy je pohlcená energie předána elektronu ve valenčním pásu polovodiče k tomu, aby mohl být excitován na vyšší energetickou hladinu ve vodivostním pásu. Energie dopadajícího fotonu musí být dostatečná na překonání zakázaného pásu polovodiče. Následkem čerpání elektrické energie v našem případě přes elektrodu připojenou k polovodiči, dojde k tzv. excitaci polovodičového média p-n přechodu. Dochází-li ke značné populaci elektronů nacházejících se na vyšší energetické hladině, dojde k jevu označovanému jako inverze populace. Jinými slovy, počet elektronů (nosičů) ve vodivostním pásu je vyšší než počet elektronů ve valenčním pásu, což je základ pro stimulovanou emisi – více fotonů. Při vstupu optického signálu do média p-n přechodu, kde se elektrony nachází na vyšší energetické hladině, stimuluje vstupní signál tyto elektrony, které následně opouští vyšší energetickou hladinu za současného uvolnění svojí energie. Vyzářením fotonů dochází ke stimulované emisi a tím zesílení vstupního signálu. Fotony vyzářené při stimulované emisi jsou vysoce koherentní, mají stejný směr a fázi jako stimulující paprsek [4, 5, 3].

2.4.2 Struktura SOA zesilovače

V současné době se polovodičové zesilovače SOA vyrábí v podobě čipu, který je vložen do standardního pouzdra. Tato podoba přispívá k lepší regulaci teploty, tedy jeho lepší teplotní stabilitě, která zaručuje stabilitu pracovní vlnové délky a možnost dosažení maximálního zisku. Struktura polovodičového zesilovače je znázorněna na obrázku 2.3 a je velmi podobná struktuře polovodičového Fabryho-Perotova laseru. Podstatným rozdílem je, že laser je vybaven reflexní plochou rezonátoru, která slouží pro násobení výkonu a spolu s mřížkou k selekci vidů. SOA zesilovač je naopak

vybaven antireflexní vrstvou, která zabraňuje vzniku rezonance. Antireflexní vrstva je velice důležitá, v praxi je realizována dielektrickým materiálem na obou koncích (čelech) čipu a vyznačuje se odrazy nižšími než 0,001 % a z toho důvodu záření vystupuje ze SOA bez odrazů a jeho míra je srovnatelná se ziskem média [4]. V praxi se používá „šikmá“ antireflexní plocha, aby se zamezilo zpětnému odrazu. Kolem aktivní vrstvy se nachází plášťová vrstva. Aktivní oblast v zařízení zesiluje vstupní signál. Externí zdroj elektrického proudu dodává energii pro zesílení. Vložený aktivní vlnovod je využit pro usměrnění šířící se vlny do aktivní oblasti. Nicméně optické usměrnění není úplné, a proto část signálu projde do pláště. Výstupní signál je doplněn šumem, který se nazývá ASE, tento přidaný šum vzniká během samotného procesu zesílení a není možné se jej zbavit kompletně [6, 5].



Obr. 2.3: Struktura polovodičového optického zesilovače [3].

Hybridní konfigurace různých typů optických zesilovačů a jejich srovnání je popsáno v samotné dizertační práci.

3 Cíle práce

Průkopníkem v oblasti vývoje, rozvoje a inovací různých druhů testbedů, speciálních fotonických zařízení a vláknové infrastruktury sloužící pro různé přenosy (klasická telekomunikační data a ultra-stabilních veličin) na území České republiky je sdružení CESNET. Sdružení bylo založeno v roce 1996 vysokými školami společně s Akademií věd České republiky. Provozuje a rozvíjí národní e-infrastrukturu pro vědu, výzkum a vzdělávání, jejíž součástí je rozsáhlá počítačová síť, výpočetní gridy, datová úložiště, různé laboratoře a prostředí pro spolupráci a inovaci v různých oblastech výzkumu.

Vytvoření univerzálního prostředí, tedy testbedu, a objevování jeho možností a různých využití mělo a má významný dopad na vývoj, ověření a inovaci současných telekomunikačních technologií a rozvíjejících se nových aplikací a služeb.

Pro sdružení CESNET to bylo motivací k vytvoření vlastního univerzálního prostředí. Aby vzniklo takovéto prostředí, které by bylo vhodné pro testování různých přenosových technologií, jež se začínaly rozvíjet v 90 letech, bylo zapotřebí si taková vhodná zařízení pořídit, což nebylo v té době možné, jelikož optické zesilovače a přepínače byly velice finančně nákladné. Proto došlo k rozhodnutí jít cestou vlastního vývoje těchto zařízení, která následně byla chráněna známkou Czech Light a postupem času byla tato zařízení nasazována do reálné sítě, ze které se v současné době stala národní e-infrastruktura pro vědu, výzkum a vzdělávání.

Sdružení CESNET se během budování své infrastruktury pro přenos nejen telekomunikačních dat, ale i přenosu ultra-stabilních veličin, potýkalo s otázkou efektivního využití finančních prostředků z pohledu pronájmu vláknových optických tras. Z počátku docházelo k pronájmu vláken pro každou službu tzn. každá služba má své optické vlákno, ale od nástupu de/multiplexačních technik dochází k výraznému ušetření finančních prostředků a není potřeba pronajímat další vlákna. V současné době se používá koncept páru vláken a v efektivním případě pouze jedno vlákno pro klasický přenos telekomunikačních dat, a to za využití band spliteru, který vhodně rozdělí spektrum pro přenos a de/multiplexeru na každé straně trasy (na začátku či konci), který umožní rozdělení a sloučení optických kanálů do optického vlákna. Aby bylo možné do současného řešení přidat další službu, třeba přenos ultra-stabilních veličin, bylo zapotřebí vložit do dané optické trasy tvořené párem vláken speciální optické filtry, které spektrálně odfiltrují přenos klasických telekomunikačních dat od přenosu ultra-stabilních veličin, aby nedocházelo k vzájemnému ovlivňování během přenosu.

Dále bylo zapotřebí vyvinout zařízení, které umožní obousměrný přenos této aplikace. Jako nejvýhodnější a nejefektivnější varianta připadá v úvahu prototyp modulární stavebnice obousměrného optického zesilovače. Modularita této stavebnice spočívá v různých možnostech osazení různých typů modulů jakožto: napájecích zdrojů, zesilovačů a dalších zařízení, které zlepšují funkci prototypu.

Na základě výše zmíněných myšlenek bylo docíleno těchto cílů v dizertační práci:

- vývoj a rozvoj testbedů pro speciální aplikace a přenosy,
- vývoj, sestavení a testování prototypů obousměrných optických zesilovačů pro speciální přenosy ultra-stabilních veličin,
- rozvoj vláknové infrastruktury pro přenos ultra-stabilních veličin,
- realizace multiband polygonu pro přenos ultra-stabilních veličin,
- ověření a měření výkonového vyvažování kaskád obousměrných optických zesilovačů v multiband polygonu.

4 Postup řešení

4.1 Testbed – Univerzální prostředí

Testbed je obecné prostředí určené k testování a provádění experimentů, kde se počítá s možným nepředvídatelným chováním optických prvků, zařízení a ostatní využitých technologií. Velkou výhodou tohoto prostředí je, že případný kolaps experimentu nebo testovaného systému nezpůsobí žádné škody v produkční síti. V současné době jsou tři způsoby, jak lze realizovat testbed.

První možností je využití zdrojů a kapacity produkční sítě. Tato možnost přináší dvě podstatné nevýhody. Nelze testovat technologie nekompatibilní s technologiemi produkční sítě. Druhou nevýhodou jsou omezené možnosti izolování experimentu od produkční sítě.

Druhou možností je vybudování speciální infrastruktury pro konkrétní experiment. Zde je patrné, že vybudování takové infrastruktury bude velice nákladné, technicky složité, pracné a časově náročné mnohdy i více než samotný experiment. Především další modifikace takového testbedu pro nové experimenty je velice pracná a náročná.

Poslední možností je využití sdíleného prostředí pro spolupráci, kde se využívá vícevrstvé řízené síťové prostředí pro experimenty.

Vývojem testbedů se v České republice zabývá výzkumný tým oddělení Optických sítí sdružení CESNET, kterého jsem členem a podílím se na vývoji různých testbedů a prototypů z pohledu hardwaru.

4.1.1 Dynamický fotonický testbed

Na půdě CESNETu vznikla myšlenka dynamického fotonického testbedu v polovině roku 2013. Zásadní bylo správné vyhodnocení funkčních požadavků a volba vhodných technologií. V úvahu připadalo využití temných vláken DF (Dark Fiber – Temné vlákno) a EF (Experiment Facility – Experimentální vybavenost). Czech Light trasy využívající vlastní vyvíjené Open DWDM Czech Light zařízení, které výzkumníci oddělení Optických sítí sdružení CESNET neustále vyvíjí a zdokonalují.

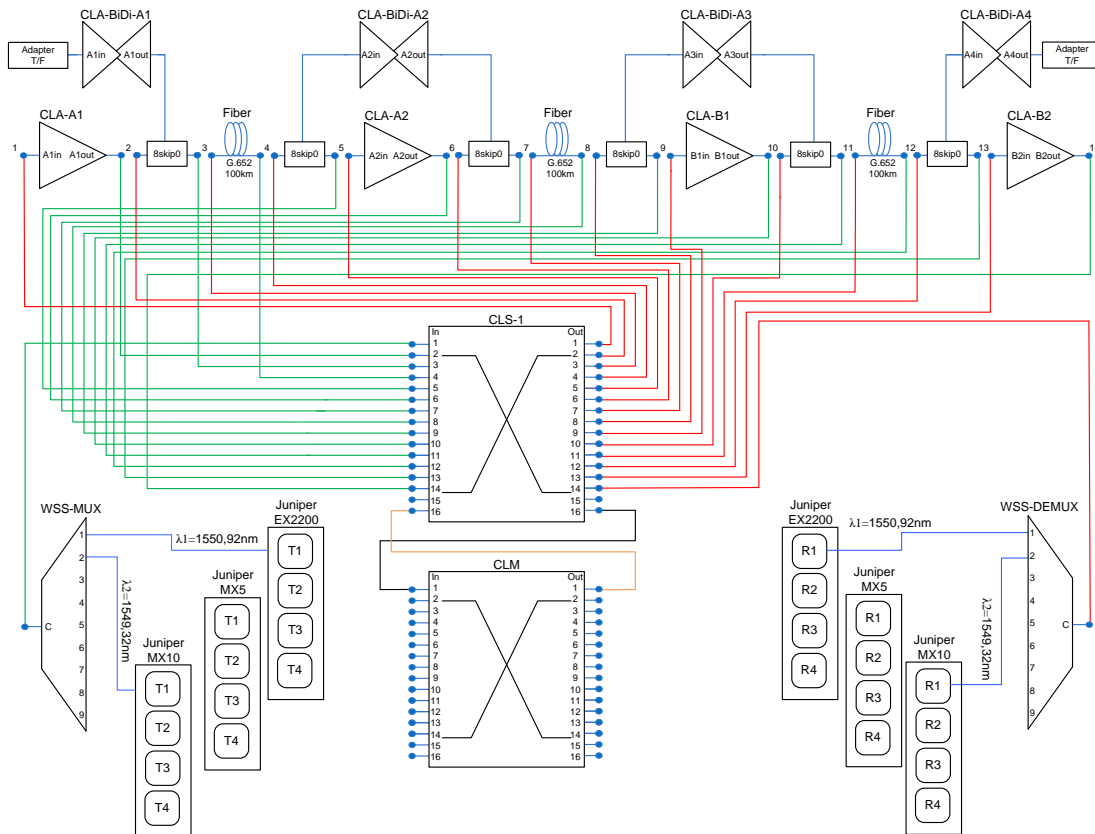
V roce 2014 vzniklo první laboratorní demo „One Setup“, které bylo tvořeno optickými cívkami s vláknem typu G.655 o celkové délce 300 km a optickými zařízeními rodiny Czech Light: EDFA optický zesilovač CLA, optický přepínač 16×16 CLS (Czech Light Switch) založený na přepínacím systému MEMS (Micro-Electro-Mechanical System – Mikro-elektro-mechanický systém) a optický multicástový přepínač 16×16 CLM (Czech Light Multicast switch).

Začátkem roku 2015 došlo k rozšíření dynamického fotonického testbedu, který umožňuje sdílení zdrojů jakožto optických vláken, de/mux, zesilovačů, optických přepínačů a dalších optických zařízení na fotonické vrstvě. Vznikla tím flexibilní, snadno a rychle rekonfigurovatelná, reálná optická infrastruktura, která poskytuje služby uživatelům a experimentátorům.

Dynamický fotonický testbed je umístěn ve dvou rackích. V prvním racku jsou umístěna aktivní optická zařízení. Mezi nejdůležitějšími zařízeními, které umožňují dynamiku tohoto testbedu jsou dva optické přepínače 16×16 CLS, které slouží jako centrální bod pro připojení nebo odpojení optických komponent (de/mux, optických vláken, zesilovačů a kompenzátorů). To znamená, že obsluhující výzkumník se může přes SSH (Secure Shell – Zabezpečený komunikační protokol) protokol, buď pomocí příkazové řádky nebo aplikace Putty, vzdáleně připojit k tomuto optickému přepínači, kde si může podle svých představ nakonfigurovat jakýkoliv scénář svého testbedu. Dalším významným prvkem je optický multicástový přepínač 16×16 CLM, který slouží jako „univerzální monitorovací port“ pro připojení měřicí techniky například optického měřiče výkonu – power metr, optického spektrálního analyzátoru – OSA, optický reflektometr OTDR (Optical Time Domain Reflectometry – Metoda pro měření a analýzu optických tras, založena na Rayleighově rozptylu) nebo DWDM OTDR. V druhém racku jsou umístěny optické cívky různých typů a délek, kterými lze vytvořit dvě nezávislé trasy. Jedna optická trasa je tvořena optickými cívkami s vláknem typu G.652 včetně kompenzátorů disperze o maximální délce 300 km, kde délka vlákna jedné optické cívky je 50 km. Tato trasa je převážně určena pro přenos dat. Druhá optická trasa je tvořena optickými cívkami s vláknem typu G.655 o maximální délce 300 km, kde délka vlákna v jedné optické cívce je 25 km. Tato trasa je převážně určena pro přenos speciálních fotonických služeb jako přenosu přesného času a ultra-stabilní frekvence za pomoci obousměrných optických EDFA zesilovačů od společnosti IDIL [7].

V roce 2018 proběhl upgrade druhé části testbedu, který se stará o obousměrný přenos a speciálních aplikací (presného času a ultra-stabilní frekvence). A to zejména výměně obousměrných optických EDFA zesilovačů od komerční firmy IDIL za vlastní vyvíjené řešení obousměrného optického EDFA zesilovače CLA BiDi (Czech Light Amplifier Bidirectional), na kterém jsem se podílel a to převážně z hardwarové stránky, jeho designu, sestavení a otestování. Softwarovou část řešili ostatní kolegové v oddělení optických sítí CESNET. Více se tomuto prototypu a jeho možnému dalšímu vývoji se budu věnovat v kapitole 4.2. V následujícím roce došlo k modifikaci testbedu, která spočívala v přepojení spodní části obousměrného přenosu T/F do horní části testbedu, která se zabývá přenosem klasických telekomunikačních dat, viz obrázek 4.1. T/F část byla zapojena přes optické filtry 8skip0, které vydělily část optického spektra pro tento druh přenosu a to v rozmezí 1540–1546 nm.

Jelikož optické přepínače CLS-1/CLS-2 disponovaly pouze variantou 16×16 CLS, byly tímto limitovány pro připojení a odpojení optických komponent. Z toho důvodu bylo zapotřebí optické filtry 8skip0 a obousměrné zesilovače chápat jako jednu komponentu pro připojení a odpojení v testbedu. CLM opět slouží pro připojení různé měřící techniky. Schéma blokového zapojení a provedení současného dynamického testbedu je znázorněno na obrázcích 4.1.



Obr. 4.1: Blokové zapojení současného dynamického testbedu.

4.2 Obousměrné zesilovače pro speciální přenosy

Ve sdružení CESNET v roce 2015 započal vývoj obousměrného optického EDFA zesilovače pod názvem CLA BiDi, na kterém jsem se aktivně podílel z pohledu hardwaru a inovací [8, 9, 10, 11, 12, 13]. Řešení je vhodně a efektivně navrženo jako modulární zařízení pro obousměrný přenos ultra-stabilních veličin, tedy přesného času a ultra-stabilní frekvence. Tato modulární stavebnice eliminuje nevýhody komerčních obousměrných optických EDFA zesilovačů od společnosti IDIL. Tyto zesilovače byly z počátku nasazeny v CESNET infrastruktuře pro přenos T/F. Mezi

podstatné nevýhody těchto zesilovačů můžeme zařadit: robustní zařízení ve velikosti 3U, v té době pouze s napájecími zdroji DC 48 V (potřeba napájecí měnič z DC na AC napájení) a nemožnost nastavení manuálního režimu pumpy, pouze ACC (Automatic Current Control – Automatické ovládání proudu) a AGC (Automatic Gain Control – Automatické ovládání zisku).

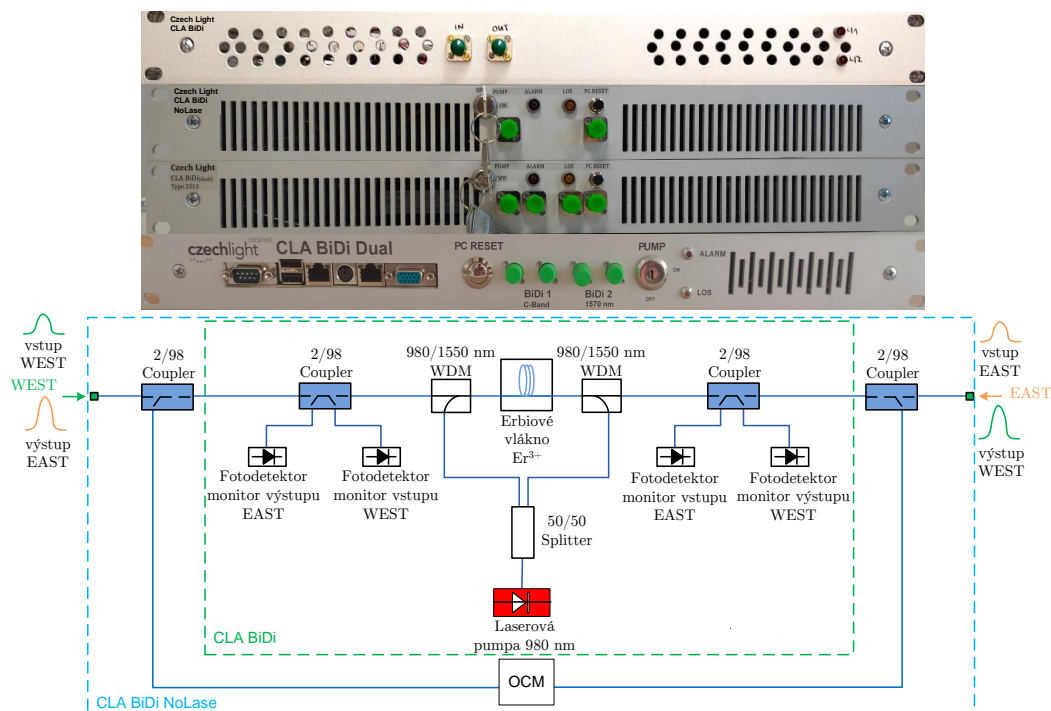
4.2.1 Prototypy obousměrných optických EDFA zesilovačů

Hardwarová část

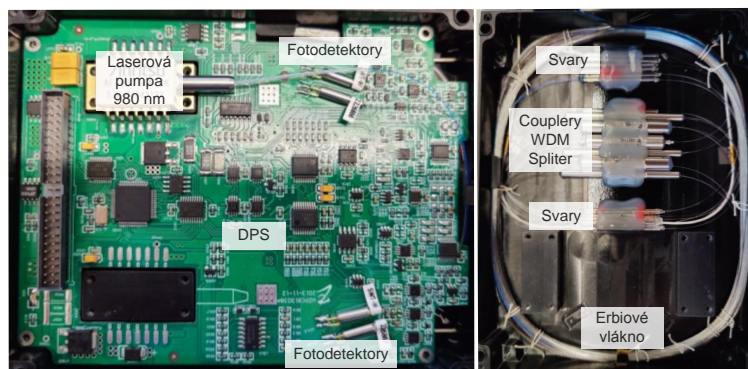
Hlavní myšlenka prototypu obousměrného optického zesilovače CLA BiDi pochází z užitého vzoru pod názvem: Modulární stavebnice zařízení pro opticky zesilované obousměrné přenosy optických signálů citlivých na časování v Internetu a jiných sítích, na kterém jsem se aktivně podílel [12]. Prototyp obousměrného optického zesilovače CLA BiDi je navržen jako modulární zařízení. Jeho modularita spočívá v počtu a typu obousměrných EDFA modulů s pumpou 980 nm, typu napájecího zdroje AC 230 V nebo DC 48 V a dalších elektronických či optických modulů, které zlepšují funkci zařízení. CLA BiDi zesilovač je navrhnout tak, aby pracoval ve vyhrazeném telekomunikačním C pásmu v rozsahu 1540–1547 nm a na pomezí C a L pásma v rozsahu 1570–1573 nm. Tato specifikace je dána především použitým typem obousměrného optického EDFA modulu.

Blokové schéma optické části na obrázku 4.2 popisuje princip obousměrného zesílení. Při srovnání s obrázkem 2.1 zapojení vláknového optického EDFA zesilovače (jednosměrného) si můžeme všimnout několika rozdílů. Obousměrné zesilovače se od klasických liší především způsobem přenosu. Přenos je zajištěn tím, že v konfiguraci optického obousměrného zesilovače jsou odstraněny tyto optické komponenty: oba izolátory a filtr na výstupu. Tyto komponenty u klasických optických EDFA zesilovačů zajistí izolaci mezi WEST a EAST přenosem a filtraci optického spektra na výstupu zesilovače. Výše uvedené rozdíly jsou patrné i na obrázcích 2.2 a 4.3, které reprezentují provedení EDFA a BiDi EDFA modulů.

U obousměrných zesilovačů se vyžaduje manuální řízení pumpy, tedy nastavení proudu pumpou, aby nedocházelo k nežádoucímu efektu samovolného laserování při velké kaskádě těchto zesilovačů nebo při použití nevhodných optických konektorů PC (Physical Connect – kolmé provedení ferule, optický konektor označen šedou nebo modrou barvou) a UPC (Ultra Physical Connect – Vylepšená verze PC konektoru, kolmé provedení ferule, optický konektor označen modrou barvou), které jsou více náchylné na odrazy a mohou způsobovat tento efekt (malé peaky uprostřed), jak je znázorněno na obrázku 4.4.



Obr. 4.2: Prototypy CLA BiDi a blokové schéma optické části [2, 12].

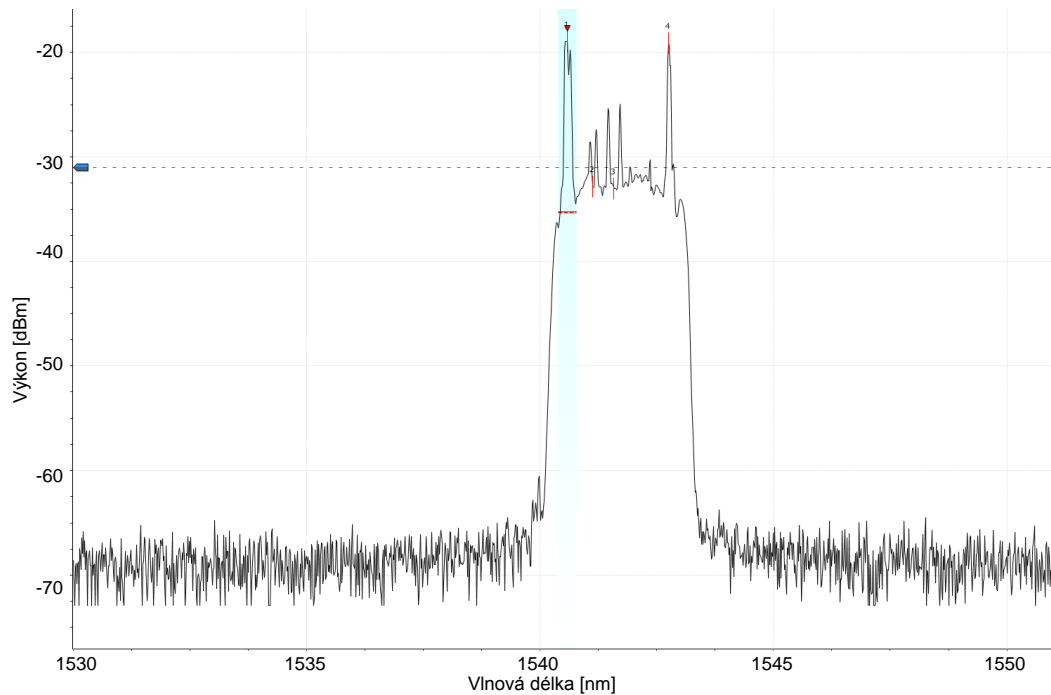


Obr. 4.3: Provedení modulu BiDi EDFA zesilovače.

Potlačení samovolného laserování je velice důležité, jelikož tento jev může degradovat synchronizaci časových značek při přenosu ultra-stabilních veličin. Více o možnosti vzniku a následné eliminaci nežádoucího efektu samovolného laserování je popsáno níže v kapitole 4.3.3.

Důležité požadavky na obousměrné optické zesilovače jsou [15]:

- modulární stavebnice umožňující vestavbu dvou obousměrných EDFA modulů pro zesilování časových signálů ve vyhrazeném C pásmu (1540–1547nm) a na pomezí C a L pásma (1570–1573 nm),



Obr. 4.4: Nežádoucí efekt samovolné laserování (malé peaky uprostřed) [2, 14].

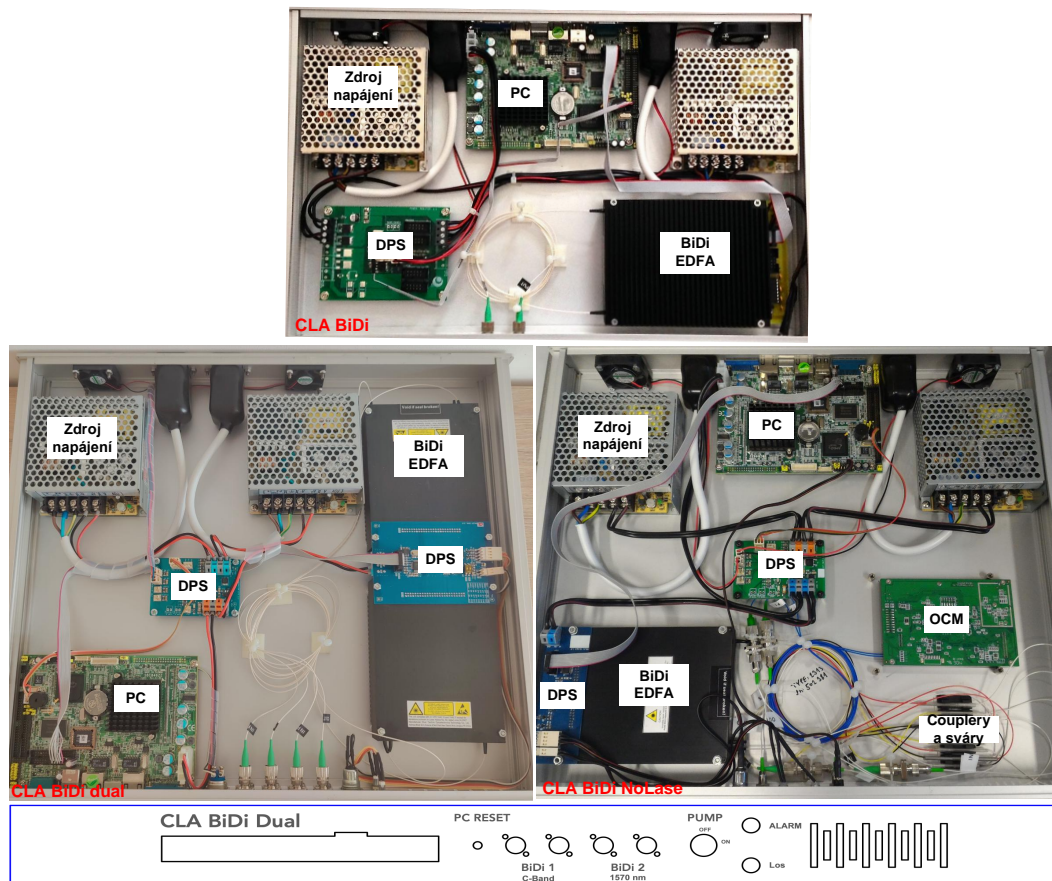
- redundantní zdroje napájení nejlépe jako hot-swap řešení,
- manuální režim nastavení proudu laserové pumpy,
- optické konektory pouze s brusem ferule APC (Angled Physical Connect – šikmé provedení ferule, optický konektor označen zelenou barvou).

V první fázi jsem navrhnul řešení s jedním obousměrným optickým EDFA modulem (prototyp označen pod názvem CLA BiDi). Ve druhé fázi řešení jsem navrhnul, vyrobil a otestoval prototyp obousměrného optického zesilovače pod názvem CLA BiDi NoLase. Prototyp v sobě obsahuje významný optický prvek označený jako OCM (Optical Channel Monitor – optický modul pro monitoring optického spektra), který se přes 2% tap (coupler 98/2) připojuje do optické konfigurace obousměrného optického zesilovače [2], jak je znázorněno na obrázku 4.2. V následující fázi vývoje a inovací byly použity dva moduly stejného, nebo jiného typu z pohledu zesilování daného optického spektra (prototyp označen pod názvem CLA BiDi dual). Současný vývoj, inovační progres a design prototypů obousměrných optických EDFA zesilovačů CLA BiDi včetně blokového schématu optické části je znázorněno na obrázku 4.2.

V horní části obrázku 4.2 jsou vidět mnou nadesignované a sestavené jednotlivé prototypy, kde na prvním místě je znázorněn úplně první sestavený prototyp CLA BiDi, na druhém místě CLA BiDi NoLase, na třetím místě starý prototyp CLA BiDi dual.

Na posledním místě je znázorněn nový prototyp CLA BiDi dual, který jsem navrhl a sestavil v roce 2021 a následně jsem několik těchto kusů osadil na Multiband polygonu 4.4.

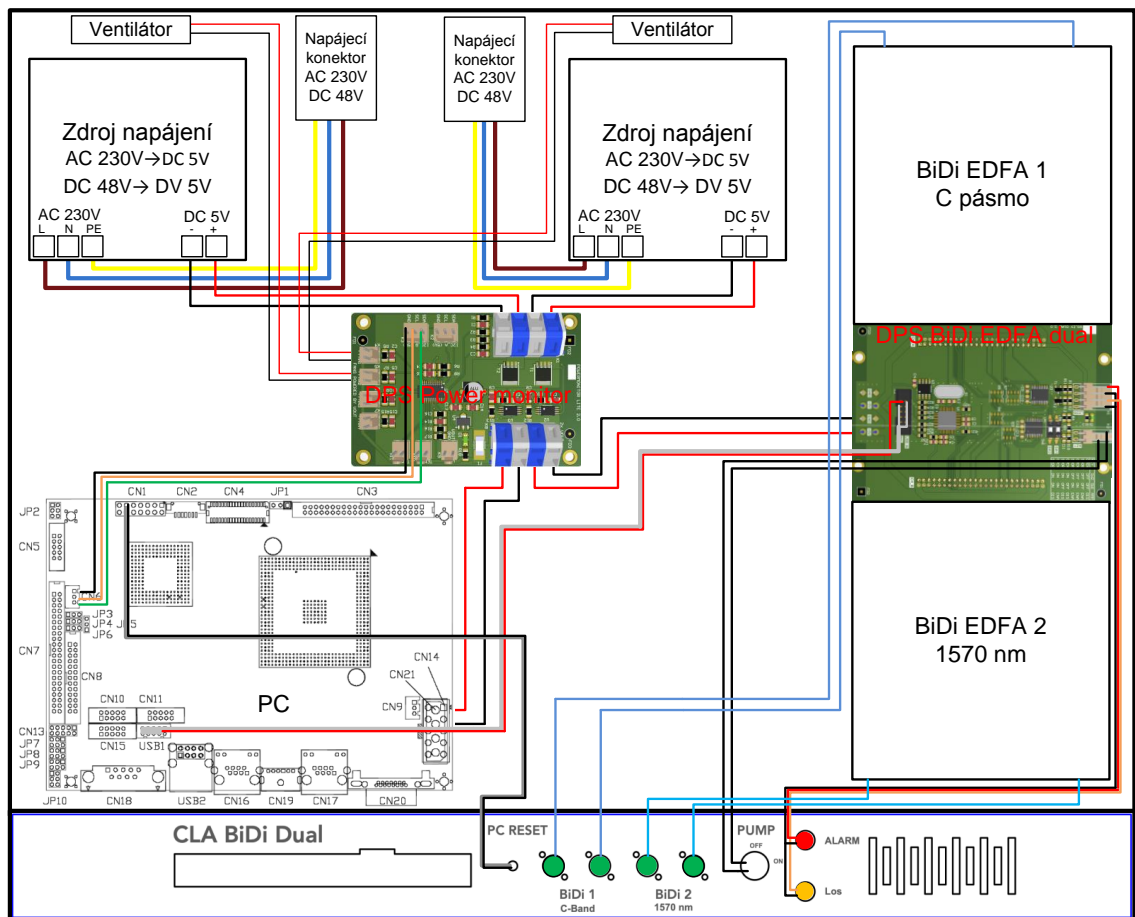
Z obrázků 4.2, 4.5 je vidět velký progres od prvního sestaveného prototypu až po ten poslední. Kde došlo k podstatné změně umístění hardwarových komponent. Dále jsem optimalizoval rozložení konektorů na čelním panelu, což přináší technikovi během instalace podstatné výhody.



Obr. 4.5: Vývoj vnitřního uspořádání komponent všech prototypů CLA BiDi [2, 12].

Pro sestavení různých typů CLA BiDi je zapotřebí několika komponent jak elektronických, tak optických. Na níže uvedeném obrázku 4.6 je znázorněné kompletní blokové schéma hardwaru včetně elektrických propojů mezi jednotlivými komponenty.

Řešení CLA BiDi dual je vhodné pro použití na párové trase pro zesílení daného časového signálu ve vyhrazením C pásmu nebo na pomezí C a L pásma. Další možnosti jak využít CLA BiDi dual je na jednovláknové trase pro přenos ultra-stabilních veličin společně ve vyhrazeném C pásmu a na pomezí C a L pásma. Vše



Obr. 4.6: Blokové schéma hardwaru CLA BiDi dual včetně propojů [12].

záleží na volbě použitých obousměrných optických EDFA modulů a preferencích přenosu. Sdružení CESNET má ve své infrastruktuře pro přenos ultra-stabilních veličin převážně nasazené řešení CLA BiDi dual. Sdružení CESNET si nechalo vyvinuté zařízení rodiny Czech Light licencovat pro komerční sféru v rámci licenční smlouvy [8] a vyvinuté řešení CLA BiDi chránit užitným vzorem [9, 12]. V současné době komerční výrobu těchto typů obousměrných optických zesilovačů zajišťují tři licenční partneři Optokon, a.s. [16, 17, 18], Czech optical solutions s.r.o. [19] a INTEL DAT, a.s. [20, 21].

4.2.2 Prototyp polovodičového obousměrného zesilovače CLA SOA

Hardwarová část

Prototyp polovodičového obousměrného optického zesilovače CLA SOA byl vyvinut z toho důvodu, aby bylo možné uskutečnit přenos ultra-stabilní frekvence z Brna do Olomouce v rámci multiband polygonu, viz více v kapitole 4.4. Byly vyvinuty a sestaveny dva prototypy, které vycházejí ze základní myšlenky dvou patentů a užitého vzoru, na kterých jsem se aktivně podílel.

- Patenty:
 - Modular kit of the spectrally flexible device for bidirectional transmissions of optical signals sensitive to timing in the internet and other networks [10],
 - Modulární stavebnice spektrálně flexibilního zařízení pro obousměrné přenosy optických signálů citlivých na časování v Internetu a jiných sítích [11].
- Užité vzor:
 - Modulární stavebnice spektrálně flexibilního zařízení pro obousměrné přenosy optických signálů citlivých na časování v Internetu a jiných sítích [13].

Proč pro tento druh přenosu na vlnové délce 1458 nm (S pásmo) nebyl využit klasický obousměrný zesilovač CLA BiDi, je dáno především zvolenou vlnovou délkou, proto nelze použít EDFA zesilovače [15].

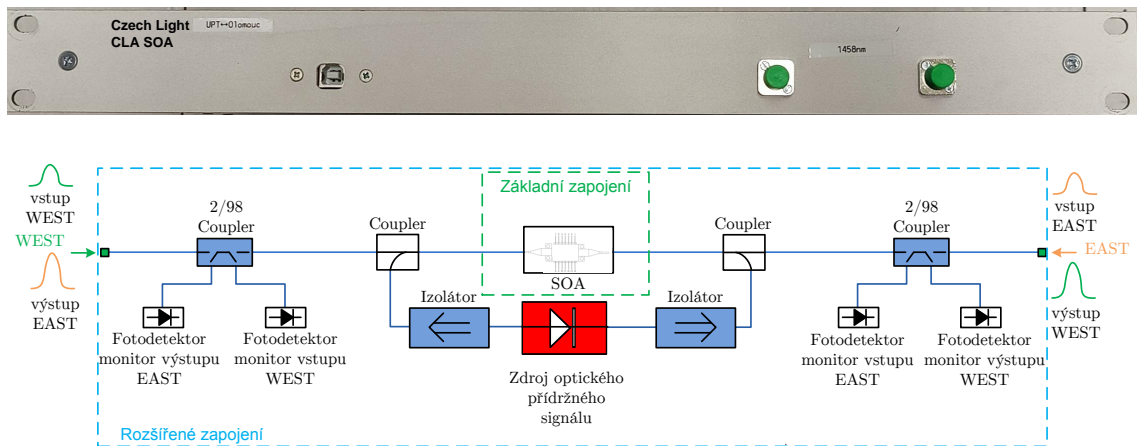
Nejdůležitější komponentou prototypu CLA SOA je polovodičový obousměrný zesilovač SOA, který byl vyroben na zakázku, jeho nejdůležitější technické parametry jsou [15]:

- provedení pouzdra typu butterfly se 14 piny,
- vlnový rozsah 1450–1460 nm,
- maximální výstupní výkon > 10 dBm,
- zesílení pro vlnovou délku 1458 nm > 16 dB.

Na níže uvedeném obrázku 4.7 je znázorněno blokové schéma optické modulární stavebnice, kde je zobrazeno základní a rozšířené řešení. V multiband polygonu je použito základní řešení bez zdroje optického přídržného signálu včetně ostatních komponent. Základní řešení pro obousměrné přenosy optických signálů je založeno pouze na SOA samotných. SOA můžou být velmi citlivá na amplitudovou modulaci přenášených signálů a dále také na zpětný rozptyl a odrazy, které mohou způsobovat jak nestabilitu či saturaci zisku, tak i nežádoucí efekt samovolného laserování SOA [22, 10, 11, 13].

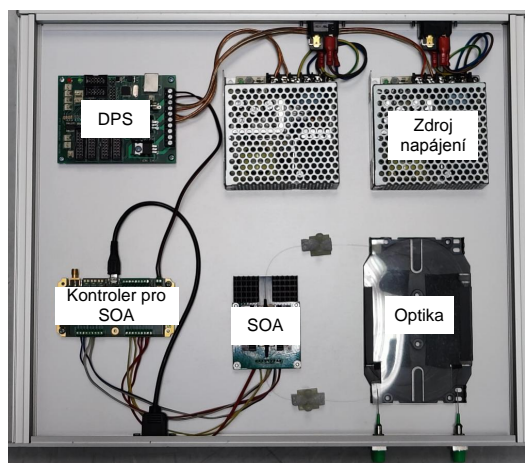
Proto je ideální využít rozšířené zapojení, jak je znázorněno na obrázku 4.7, které zvyšuje odolnost proti odrazům z obou směrů linky EAST a WEST. Tím dochází k potlačení nežádoucího efektu samovolného laserování.

Rozšířené řešení obsahuje zdroj optického přídržného signálu, přičemž je vhodné jej použít s nastavitelným výstupním výkonem a nebo s nastavitelnou vlnovou délkou. Tento zdroj optického přídržného signálu je opticky propojen se svými jednotlivými výstupy s izolátory a dále přes vlnově citlivé couplery s jedním optickým vstupem nebo výstupem je společně propojen s optickým polovodičovým zesilovačem. Izolátory jsou zde tedy zařazeny jen v cestě přídržného signálu, kde jejich umístění nevádí, a naopak odrazy se přes ně nešíří a nerozladují zdroj optického přídržného signálu. Ostatní vlnově citlivé couplery v provedení 98/2 slouží jako monitorovací porty pro jednotlivé fotodetektory směrů EAST a WEST [10, 11, 13].



Obr. 4.7: Blokové schéma optické části CLA SOA [10, 11, 13].

Na obrázku 4.8 je znázorněno provedení prototypu CLA SOA základní konfigurace optické části.



Obr. 4.8: Prototypu CLA SOA základní konfigurace optické části [10, 11, 13].

Prototyp rozšířené verze CLA SOA, který by obsahoval zdroj optického přídržného signálu včetně SOA a ostatních komponent nebylo možné zrealizovat. A to z důvodu pozastavení výroby některých optických komponent kvůli minulé a opět začínající pandemii COVID-19 na území Číny.

V dizertační práci se o SW části okrajově zmiňuji aby bylo patrné, jak se obousměrné optické zesilovače rodiny Czech Light dají spravovat, ovládat a monitorovat. Software pro zařízení rodiny CzL vyvíjejí kolegové ze sdružení CESNET a já jsem se na nich podílel pouze jako tester a uživatel.

4.3 Přenos ultra-stabilních veličin ve vláknových sítích

V současné době se v optických vláknových sítích začínají pomalu používat i jiné signály než jen datové, které se běžně používají pro přenos dat v internetu. Jde především o přenos přesného času a ultra-stabilní frekvence. Přesný čas a ultra-stabilní frekvence pomáhají ke zlepšení přesnosti a rozlišení široké škály přesného měření pro řadu dnes významných oborů, např. metrologie, navigace, geodézie, astronomie, radioastronomie, seismologie a vědy o Zemi [23, 24].

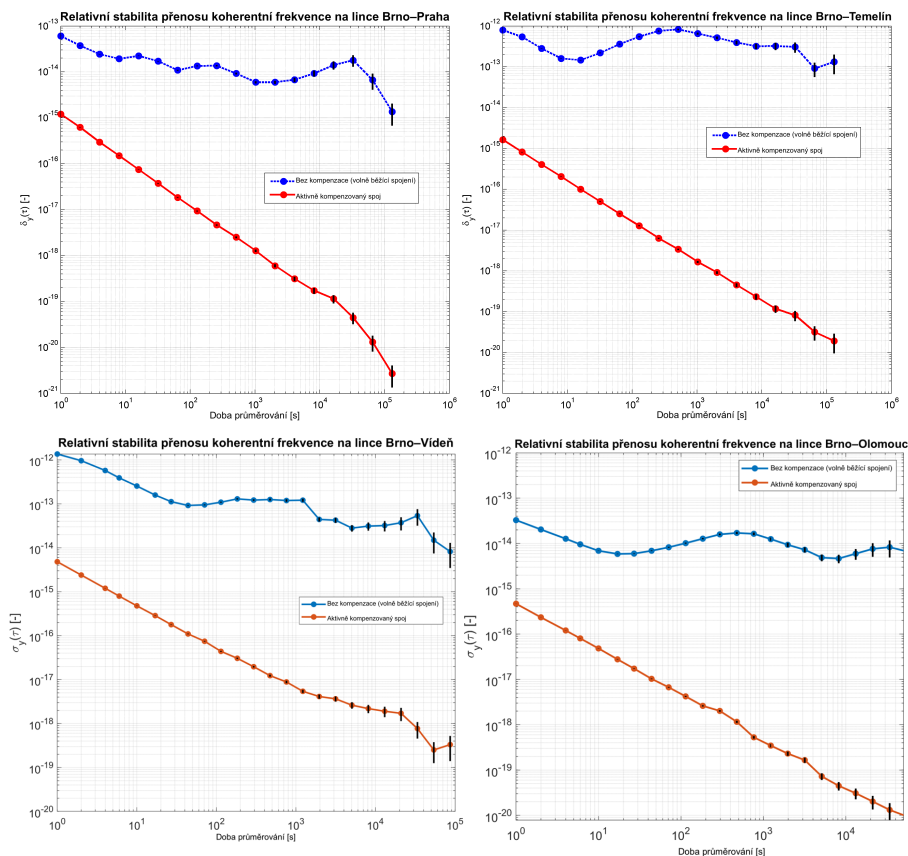
Sdružení CESNET pro tento specifický přenos využívá své vyvinuté řešení, obousměrné vláknové zesilovače z rodiny Czech Light CLA BiDi, založených jak na EDFA tak i na SOA. Aby nedocházelo k ovlivňování datového provozu, byly navrženy a vyvinuty speciální optické filtry, které se vkládají do optické trasy, aby vybočily dané spektrum pro tento typ přenosu.

Díky použité metodě aktivní kompenzace, kterou vyvíjí ÚPT, bylo docíleno u vláknových tras (Praha–Brno, Brno–Temelín, Brno–Olomouc a Brno–Vídeň) časové stability v rozmezí mezi $\times 10^{-15}$ až $\times 10^{-19}$ [25, 26, 27, 28]. Ve srovnání s tradiční satelitní metodou GPS, která dosahuje svých limitů a mnohem menší časové stability a to v řádu $\times 10^{-11}$ až $\times 10^{-13}$ [14].

Jednotlivé srovnání stability optických linek Praha–Brno, Brno–Temelín, Brno–Olomouc a Brno–Vídeň) je možné vidět na obrázku 4.9.

V současné době je v provozu více jak 2500 km a útlum tras činní přes 670 dB, který je kompenzován 44 ks optických zesilovačů a z toho je 32 ks obousměrných optických EDFA zesilovačů rodiny Czech Light CLA BiDi. Na výše uvedeném obrázku 4.10 je znázorněna infrastruktura pro přenos ultra-stabilních veličin přesného času a ultra-stabilní frekvence včetně přenosu WR a multiband polygonu [31, 32]. Technická specifikace vláknových tras včetně použité technologie a T/F přenosu je znázorněna v tabulce 4.1.

Pro přenos přesného času a ultra-stabilní frekvence je zapotřebí mít vhodný, kvalitní a přesný etalon pro porovnání časových signálů (časových značek). Za takové etalony můžeme považovat kvantové logické hodiny NITS (National Institute of



Obr. 4.9: Relativní stabilita přenosu ultra-stabilní frekvence na významných linek v infrastruktuře pro přenos ultra-stabilních veličin [25, 26, 29, 27, 28, 30].



Obr. 4.10: CESNET infrastruktura pro přenos ultra-stabilních veličin [2, 23, 24, 33, 34].

Standards and Technology – Národního ústavu pro standardy a technologie) optické hliníkové atomové hodiny, atomové hodiny, cesiové hodiny a vodíkové masery.

Tab. 4.1: Přehled vláknových tras v infrastruktuře T/F včetně jejich parametrů.

Trasa	Délka trasy [km]	Útlum trasy [dB]	Vyhrazené spektrum [nm]	Technologie	Přenos T/F
Praha–Brno	303	86	1540–1546 1570–1572 1550,12 1550,92	CLA BiDi CISCO	Přesný čas (T-adaptér) Ultra-stab. frekvence (ÚPT) White rabbit
Brno–Ostrava	256	53	1540–1546 1570–1572	CLA BiDi	Ultra-stab. frekvence (ÚPT)
Brno–Vídeň	192	51	1540–1546 1570–1572 1551,72	CLA BiDi Ribbon	Přesný čas (T-adaptér) Ultra-stab. frekvence (ÚPT)
Brno–Temelín	392	138	1540–1546 1570–1572	CLA BiDi	Ultra-stab. frekvence (ÚPT)
Praha–Pecný	78	21	1540–1546	CLA BiDi	Přesný čas (T-adaptér)
Praha–Rež	24	7	1540–1546 1570–1572	Pasivní řešení	Ultra-stab. frekvence (ÚPT)
Praha–Dolní Břežany	28	9	1540–1546 1570–1572	Pasivní řešení	White rabbit
Multiband polygon	438	101	1540–1546 1570–1572 1458	CLA BiDi CLA SOA	Ultra-stab. frekvence (ÚPT)
Praha–Cieszyn	630	156	1550,12	OLS CL CISCO	White rabbit
Brno–Bratislava	183	52	1551,72	OLS CL	White rabbit

Těmito etalony se řídí nejen celosvětové počítačové sítě, ale rovněž navigace umělých družic, navigační systém GPS (Global Positioning System – Globální polohový systém) nebo signál radiových a televizních stanic. Atomové hodiny jsou speciální přístroj, který pro měření času využívá rezonanční frekvence atomů, kdy nejvyužívanějším prvkem pro měření času v atomových hodinách je cesium, a to zejména pro svou stabilitu. Sdružení CESNET pro srovnání časových značek využívá Rb (Rubidium) hodiny, které jsou řízeny GPS. Kontrolu přesného času je možné provést kalibračním přístrojem GTR50. Rb hodiny distribuují přesné sekundové pulzy 1PPS (1 Pulse per Second – Jeden pulz za sekundu) a stabilní frekvenci 10 MHz [23, 24, 35, 36, 37].

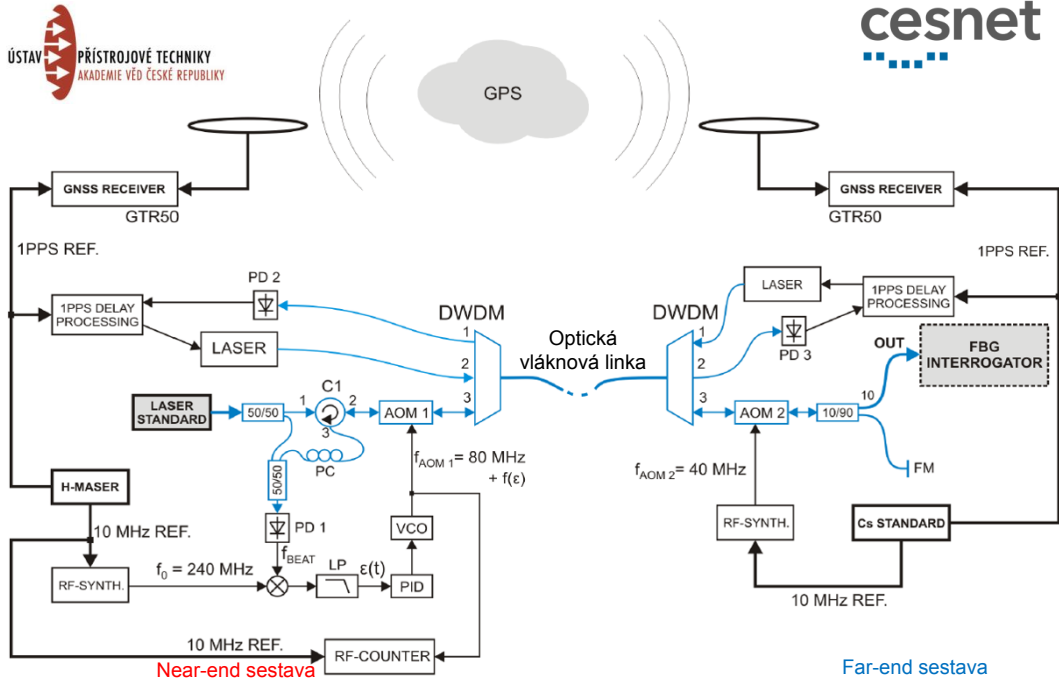
4.3.1 Princip přenosu ultra-stabilních veličin

Klíčovým parametrem pro přenos ultra-stabilních veličin, tedy přenosu přesného času a ultra-stabilní frekvence, za použití optického vlákna je stabilita zpoždění šíření daných signálů v optickém vlákně. Je ovlivněna více faktory, především indexem lomu optického vlákna, teplotní stabilitou (změnou teploty) okolí optického vlákna, změnou polarizace, aukusticko-mechanickými vibracemi, mechanickými poruchami a ostatními změnami ovlivňujícími celou optickou vláknovou infrastrukturu. Byly vyvinuty různé kompenzační techniky a většina z nich je založena na reciprocitě dopravního zpoždění mezi jednotlivými místy (A a B) a platí vztah $\delta = \delta_{AB} = \delta_{BA}$. Nicméně, toho není možné přesně dosáhnout, a to i během obousměrného přenosu po jednom vlákně, tudíž je zapotřebí zavést asymetrické zpoždění Δ [23, 24, 38]:

$$\Delta = \delta_{BA} - \delta_{AB}. \quad (4.1)$$

Sdružení CESNET ve spolupráci s ÚPT v Brně vybudovalo infrastrukturu pro přenos přesného času a stabilní frekvence na obousměrné optické lince dlouhé 306 km mezi Prahou a Brnem. Optická linka využívá standardní telekomunikační optické vlákno, obousměrné zesilovače CLA BiDi a pasivní filtry, které vyhrazení 800 GHz DWDM okno v rozmezí vlnových délek 1540,56–1546,12 nm. V tomto vyhrazeném DWDM okně probíhá přenos ultra-stabilní frekvence z laserového normálu pracujícího na vlnové délce 1540,56 nm a obousměrný přenos přesného času dvou časových značek 1PPS na vlnové délce 1545,32 nm a 1546,12 nm z časových adaptérů na obou koncích linky. Funkční zapojení pro paralelní přenos přesného času a stabilní frekvence je znázorněno na obrázku 4.11.

Při fázově koherentním přenosu je použita metoda kompenzace Dopplerova posunu indukovaného v přenosovém optickém vlákně. [28, 27] Jako akční člen smyčky fázového závěsu je použit AOM 1 (Acoustic-Optical Modulator – Akusto optický modulátor) viz obrázek 4.11, který posouvá frekvenci vysílané koherentní vlny přesně opačným směrem než Dopplerův jev. Frekvence signálu budícího AOM 1 je dlouhodobě monitorována čítačem s nulovou ztrátovou dobou měření. Integrujeme-li v čase frekvenční modulační zdvih tohoto budícího signálu, jehož nominální frekvence je 80 MHz, lze spočítat změnu dopravního zpoždění optického vlákna vlivem Dopplerova jevu [38]. Pro ověření změn transportního zpoždění získaných touto metodou je do soustavy zařazen i systém pro měření dopravního zpoždění metodou vzájemného porovnání pulsních časových značek 1PPS pomocí speciálních transceiverů.



Obr. 4.11: Princip přenosu ultrastabilních veličin [23, 24, 25, 26, 28].

Jelikož toto měření je zatíženo nejistotou radiofrekvenčních normálů cesiových atomových hodin a vodíkového maseru (H-maser), probíhá současně i sledování stability obou těchto zdrojů pomocí GNSS (Global Navigation Satellite Systems – Globální navigační satelitové systémy) přijímačů typu GTR50 a následně jsou naměřené hodnoty transportního zpoždění očištěny od vzájemných fluktuací těchto radiofrekvenčních normálů [38]. Tento proces lze matematicky popsat následujícími kroky [23, 24, 39, 38]:

- AOM posune optickou frekvenci vstupního optického signálu ν_O o hodnotu frekvence daného elektrického modulačního kmitočtu signálu f_{AOM} :

$$\nu_T = \nu_O + f_{AOM}. \quad (4.2)$$

- Signál s frekvencí ν_T je vyslán do vlákna, kde jeho frekvence podléhá posunutí o zdvih ν_D způsobeným Dopplerovým jevem (teplotní účinky, vibrace a další projevující se jevy):

$$\nu_F = \nu_T + \nu_D = \nu_O + f_{AOM} + \nu_D. \quad (4.3)$$

- Na vzdáleném (opačném) konci se signál s frekvencí ν_F částečně odráží a cestuje zpět k vysílací straně. Jeho frekvence opět podléhá Dopplerovu jevu:

$$\nu_R = \nu_F + \nu_D + f_{AOM} = \nu_O + 2(f_{AOM} + \nu_D). \quad (4.4)$$

- Na vysílací straně je signál sloučen s původním signálem. Po detekci lze získat záznejový signál s frekvencí f_{BEAT} :

$$f_{BEAT} = \nu_R - \nu_O = (\nu_O + 2(f_{AOM} + \nu_D)) - \nu_O = 2(f_{AOM} + \nu_D). \quad (4.5)$$

- Úpravou výše uvedené rovnice 4.5 lze odvodit odchylku (chybu) frekvence f_{ERROR} mezi blízkým vzdáleným koncem linky, která zápornou hodnotou frekvenčně posunutého signálu ν_D , který je způsoben Dopplerovým jevem:

$$f_{ERROR} = -\nu_D = \frac{-f_{BEAT} + 2f_{AOM}}{2}. \quad (4.6)$$

- Je-li OAM buzen součtem frekvencí $f_{AOM} + f_{ERROR}$, přijímáme na konci linky signál se stabilní frekvencí ν_{Fstab} tedy ν_T :

$$\nu_{Fstab} = \nu_O + f_{AOM} + f_{ERROR} + \nu_D = \nu_O + f_{AOM} = \nu_T \quad (4.7)$$

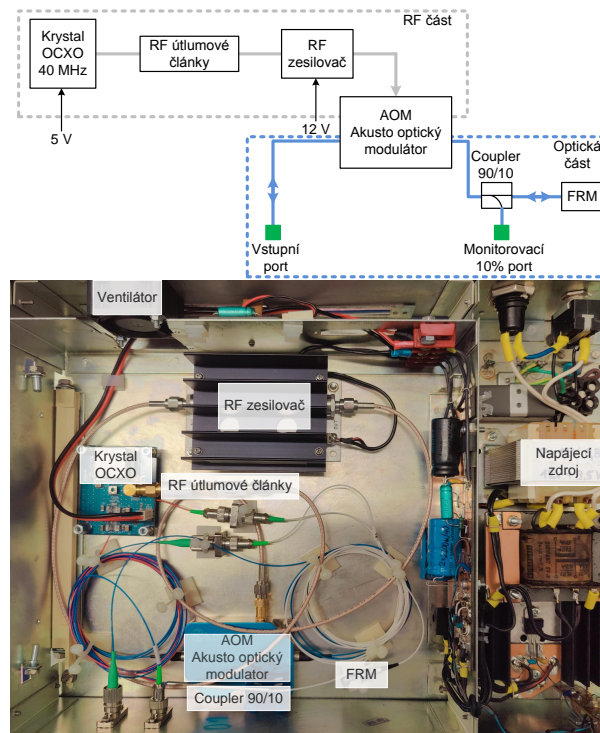
Existuje několik možností pro ověření funkce systému pro přenos ultra-stabilních veličin. Jedna z nich je porovnání celého systému s jiným, založeným na jiné metodě, například GNSS. Bohužel, tento systém dosahuje pro krátké intervaly integrace nejistot v řádu nanosekund, zatímco systém využívající optických vláken dosahuje lepších, tedy nižších hodnot. Ve vědeckém článku [27] byla funkčnost přenosu stabilní optické frekvence ověřena experimentem, kdy byla optická linka (Brno–Vídeň) použita pro porovnání dvou vysoce koherentních laserů s dlouhodobou relativní stabilitou optické frekvence v řádu $\times 10^{-15}$. Jednotlivé srovnání stability optických linek Praha–Brno, Brno–Temelín, Brno–Olomouc a Brno–Vídeň) je možné vidět na obrázku 4.9.

Další možností, pokud to topologie sítě umožňuje, je vybudování zpětného kanálu, tedy vlastně další aktivně stabilizované linky. Takto vybudovaný zpětný kanál umožní mít oba konce linky v jedné laboratoři a provádět významná měření např. monitoring záznejje mezi konci linky. Tento scénář nám umožňuje některá z variant nastavení multiband polygonu viz tabulka 4.3, kde se využívá end-to-end metody pro měření stability linek. Jedná se o první takový experiment na území České republiky.

Aby toho bylo docíleno, je zapotřebí kalibrovat jednotlivé součásti optického systému, adaptéry, optická vlákna, zesilovače, end-shiftery a ostatní aktivní a pasivní komponenty, které se vyskytují v daném systému [23, 24].

Jako efektivní řešení, které postačuje jako základ pro přenos ultra-stabilních veličin je možnost použití zařízení pod názvem end-shifter, jedná se o nižší stupeň far-end sestavy. Toto zařízení se zapojuje do systému pro přenos ultra-stabilních veličin na konci optické vláknové trasy. Tímto způsobem lze realizovat měření stability linky metodou in-loop. Na obrázku níže 4.12 můžete vidět provedení prototypu end-shifteru, který jsem navrhl a sestavil.

End-shifter posune danou pilotní lambda pro přenos ultra-stabilních veličin (1458, 1540, 1542 nebo 1572 nm) v optické doméně nejprve o 40 MHz a odrazí ji zpět do linky přes FRM (Faraday Rotator Mirror – Faradayovo rotační zrcadlo) a poté dojde opět k posunu pilotní lambda v optické doméně o 40 MHz. Výsledný posun je tedy celkově 80 MHz. Tímto posunem lze snadno zjistit rozdíl mezi vysílanou pilotní a odraženou lambda. Krátkodobá stabilita optického posunu je zajištěna použitím tepelné stabilizace krystalu.

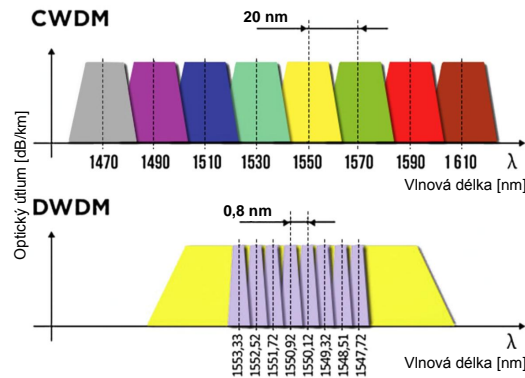


Obr. 4.12: Blokové schéma a provedení prototypu end-shifteru.

4.3.2 Filtrace optického spektra pro přenos ultra-stabilních veličin

Filtrace optického spektra pro přenos ultra-stabilních veličin je velice důležitá, ať už z pohledu samotného přenosu nebo pro ostatní přenosy, které probíhají na stejném optickém vlákně, aby nedocházelo k vzájemnému ovlivňování během jednotlivých přenosů. Pro přenos ultra-stabilních veličin se používají běžné komerčně dostupné optické filtry. Z pohledu odstupu kanálů mezi sebou mohou být filtry v provedení CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing – Hrubým vlnovým multiplex) nebo DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing – Hustý vlnový multiplex),

záleží na typu aplikace. Vzdálenost neboli odstup kanálů je definována jako nominální rozdíl frekvencí nebo vlnových délek mezi dvěma sousedními optickými kanály. CWDM má větší odstup než DWDM. V CWDM je možné přenášet až 18 vlnových délek s odstupem kanálů 20 nm v mřížce spektra a to v rozsahu 1271 nm do 1611 nm. U DWDM lze přenášet 40, 80 nebo až 160 vlnových délek s užším odstupem 0,8/0,4 nm (v gridu 100 GHz/50 GHz). Vlnové délky pro DWDM jsou od 1530 nm do 1565 nm (C pásmo) a od 1565 nm do 1610 nm (L pásmo) [40, 41]. Rozdíl mezi CWDM a DWDM popisuje níže uvedený obrázek 4.13.

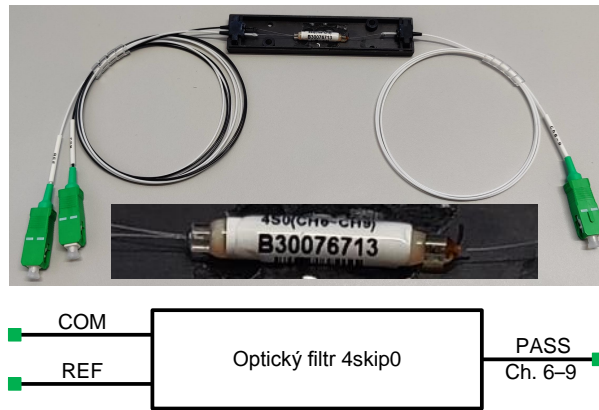


Obr. 4.13: Srovnání CWDM vs DWDM v optickém spektru [40, 41].

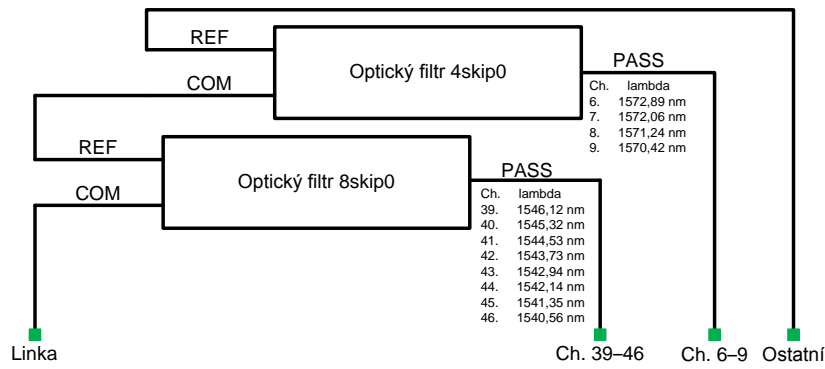
V rámci řešení, výzkumné činnosti a trendů jsme s kolegy z CESNETu dospěli k závěru, že nejčastěji používanou vyhrazenou oblastí pro přenos ultra-stabilních veličin se bude používat část vyhrazeného optického spektra v C pásmu v oblasti 1540–1546 nm (8 kanálů) a také část optické spektra na rozhraní mezi C a L pásma v oblasti 1570–1572 nm (4 kanály) [31, 32, 42].

V rámci experimentů došlo k ověření možnosti využití S pásma na vlnové délce 1458 nm [22, 43]. Optický filtr nejčastěji bývá tříportovou pasivní komponentou s porty nejčastěji označenými com (common – společné spektrum), ref (reflect – odražené spektrum) a pass (pass – průchozí nebo vyhrazené spektrum). Provedení takového filtru je znázorněno na obrázku 4.14.

Pokud vyžadujeme, aby filtr byl schopný zajistit přenos ultra-stabilních veličin ve vyhrazeném C pásmu a na pomezí C a L pásma je zapotřebí propojit tyto dva filtry mezi sebou tak, jak je to znázorněno na obrázku 4.15, jedná se o základní konfiguraci. Propojit filtry lze mezi sebou adekvátním konektorovým spojem, nebo optickým svařem, který je preferován (eliminace odrazů). Optické parametry základní konfigurace optického filtru jsou popsány v tabulce 4.2. Takovéto řešení se používá pro přenos ultra-stabilních veličin po jednom vlákně. Zdvojená varianta tohoto řešení je vhodná pro vybočení přenosu v inline uzlech (průchozí uzel na jednovláknové trase).



Obr. 4.14: Základní provedení optického filtru.

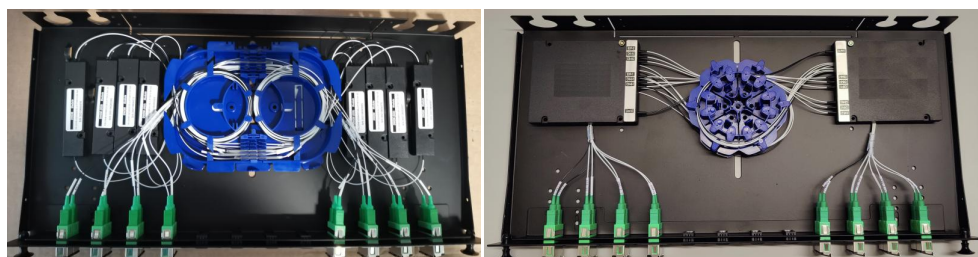


Obr. 4.15: Základní konfigurace zapojení optického filtru pro přenos ultra-stabilních veličin [33].

Zdvojené řešení je také vhodné i pro použití na párové trase, kde každá dvojice filtrů je zapojena na každé vlákno z páru na začátku a konci trasy. Pro vybočení inline uzlu na párové trase je zapotřebí použití čtyřikrát základní konfiguraci (celkem 8 optických filtrů), jak je znázorněno vlevo na obrázku 4.16. V rámci vývoje jsem navrhnul řešení, které integruje čtyři optické filtry (dvě základní konfigurace, viz obrázek 4.15) do jednoho boxu, jak je znázorněno na obrázku 4.17, provedení filtru je znázorněno vpravo na obrázku 4.16. Toto řešení přináší následující výhody: zjednodušení kompletace celého řešení optického filtru, nižších hodnot vložného útlumu, který je vložen do trasy a především menší riziko vzniku odrazů, které mohou způsobit nežádoucí efekt samovolného laserování.

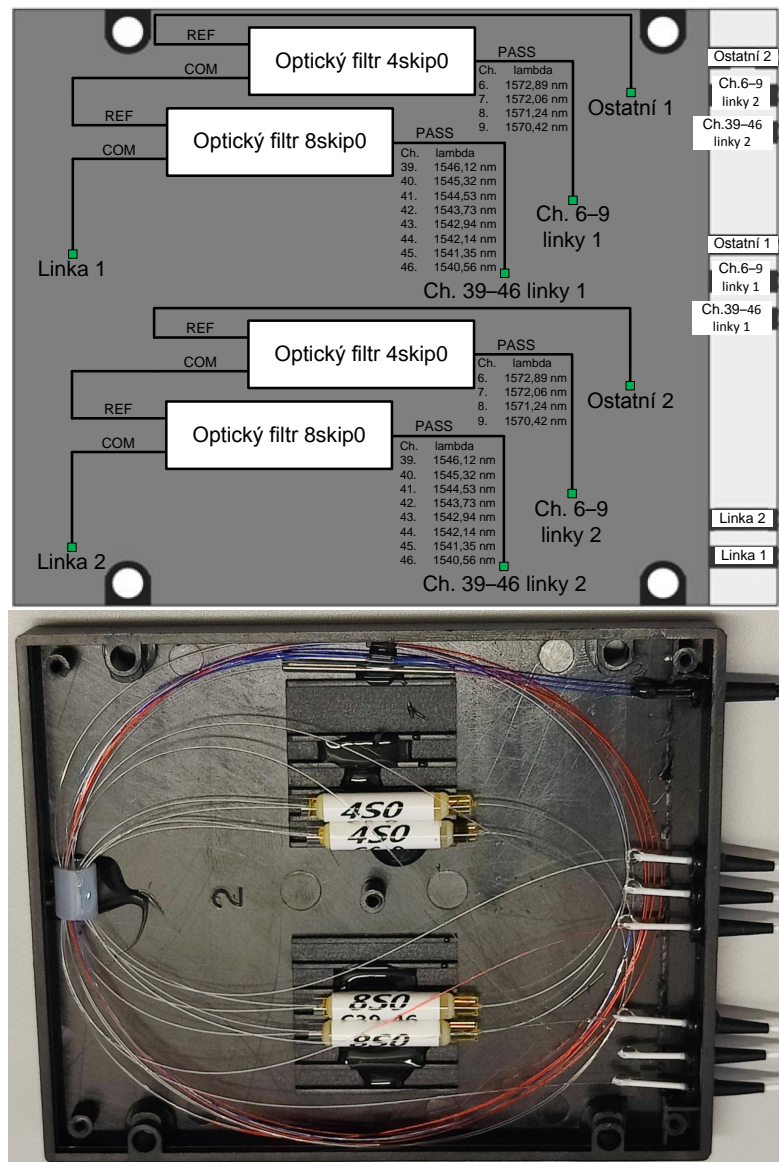
Tab. 4.2: Přehled technických parametrů optických filtrů pro přenos ultra-stabilních veličin.

Technický parametr	Modul 8skip0	Modul 4skip0
Typ	DWDM	DWDM
Vlnový rozsah pro Comm port [nm]	1500–1640	1500–1640
Vlnový rozsah pro Pass port [nm]	1540,45–1546,23	1570,31–1573,00
Vlnový rozsah pro Ref port [nm]	1500–1539,92 1546,72–1640	1500–1569,74 1573,56–1640
Vložný útlum Pass portu [dB]	≤ 0,6	≤ 0,8
Vložný útlum Ref portu [dB]	≤ 0,8	≤ 1
Izolace přenosového pásma [dB]	≥ 30	≥ 30
Izolace odraženého pásma [dB]	≥ 15	≥ 15
Maximální optický výkon [mW]	500	500
Optický konektor	volitelný, SC/APC	volitelný, SC/APC
Rozměry modulu [mm]	90×20×10	90×20×10



Obr. 4.16: Varianty kompletního provedení zapojení optického filtru pro přenos ultra-stabilních veličin pro překlenutí inline uzlu párové trasy.

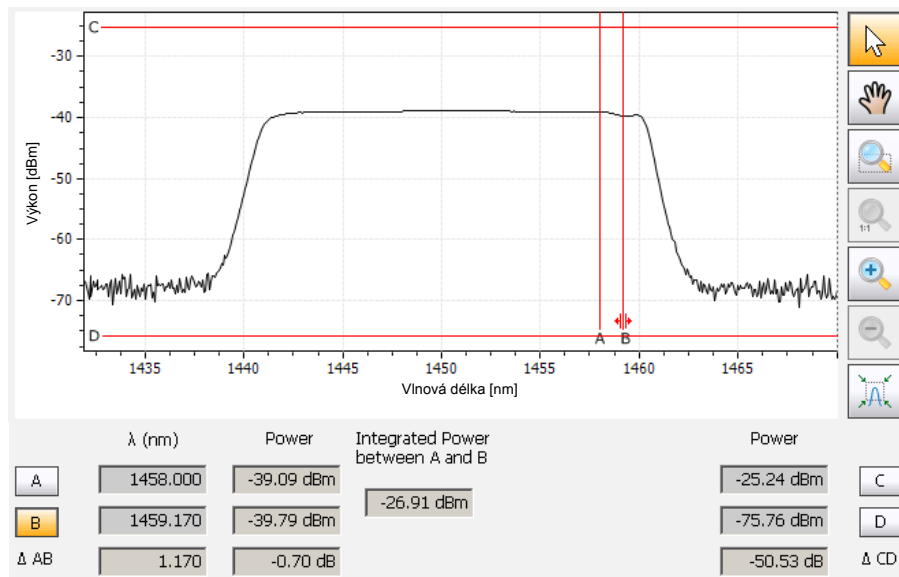
Pro multiband polygon viz kapitola 4.4 bylo zapotřebí vyvinout optický filtr, který umožní přenos ultra-stabilních veličin nejen ve vyhrazeném optickém spektru v C pásmu a na pomezí C a L pásem, ale také i v S pásmu a to na vlnové délce 1458 nm. Provedení filtru je velice specifické, jelikož na trase Brno–Ostrava probíhá přenos klasických telekomunikační dat jak v C pásmu tak v L pásmu a bylo zapotřebí tento přenos zachovat. Pro přenos ultra-stabilní frekvence na vlnové délce 1458 nm byl použit v návrhu optický filtr CWDM 1451 nm. Zda tento konkrétní typ optického filtru pokryje vlnovou délku 1458 nm bylo ověřeno pomocí OSA (Optical Spectrum Analyzer – Optický spektrální analyzátor), jak je znázorněno na obrázku 4.18.



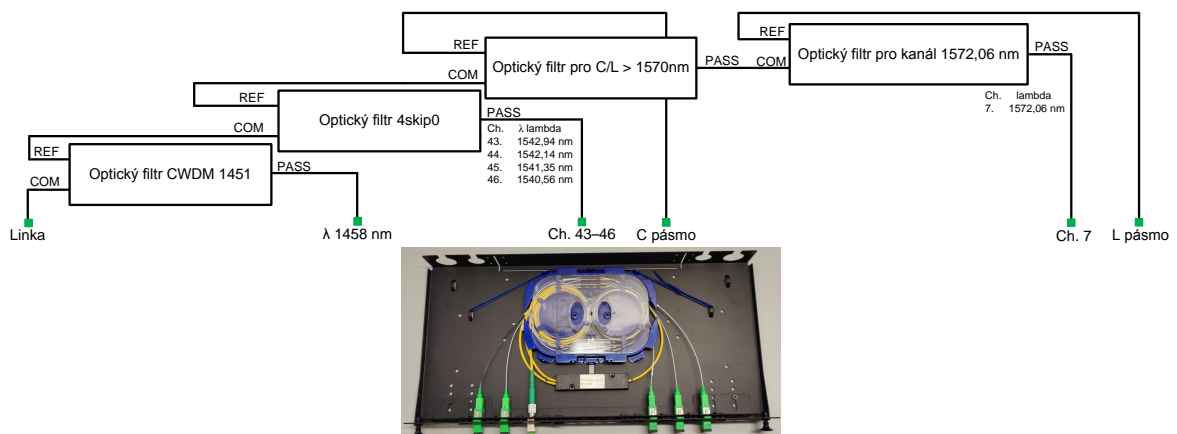
Obr. 4.17: Integrace čtyř optických filtrů do jednoho boxu.

Kompletní provedení zapojení filtru bylo navrženo tak, jak je znázorněno na obrázku 4.19. Zároveň byla ověřena u tohoto zapojení filtru i propustnost vlnových délek 1458 nm, 1540,56 nm a 1572 nm pro přenos ultra-stabilních veličin opět měřícím přístrojem OSA, jak je znázorněno na obrázku 4.20.

U modulu s integrovanými čtyřmi optickými filtry viz obrázek 4.17 byla ověřena propustnost i strmost na jednotlivých portech filtru (Linka 1, Linka 2, Ch.39–46 linky 1, Ch.39–46 linky 2, Ch. 6–9 linky 1, 6–9 linky 2, Ostatní 1 a Ostatní 2). Měření bylo provedeno jednoduchou metodou a to za pomoci širokopásmového zdroje a optického spektrálního analyzátoru.

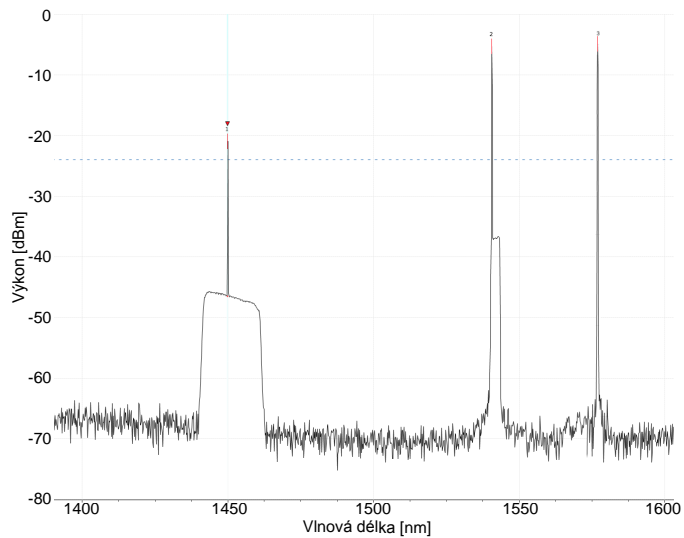


Obr. 4.18: Ověření optického spektra CWDM filtru 1451 pro vlnovou délku 1458 nm.

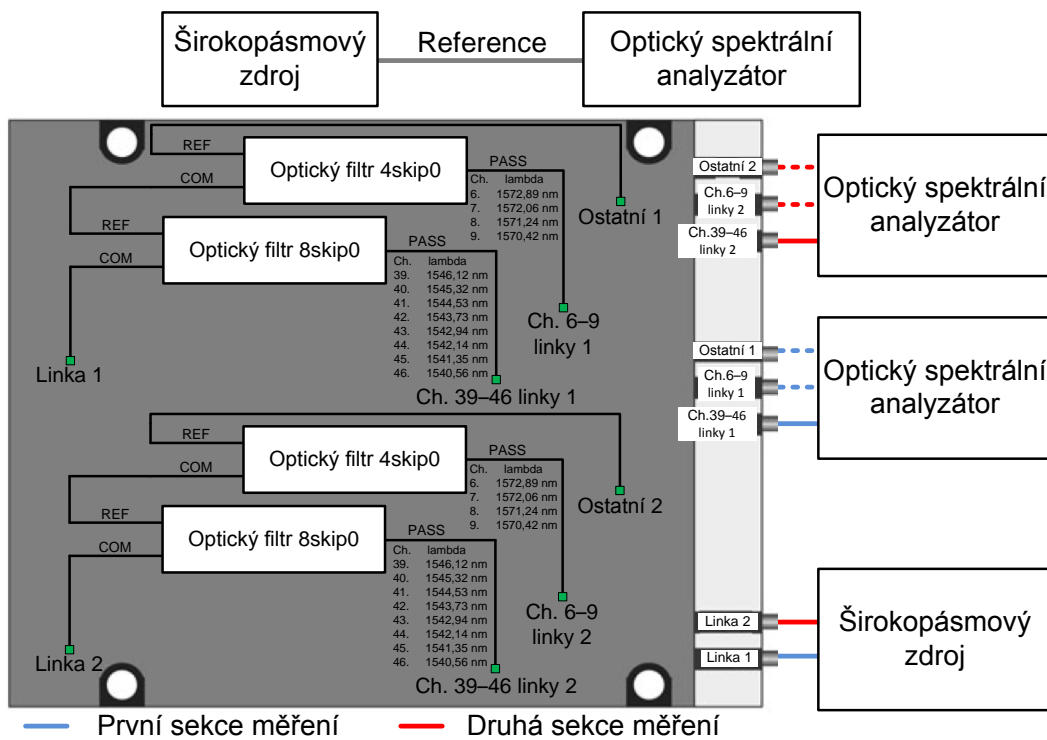


Obr. 4.19: Kompletní provedení zapojení optického filtru pro přenos ultra-stabilních veličin pro multiband polygon pro trasu mezi Brnem a Olomoucí [32].

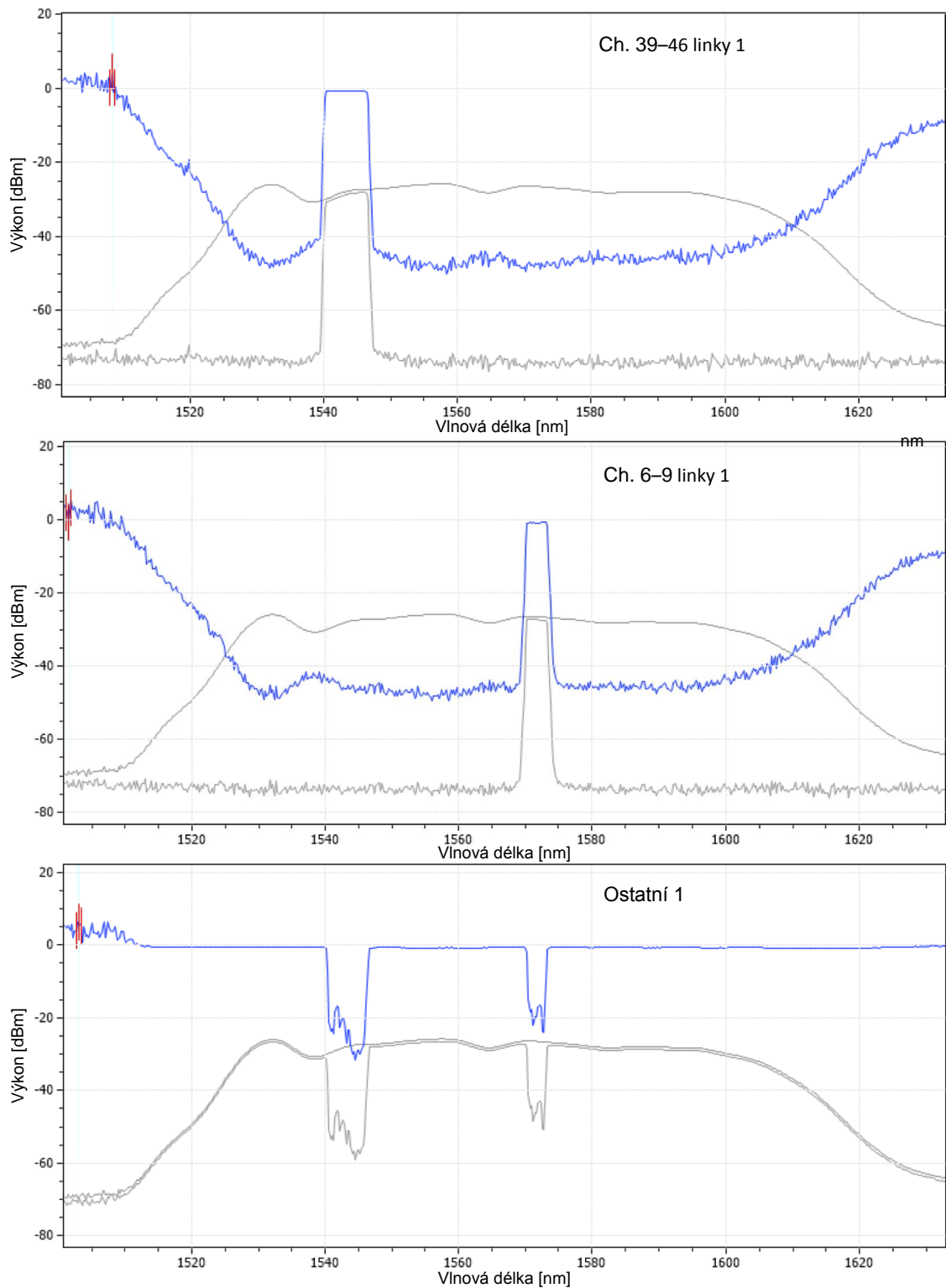
Nejprve bylo provedeno referenční měření širokopásmového zdroje na optickém spektrálním analyzátoru a následně se ke zdroji připojovaly jednotlivé porty filtru. Blokové schéma měření je uvedeno na obrázku 4.21. Optický analyzátor znázornil současně spektrální průběh referenčního měření (šedá barva) a optické spektrum pro daný port filtru (modrá barva), jak je znázorněno na obrázku 4.22.



Obr. 4.20: Ověření propustnosti zapojení optického filtru pro přenos ultra-stabilních veličin pro multiband polygon pro trasu mezi Brnem a Olomoucí.



Obr. 4.21: Blokové schéma jednotlivých měření propustnosti optického filtru.



Obr. 4.22: Grafické znázornění propustnosti a strmosti optického spektra na jednotlivých portech modulu, první sekce měření.

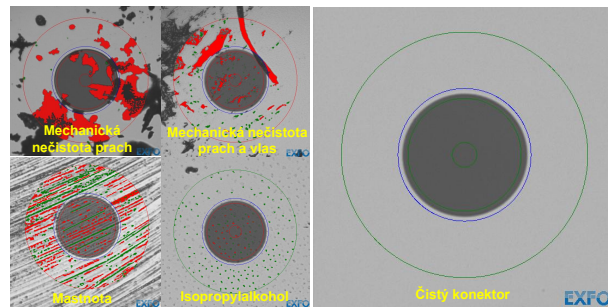
4.3.3 Možnosti vzniku a potlačení nežádoucího efektu samovolného laserování

V optickém vlákne dochází k neustálým změnám ať už přirozeným či umělým. Mezi přirozené změny patří nelinearity, postupné změny indexu lomu, PMD (Polarisation Mode Dispersion – Polarizační módová disperze) nebo CD (Chromatic Dispersion – Chromatická disperze). Mezi umělé lze zařadit především přerušení optického vlákna způsobené nehodou nebo katastrofou [44, 45], které vyžaduje následnou opravu zavařením optickým svarem nebo vhodným optickým konektorovým spojem. Dále sem patří poryvy větru (v případě zavěšených vláken) a údery blesku, jejich vliv na přenos je zásadní, přičemž ani moderní digitální procesy nejsou schopny zvládnout potlačit jejich vliv [46, 47]. Mechanické konektorové spoje a optické svary navíc ovlivňují částečné odrazy, které způsobují spontánní laserování při zesílení obousměrným zesilovačem. Když jsou úrovně zesílení a odrazy dostatečně vysoké, zesilovač a samostatné vlákno na kterém probíhá přenos začnou samovolně kmitat či oscilovat. Nežádoucí oscilace výrazně ohrožují stabilitu přenosu a mohou negativně ovlivnit okolní kanály, což je považováno za nežádoucí chování. Je tedy nutné rozumně řídit zesílení obousměrného zesilovače prostřednictvím proudu pumpou, aby se zabránilo nežádoucímu efektu samovolného laserování, které způsobuje zesílenou spontánní emisi ASE.

Z letité praxe, kterou jsem získal v oddělení optických sítí sdružení CESNET byly otestovány tyto možné způsoby, jak eliminovat efekt samovolného laserování během přenosu ultra-stabilních veličin:

- Znalost optické trasy/detailní informace o trase:
 - polohopis optického kabelu, zda optické vlákno je uložené v zemi nebo nad zemí (zdroj mechanických vibrací a odrazů),
 - techniky spojování optických vláken: optické svary a optické konektory v ODF (Optical Distribution Frame – optický rozvaděč). Použití pouze optických konektorů s brusem ferule APC nikoliv PC či vylepšená verze UPC. Konektorům s brusem ferule PC/UPC je lepší se vyvarovat.
 - Především pečlivě dbát na čistotu optických konektorových spojů. Na níže uvedeném obrázku 4.23 jsou znázorněny nejčastější variace špinavého a čistého optického konektoru.
- použití kvalitních optických filtrů, které jsou dostatečně strmé a vykazují co nejnižší vložný útlum, více v kapitole 4.3.2,
- vhodné nastavení proudu pumpou u kaskády obousměrných optických EDFA zesilovačů, maximálně do hodnoty 95 mA, praxe ukazuje, že je ideální rozmezí 75–85 mA, z dlouhodobého hlediska je však koncepce ručního řízení nevhodná,
- vyvinuté řešení CLA BiDi NoLase [2],

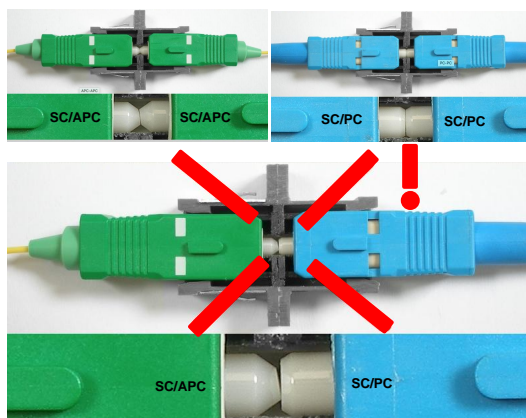
- automatické výkonové vyvažování kaskád obousměrných zesilovačů. Více o této technice je zmíněno v kapitole 4.4.



Obr. 4.23: Ukázka špinavého a čistého konektoru.

Hlavním rozdílem mezi konektorem PC/UPC a APC je provedení brusu čelní strany ferule. U PC/UPC konektoru je ferule leštěna bez úhlu, ale u APC konektoru je čelní plocha ferule leštěna pod úhlem 8 stupňů [48, 49]. U konektorů UPC se jakékoli odražené světlo odráží přímo zpět ke zdroji světla. Úhlová čelní plocha ferule konektoru APC však způsobuje, že se odražené světlo odráží v daném úhlu do pláště a nikoliv přímo zpět směrem ke zdroji. To způsobuje určité rozdíly ve zpětném útlumu (return loss).

Kromě čelní strany ferule je dalším zřetelnějším rozdílem barva. Obecně platí, že konektory PC/UPC jsou modré, zatímco konektory APC jsou zelené. Není vhodné spojovat modré a zelené konektory, protože hrozí rozdrčení optických ferulí jednotlivých typů současně spojených optických konektorů [50], jak je znázorněno na obrázku 4.24. Poškození ferule způsobí velký útlum konektorového spoje a degradaci optického přenosu jakékoliv aplikace [51].

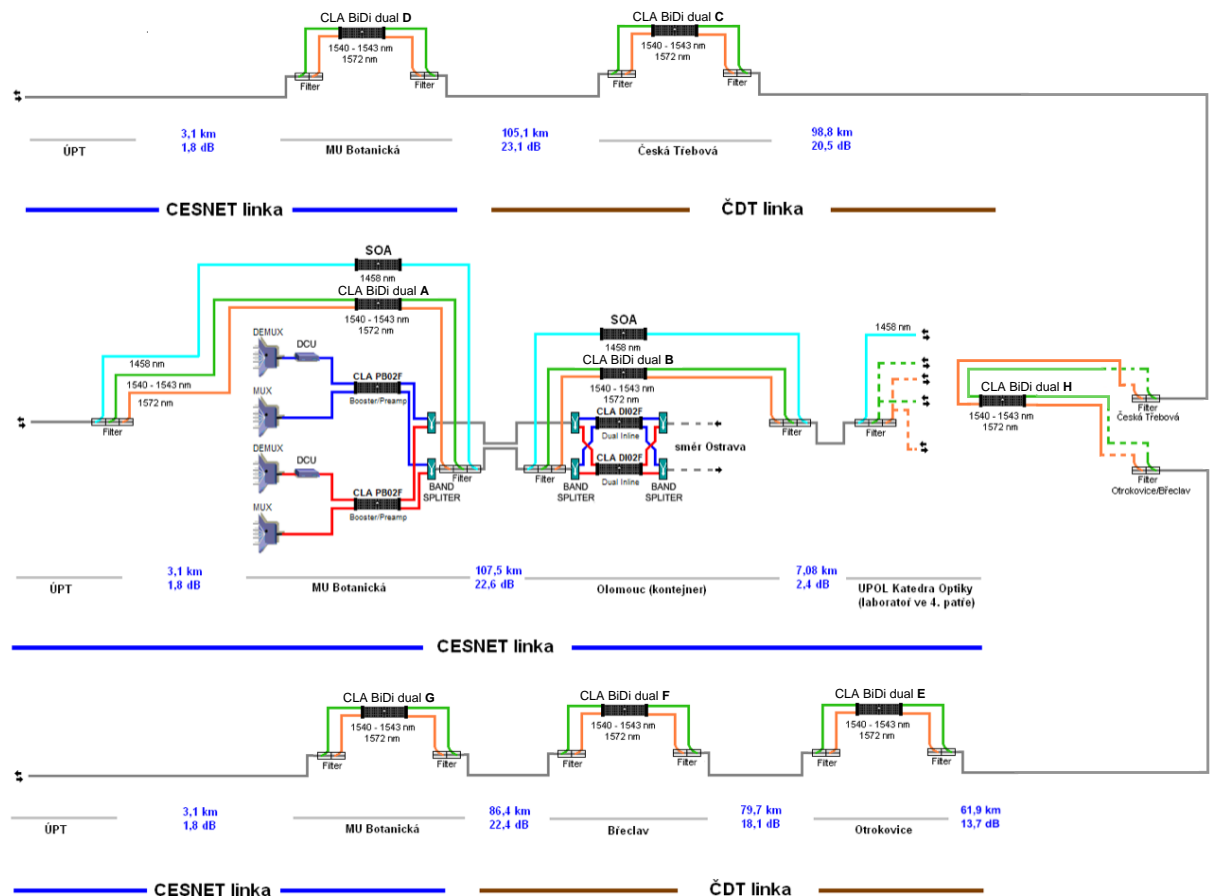


Obr. 4.24: SC konektorové spoje typu APC a PC [50].

4.4 Multiband polygon pro přenos ultra-stabilních veličin

4.4.1 Popis a instalace multiband polygonu

Sdružení CESNET ve spolupráci s ÚPT, UPOL (Univerzita Palackého v Olomouci) katedra optiky a společností ČD Telematika v rámci svých výzkumných aktivit vyvíjely multiband polygon na reálných optických trasách. Kde jsem se podílel na sestavení optických filtrů, obousměrných optických zesilovačů a následného nasazení a oživení na jednotlivých trasách. Multiband polygon je určen pro obousměrný přenos ultra-stabilních veličin ve vyhrazených částí optického spektra v S, C a na pomezí C a L pásem [32, 14, 52]. Sdružení CESNET pro polygon poskytl vyvinuté prototypy obousměrných optických zesilovačů rodiny Czech Light CLA BiDi [53] a CLA SOA viz kapitoly 4.2.1 a 4.2.2. Dále optické filtry, které se vkládají do optické trasy, aby vybočily dané spektrum pro přenos T/F, viz výše v kapitole 4.3.2. Schéma multiband polygonu je znázorněno na obrázku 4.25.



Obr. 4.25: Schéma multiband polygonu pro přenos ultra-stabilních veličin [32, 52].

Multiband polygon se skládá ze tří částí. První část je tvořena párovou optickou trasou ÚPT–MU Botanická–Olomouc–UPOL, která je dlouhá 117,68 km a její vložný útlum je 26,8 dB, který je kompenzován čtyřmi obousměrnými zesilovači CLA BiDi dual, které v sobě obsahují příslušné obousměrné optické EDFA moduly pro zesilování daného optického spektra. Tato část trasy je specifická tím, že optická vláknová párová trasa je sdílena i pro klasický přenos telekomunikačních dat v C a L pásmu společně s přenosem ultra-stabilních veličin ve vyhrazeném C pásmu (1540–1543 nm), na rozmezí C a L pásem (1572 nm) a v poslední řadě S pásmu (1458 nm). Provedení nasazeného optického filtru je znázorněno na obrázku 4.19 a ověření jeho propustnosti popisuje obrázek 4.20.

Druhá část polygonu je tvořena jednovláknovou optickou trasou mezi UPOL a ÚPT Brno přes Otrokovice, Břeclav a MU Botanická. Jednovláknová trasa pronajatá od ČD Telematika je dlouhá 231,1 km a její vložný útlum je 56 dB, který je kompenzován třemi obousměrnými optickými zesilovači CLA BiDi pro přenos ultra-stabilních veličin ve vyhrazeném C pásmu (1540–1543 nm) a na rozmezí C a L pásem (1572 nm) [32, 52].

Velmi malá část této jednovláknové optické trasy je vedena nad zemí kolem kolejí pomocí závěsného optického kabelu. Takto řešená malá část optické trasy způsobuje poměrně velké problémy během přenosu ultra-stabilních veličin. Kde se generuje nežádoucí efekt samovolného laserování už při nízkých nastavených hodnotách proudu pumpou (80 mA) na obousměrných optických zesilovačích CLA BiDi dual jak v Otrokovicích tak v Břeclavi. Což má za následek zhoršení kvality relativní stability přenosu ultra-stabilní frekvence, jak je znázorněno níže na obrázku 4.26.

Poslední, třetí část multiband polygonu je tvořena trasou opět z UPOL Olomouc zpět do ÚPT Brno tentokrát přes Českou Třebovou a MU Botanická. Tato jednovláknová trasa pronajatá od ČD Telematika, která je celá uložena v zemi podél kolejí je dlouhá 207 km a její vložný útlum je 45,4 dB. Útlum linky je kompenzován dvěma obousměrnými optickými zesilovači CLA BiDi pro přenos ultra-stabilních veličin pouze ve vyhrazeném C pásmu (1540–1543 nm) a na rozmezí C a L pásem (1572 nm) [32, 52].

V celém polygonu jsou osazené optické filtry pro vyhrazené C pásmo (1540–1543 nm) a na rozmezí C a L pásem (1572 nm). Shrnutí technických parametrů a možnosti přenosu ultra-stabilních veličin je popsáno v tabulce 4.3 Centrálními body multiband polygonu se staly lokality ÚPT Brno a UPOL Olomouc, kde dochází k variabilitě různých možností přenosu volbou délky optické trasy prostřednictvím manuálního zapojování či propojování na optických filtrech.

Aby se eliminovalo neustálé manuální přepojování na optických filtrech nebo mezi nimi, či jakákoliv manipulace s optickými vlákny, kde může dojít k možnosti zašpinění optického konektorového spoje nebo jeho nedocvaknutí, které může vést

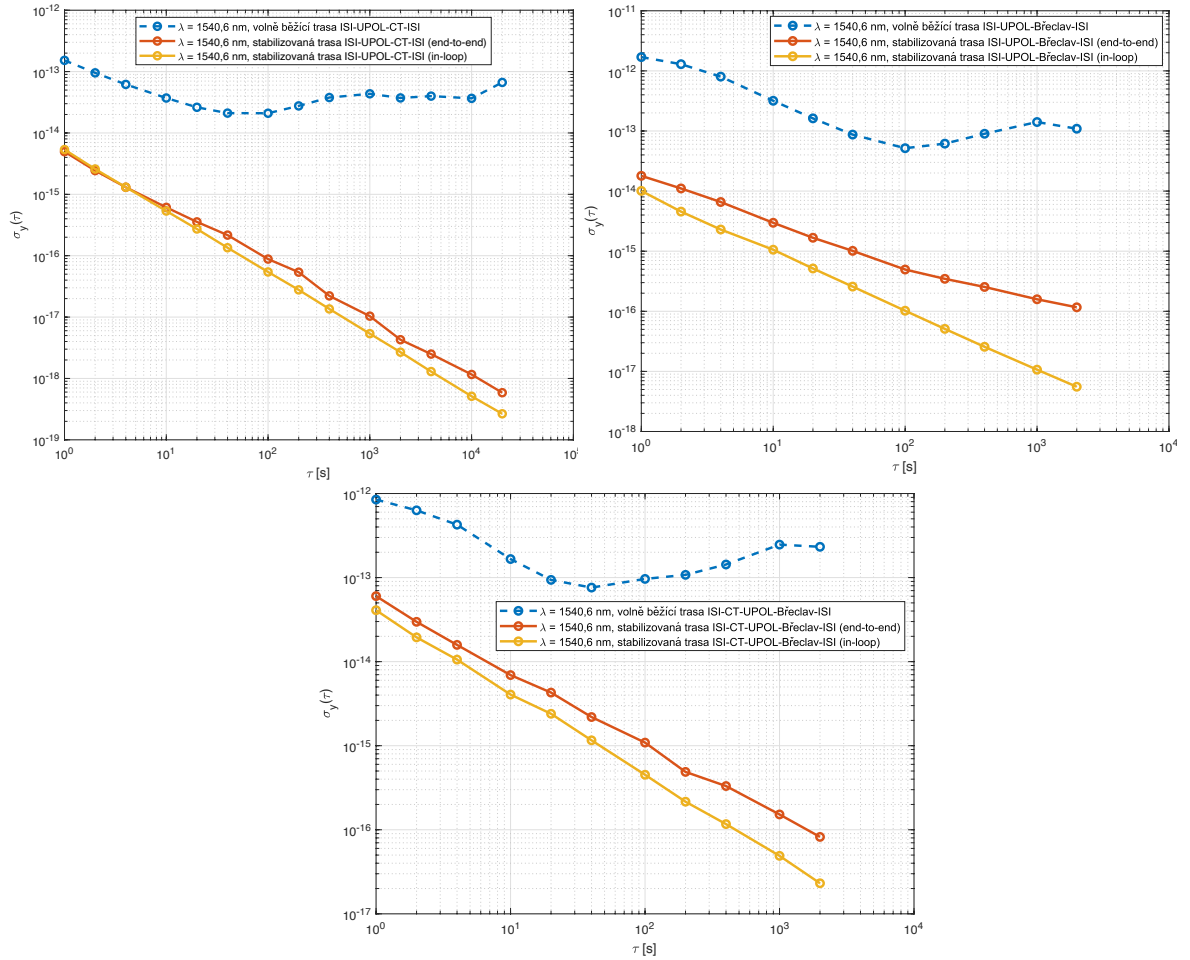
ke vzniku vyvolání nežádoucího efektu samovolného laserování. Z těchto důvodů budou v budoucnu v lokalitách ÚPT Brno a UPOL Olomouc nainstalovány optické přepínače 16×16 CLS.

Tab. 4.3: Technické parametry a možnosti konfigurace různých délek optické trasy v multiband polygonu [32, 14].

Varianta	Trasa	Délka trasy [km]	Útlum trasy [dB]	Vyhrazené optické spektrum	Metody měření stab. linky
1.	ÚPT–UPOL	117,68	26,8	S pásmo 1458 nm C pásmo 1540–1543 nm L pásmo 1572 nm	in-loop
2.	UPOL–Otrokovice–ÚPT	231,1	56	C pásmo 1540–1543 nm L pásmo 1572 nm	in-loop
3.	UPOL–Česká Třebová–ÚPT	207	45,4	C pásmo 1540–1543 nm L pásmo 1572 nm	in-loop
1.+2.	ÚPT–UPOL UPOL–Otrokovice–ÚPT	348,78	82,8	C pásmo 1540–1543 nm L pásmo 1572 nm	end-to-end in-loop
1.+3.	ÚPT–UPOL UPOL–Česká Třebová–ÚPT	324,68	72,2	C pásmo 1540–1543 nm L pásmo 1572 nm	end-to-end in-loop
2.+3.	UPOL–Otrokovice–ÚPT UPOL–Česká Třebová–ÚPT	438,1	101,4	C pásmo 1540–1543 nm L pásmo 1572 nm	end-to-end in-loop

4.4.2 Měření stability linek přenosu ultra-stabilní frekvence

Na multiband polygonu jsem uskutečnil měření s využitím odlišných metod a to buď end-to-end [25, 27, 54] nebo in-loop [25, 27, 28] pro ověření stability linek přenosu ultra-stabilní frekvence na vlnových délkách 1540,6 nm a 1458 nm v následujících variantách zapojení topologie multiband polygonu. Doposud nedošlo k měření stability přenosu ultra-stabilní frekvence na vlnové délce 1572,06 nm a to z důvodu dodatečného rozšíření technologie a vývoje experimentální soustavy, která je tvořena near-end a far-end sestavami pro tento budoucí přenos na této vlnové délce. Zůstává zde prostor pro další výzkum i přesto, že multiband polygon je pro tento druh přenosu připraven. Ověření propustnosti pro dané vlnové délky je demonstrováno na obrázku 4.20. Srovnání metod end-to-end a in-loop beatu pro stabilitu linek přenosu ultra-stabilní frekvence na vlnové délce 1540,6 nm v multiband polygonu je znázorněno na obrázku 4.26.



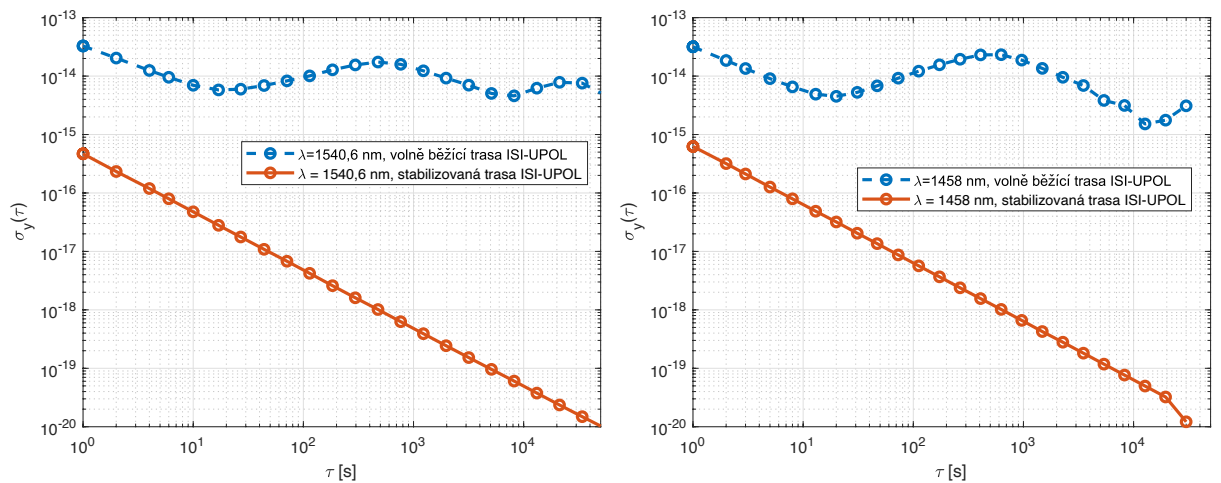
Obr. 4.26: Srovnání metod end-to-end a in-loop pro stabilitu linek přenosu ultra-stabilní frekvence na vlnové délce 1540,6 nm v multiband polygonu.

Frekvenční stabilitu přenosu nestabilizovanou linkou lze získat na základě záznamu korekčních zásahů do frekvence AOMu. Ty věrně odrážejí fluktuace optické frekvence, které by se bez použití stabilizace projevily na přijímacím stanovišti, jak je znázorněno modrou křivkou na obrázku 4.26.

Stabilita přenosu optické ultra-stabilní frekvence stabilizovanou linkou může být zjištěna dvojím způsobem: end-to-end a in-loop metodami [25, 27, 28].

S velkou výhodou lze užít postupu end-to-end, který udává skutečný rozdíl frekvence mezi začátkem a koncem linky a odráží všechny relevantní vlivy. Nejlépe v jedné kompletní experimentální sestavě, která je tvořena near-end a far-end sestavami nejlépe v jedné laboratoři na stejném místě či lokalitě (ÚPT Brno), což umožňuje některé varianty zapojení topologie multiband polygonu viz tabulka 4.3. Výsledky měření metody end-to-end jsou znázorněny červenou křivkou na výše uvedeném obrázku 4.26.

Pokud nelze použít okruh, kde začátek (near-end) a konec (far-end) kompletní experimentální sestavy není na jednom společném místě či lokalitě (takové varianty jsou možné i v multiband polygonu), je zapotřebí využít postupu založeného na měření in-loop beatu. Zde monitorujeme, jak dobře se daří zpětnovazebnímu regulátoru držet danou frekvenci in-loop beatu na požadovaných 240 MHz. Po vydělení frekvenční odchylky dvěma získáváme výsledek, který v ideálních podmínkách odpovídá reziduálním fluktuacím optické frekvence na druhém konci linky [25, 27, 28]. Je třeba mít na paměti, že tento postup měření dává poněkud více optimistické výsledky, jelikož např. neodráží vliv nestabilizovaných úseků trasy, na které má vliv například střídání teploty v laboratoři během dne a noci. Schématicky a matematicky je tento postup vysvětlen výše v kapitole 4.3.1. Touto metodou byl změřen i úsek ÚPT Brno–UPOL Olomouc pro přenos ultra-stabilní frekvence na vlnových délkách 1540,6 nm a 1458 nm, jak je znázorněno oranžovou křivkou na obrázku 4.27. Metodou in-loop pro ověření stability ultra-stabilní frekvence na vlnových délkách 1540,6 nm byly ověřeny i ostatní varianty zapojení linek v multiband polygonu. Výsledky jsou demonstrovány oranžovou křivkou na obrázek 4.26.



Obr. 4.27: Měřená stabilita linek přenosu ultra-stabilní frekvence metodou in-loop v multiband polygonu.

Metoda in-loop má největší využití pro krátkodobá měření, kdy například optimalizujeme parametry zpětnovazebního regulátoru. V delších měřeních se výsledky metod end-to-end an in-loop zpravidla liší tím, že relativní stabilita přenosu ultra-stabilní frekvence zjištěná end-to-end měřením má tendenci konvergovat k technickému či fyzikálnímu limitu, zatímco hodnoty zjištěné in-loop metodou stále ideálním způsobem klesají [25, 27, 28, 54].

Došlo k měření stability ultra-stabilní optické frekvence mezi všemi variantami zapojení topologie v multiband polygonu a to pro vyhrazené C a S pásmo. Nejlepších stabilit přenosu bylo dosaženo, nejprve metodou end-to-end v úseku ÚPT Brno–UPOL Olomouc–Česká Třebova–ÚPT Brno ÚPT, kde bylo docíleno stability přenosu ultra-stabilní frekvence na vlnové délce 1540,6 nm v řádu $\times 10^{-17}$ pro $\tau = 10^3$ s viz obrázek 4.26. Dále metodou in-loop beatu v úseku ÚPT Brno–UPOL Olomouc, kde bylo docíleno stability přenosu ultra-stabilní frekvence na vlnové délce 1540,6 nm v řádu $\times 10^{-18}$ pro $\tau = 10^3$ s viz obrázek 4.27. Takto vynikající výsledky jsou podmíněny délkou a vlastnostmi optické trasy: uložení optického kabelu v zemi, nízkým výskytem ohybů, typem konektorů s brusem ferule APC, čistoty konektorů, kaskádou dvou až čtyřech obousměrných optických zesilovačů CLA BiDi dual a v poslední řadě okolím kolem optického kabelu (např. nenachází se v blízkosti významných zdrojů mechanických vibrací). V současné době probíhají přípravy pro měření stability ultra-stabilní frekvence na vlnové délce 1572,06 nm různých variant zapojení v multiband polygonu jak metodou end-to-end tak in-loop.

4.4.3 Výkonové vyvažování kaskády obousměrných zesilovačů

V této kapitole jsou prezentovány výsledky z vědeckého článku pod názvem: Bidirectional Amplifier Cascade Balancing in Open Optical Line Systems, který je nyní v recenzním řízení, jehož jsem spoluautorem [55].

Výkonové vyvažování kaskád obousměrných zesilovačů je velice důležité u obousměrných dálkových spojů a to především u přenosu ultra-stabilních veličin, kde je zásadní pro eliminaci nežádoucího efektu samovolného laserování, který může vzniknout během přenosu.

Byla navržena metrika pro měření kvality spoje a algoritmus pro vyvažování optického spoje bez lidského zásahu. Prvotní výsledky v laboratorních podmínkách ukázaly, že navrhovaný algoritmus dokáže v 70 % případů vyvážit optický spoj v rámci 1,4 % nejlepších možných stavů. Nebo v ostatních případech dokáže provést alespoň několik kroků směrem k lepšímu stavu. Oproti manuálnímu nastavení obousměrných optických zesilovačů technikem, který nemá dostatek zkušeností v této oblasti [55, 56, 57].

V prvotní fázi [56] byl algoritmus navržen pro vyvážení kaskády dvou obousměrných optických zesilovačů, což při některých dálkových spojkách, které obsahují až čtyři kusy obousměrných optických zesilovačů bylo nedostačující, proto byl algoritmus upraven pro použití s neomezeným počtem zesilovačů, kde limitujícím faktorem je velikost prohledávaného stavového prostoru.

Jak již bylo řečeno, algoritmus pro kaskádu s větším počtem obousměrných optických zesilovačů lze použít pouze forma grafické reprezentace průběhu vyvažování není snadno zobrazitelná v 2D prostoru, protože s každým přidaným obousměrným zesilovačem exponenciálně roste stavový prostor [55].

Index kvality spoje a vyvažovací algoritmus

LQI (Link quality index – Index kvality spoje/linky) je nezbytnou součástí pro automatizaci ladění a jsou na něj kladeny následující požadavky: výpočet musí být časově efektivní a metrika musí být konzistentní tzn. aby dávala při opakovaném vyhodnocení za stejných podmínek stejné výsledky. Časová efektivita je praktickým požadavkem na udržení procesu vyvažování v přijatelných časových limitech. Rozptyl lze minimalizovat zprůměrováním opakovaných měření, aby byl splněn druhý požadavek (konzistence). LQI byl navržen především pro vyhodnocování kvality přenosu v souvislosti s vyvolaným nežádoucím efektem laserování a pro včasnou detekci předchozího laserování.

Cílem však je nevyvolat nežádoucí efekt samovolného laserování během přenosu ultra-stabilních veličin. Tyto nežádoucí oscilace mohou přeslechnout a poškodit paralelní přenos. Naše hypotéza je založena na tom, že laserování je generováno v paralelních rezonančních dutinách tvořených reflexními prvky v relativní blízkosti zesilovacího média obousměrného zesilovače [55].

Vyvažovací algoritmus pro kaskádu obousměrných optických zesilovačů má pro praktické použití následující požadavky: musí fungovat pro jakýkoliv počáteční stav optické linky, musí být schopen nepřetržitého/nekonečného běhu a v neposlední řadě musí udržovat optický spoj ve funkčním stavu. Požadavek na udržení linky ve funkčním stavu je zásadní, pokud algoritmus běží na optických linkách se sdíleným produkčním provozem.

První požadavek je splněn, pokud algoritmus není závislý na síťové konektivitě prostřednictvím laděného optického spoje a také když indikátor kvality spoje LQI vrací smysluplnou hodnotu i když spojení nefunguje.

Požadavek na nekonečný běh není příliš omezující, jelikož algoritmus lze znovu spustit nebo lze navštívit stejné stavy během prohledávání stavového prostoru více než jednou. Poslední kritérium je významné a náročné na splnění. Jakmile byl spoj uveden do funkčního stavu, měl by fungovat i nadále. Přípustné jsou proto pouze jemné optimalizace zisků. Tento požadavek byl splněn přidáním dalšího omezení a to takového, že musí být dosaženo určité úrovně SNR. Experimentálně byla hodnota SNR nastavena na úroveň 25 dB [55].

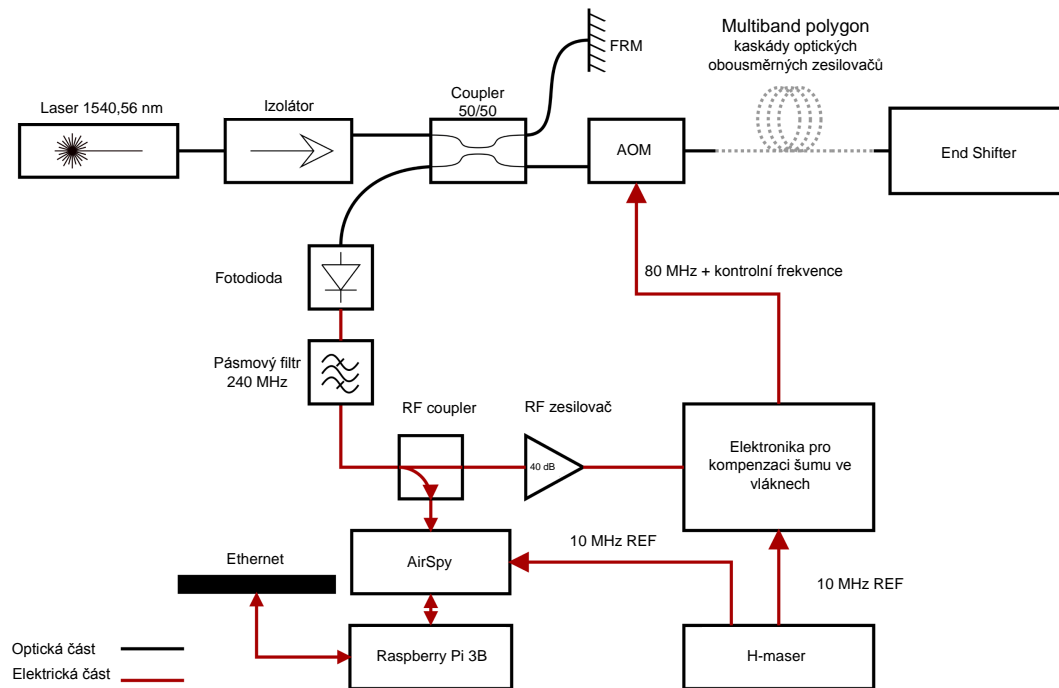
V dizertační práci nebude blíže postup výpočtu indexu kvality spoje a vyvažovací algoritmus, jelikož jsem se na jejich návrhu osobně nepodílel. V předcházejících odstavcích jsem nastínil hlavní myšlenku včetně obecného popisu a principu. Více je možné se dočíst v původním článku, který je v současné době v recenzním řízení [55].

Ověření v multiband polygonu

Ověření výkonového vyvažování kaskády obousměrných optických zesilovačů bylo uskutečněno v multiband polygonu. V naprosté většině experimentálního měření jsou však používány všechny čtyři obousměrné optické zesilovače CLA BiDi dual A, B, C a D v úseku ÚPT Brno–UPOL Olomouc–Česká Třebová–ÚPT Brno v multiband polygonu. V této konfiguraci je optická trasa dlouhá 324,68 km a vykazuje vložný útlum 72,2 dB. Nejprve proběhlo měření se scénářem pouze se dvěma obousměrnými optickými zesilovači CLA BiDi dual A a B, kde probíhalo výkonové vyvažování v úseku ÚPT Brno–UPOL Olomouc a u ostatních zbylých dvou obousměrných optických zesilovačů byly pevně nastaveny řídicí proudy pumpou na hodnoty 85 mA (CLA BiDi dual C) a 80 mA (CLA BiDi dual D). Takto omezené nastavení slouží jako mechanismus ke snížení velikosti prohledávaného stavového prostoru. Navíc je toto omezení velmi užitečné pro ilustraci kroků navržených algoritmů v dvourozměrném stavovém prostoru, který je vhodný pro přehlednou vizualizaci. V posledním scénáři byl vyvažovací algoritmus použit u všech čtyřech optických obousměrných zesilovačů. Níže budou jednotlivé scénáře měření popsány včetně dosažených výsledků.

Než započalo samotné měření, bylo zapotřebí na straně ÚPT vložit přes RF coupler „špeha“ tedy sadu dvou zařízení AirSpy (Software Defined Radio – Software definované rádio) [58] a minipočítačem Raspberry Pi 3B a mírně upravit jejich setup pro přenos ultra-stabilních veličin, jak je znázorněno na obrázku 4.28. Tato konfigurace slouží především k určení kvality spoje LQI.

Uvedená konfigurace, viz obrázek 4.28, je založena na principu Michelsonova interferometru (jedno rameno je zakončeno Faradayovým zrcátkem FRM, zatímco druhé rameno prochází přes testovací kaskádu obousměrných optických zesilovačů v multiband polygonu) [59] rozšířeného o elektroniku aktivního potlačení Dopplerova šumu [60], která je nezbytná pro přenos ultra-stabilních veličin. Akvizici dat zajišťuje minipočítač Raspberry Pi 3B prostřednictvím jednotky AirSpy s externím portem pro připojení zdroje hodin. V tomto případě byl použit jako externí zdroj hodin H-maser na ÚPT Brno.



Obr. 4.28: Blokové schéma experimentálního uspořádání s Michelsonovým interferometrem sloužící k určení LQI [30, 55].

Testování omezené konfigurace se dvěma CLA BiDi dual

Jak bylo uvedeno výše, v tomto prvním scénáři měření bude zapotřebí ověřit algoritmus v konkrétních podmínkách a vyhodnotit jeho chování v praxi. Dva obousměrné optické zesilovače CLA BiDi dual A a B v kaskádě znamenají dvourozměrný stavový prostor, který je mnohem vhodnější pro vizualizaci výsledků (stavové prostory vyšších dimenzí je obtížné reprezentovat v 2D grafu a je nutné používat pomocná zobrazení). Obousměrné optické zesilovače CLA BiDi dual využívají jedno erbiové vlákno, které je čerpané jednou pumpou a to obousměrně jak je znázorněno na obrázku 4.2.

V multiband polygonu pro přenos ultrastabilních veličin není použit žádný kompenzátor chromatické disperze, protože ultra-stabilní přenos optické frekvence využívá nemodulovaný laser o jedné vlnové délce a to 1540,56 nm, a proto není nutná kompenzace [61].

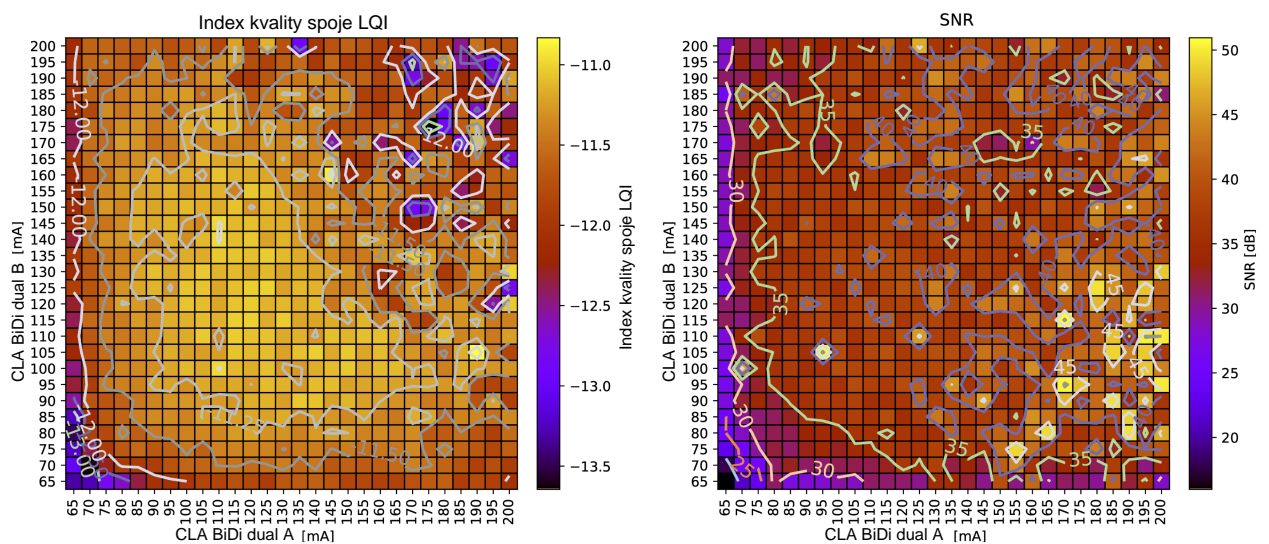
Na základě fyzikálních požadavků, předchozích laboratorních experimentů a zkušeností byla pro tento scénář definována tato omezení s těmito parametry [55]:

- pevně nastaveny řídicí proudy pumpou na hodnoty 85 mA u CLA BiDi dual C a 80 mA u CLA BiDi dual D,
- proud pumpou u obousměrných optických zesilovačů CLA BiDi dual A a B je nastaven v rozmezí 65–200 mA,

- ladící krok je zvolen na 5 mA,
- počet opakování měření LQI pro zprůměrování v daném stavu je 5,
- počáteční velikost okolí [55] je 1 a může být jednou změněna na 2,
- minimální hodnota SNR potřebná k vyhodnocení zkoumaného stavu jako přípustného je nastavena na hodnotu 25 dB.

Nastavená hodnota 25 dB je určena mapováním hodnoty SNR ve stavovém prostoru a výsledky procesu mapování jsou znázorněny na obrázku 4.29 vpravo a byly získány před prvními vyvažovacími experimenty pro první scénář. V levé části obrázku 4.29 zobrazující hodnoty LQI je patrná kompaktní oblast vysokých hodnot (oblast s žlutooranžovou barvou), které lze dosáhnout pomocí Hill-Climbing algoritmu vedeného gradientem ze soudních stavů. Přičemž hodnota SNR je funkce daného stavu a je obecně plochá a částečně zašuměná (oblast s tmavě červenou barvou). Proto není vhodná jako metrika pro algoritmus Hill-Climbing a bude sloužit pouze k zabránění návštěv nekvalitních stavů.

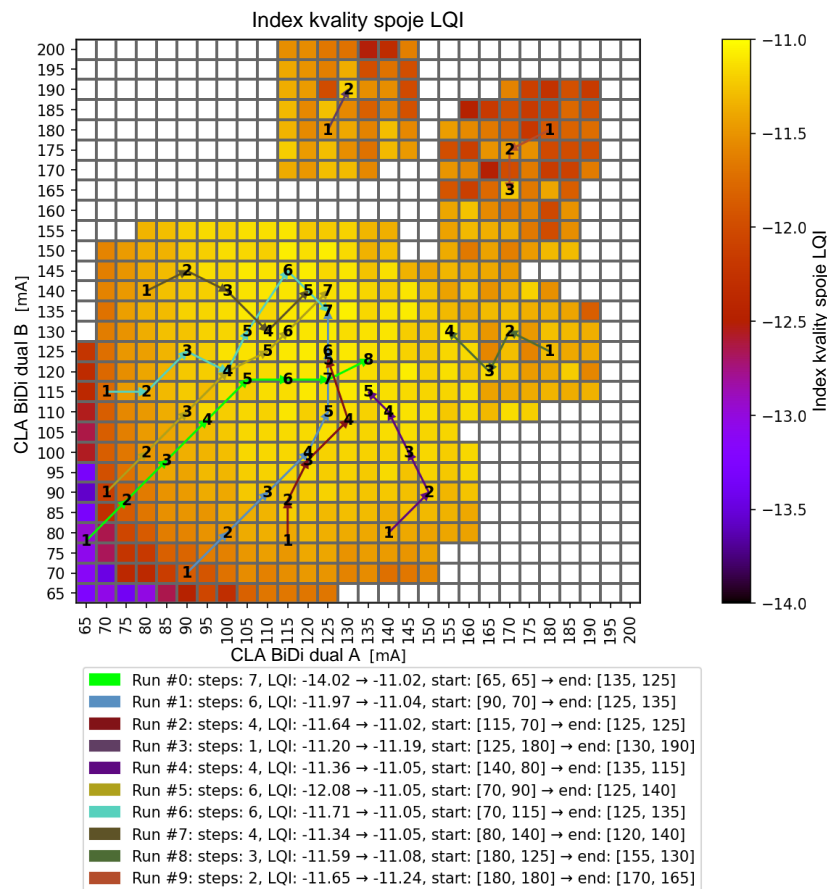
Hill-climbing algoritmus neboli gradientní algoritmus je nejjednodušší informovaná metoda prohledávání stavového prostoru. Vstupem algoritmu je stav, ze kterého se má prohledávání zahájit. Nejprve je stav expandován a jsou vygenerovány jeho sousední stavy, které jsou následně ohodnoceny. Algoritmus z nich vybere nejlépe ohodnocený stav a přejde do něj a poté algoritmus pokračuje další iterací. Algoritmus tak navštěvuje stavy se stále vyšším ohodnocením, dokud nenarazí na stav, po jehož expanzi mají všechny jeho sousední stavy horší ohodnocení. V tu chvíli se algoritmus ukončí s výsledkem posledního expandovaného stavu. Jeho celý popis včetně matematického vyjádření lze dočíst v literatuře [62].



Obr. 4.29: Analýza LQI a SNR před prvními vyvažovacími experimenty [55].

Volba výchozích bodů byla motivována pokrytím velké části stavového prostoru včetně zjevně nevhodných nastavení proudu pumpou nad hodnotou 150 mA. Proto je 10 počátečních stavů definováno jako seznam dvojic hodnot, kde každá dvojice představuje řídicí proudy v mA pro oba obousměrné optické zesilovače CLA BiDi dual A a B: [65, 65], [90, 70], [115, 70], [125, 180], [140, 80], [70, 90], [70, 115], [80, 140], [180, 125] a [180, 180].

Na základě praktických zkušeností se očekává, že pro danou optickou linku, která je velice stabilní by se hodnoty proudu pumpou mohly ustálit v rozmezí 85–125 mA [63, 64]. Obrázek 4.30 demonstruje průběh deseti běhů automatického vyvažování z výše uvedených počátečních bodů.



Obr. 4.30: Kombinované výsledky z 10 vyvažovacích běhů vycházejících z 10 různých počátečních stavů pro dva CLA BiDi dual A a B [55].

Každý průběh je znázorněn jinou barvou jako postupně číslovaná linie s dosaženým koncovým stavem. Každé číslo představuje jeden stav navštíven během procesu vyvažování. Může se stát, že nelze stav přesně sladit s mřížkou, protože čerpací dioda u EDFA obousměrného optického zesilovače potřebuje po nastavení nové úrovně

hodnoty proudu pumpou určitou dobu pro ustálení, zejména pokud je předchozí hodnota proudu pumpou výrazně vyšší nebo nižší než nová nastavená hodnota proudu pumpou.

Řešení spočívá ve zvětšení časového intervalu po nastavení nového stavu, což však znepříjemňuje proces vyvažování tím, že jej významně zpomaluje. Barvy na pozadí mřížky představují hodnoty LQI ve zkoumaných stavech. V opačném případě, je-li barva políčka mřížky bílá jedná se o nenavštívené stavy během vyvažování. Je patrné, že gradient LQI v prostoru stavů není vysoký a hodnoty LQI se pohybují přibližně v rozmezí od -14 do -11 .

Výsledky ukazují, že vyvažování započaté v 7 z 10 počátečních stavů končí v cílové zóně ohraničené 120–135 mA pro CLA BiDi dual A a 125–140 mA pro CLA BiDi dual B. Rozsah proudu pumpou v cílové zóně je mírně nad očekávaným rozsahem. Příčina je pravděpodobně dána především kvalitou uložení optických vláken v zemi a jejich propojení, použitých filtrech, které omezují zesílení nežádoucích odrazů a rozptylových jevů a také v čistotě optických konektorových spojů.

V případě, že by prototypy CLA BiDi dual měly v sobě zaintegrovány jemný optický monitor kanálů OCM [65, 66, 67, 68] jako je to u prototypu CLA BiDi noLase, by s velkou pravděpodobností došlo k zlepšení LQI na úkor optimalizace proudu pumpou.

Testování kompletní konfigurace se čtyřmi CLA BiDi dual

Na základě pozorování z předchozího měření u prvního scénáře byly pro tento scénář zvoleny následující parametry [55]:

- omezení horní hranice hodnoty proudu pumpou na 130 mA,
- řídicí proud pumpou pro každý obousměrný optický zesilovač CLA BiDi dual A, B, C a D bude nastavován v omezeném rozsahu 65–130 mA,
- ladící krok je zvolen na 5 mA,
- počet opakování měření LQI pro zprůměrování v daném stavu je 5,
- počáteční velikost okolí je 1 a může být jednou změněna na 2,
- minimální hodnota SNR potřebná k vyhodnocení zkoumaného stavu jako přípustného je nastavena na hodnotu 25 dB.

Na základě praktických zkušeností se očekává, že pro danou optickou linku, která je velice stabilní, ale již dojde k vyvažování kompletní kaskády všech čtyřech obousměrných optických zesilovačů CLA BiDi dual A, B, C a D by se hodnoty proudu pumpou mohly ustálit v rozmezí 100–125 mA.

Výsledky jednotlivých běhů ve 4D stavovém prostoru nelze zobrazit na 2D grafu podobnému tomu na obrázku 4.30, jako je to u prvního scénáře výše. Proto jsou cílové stavy s počátečními uvedeny v tabulce 4.4 pro srovnání.

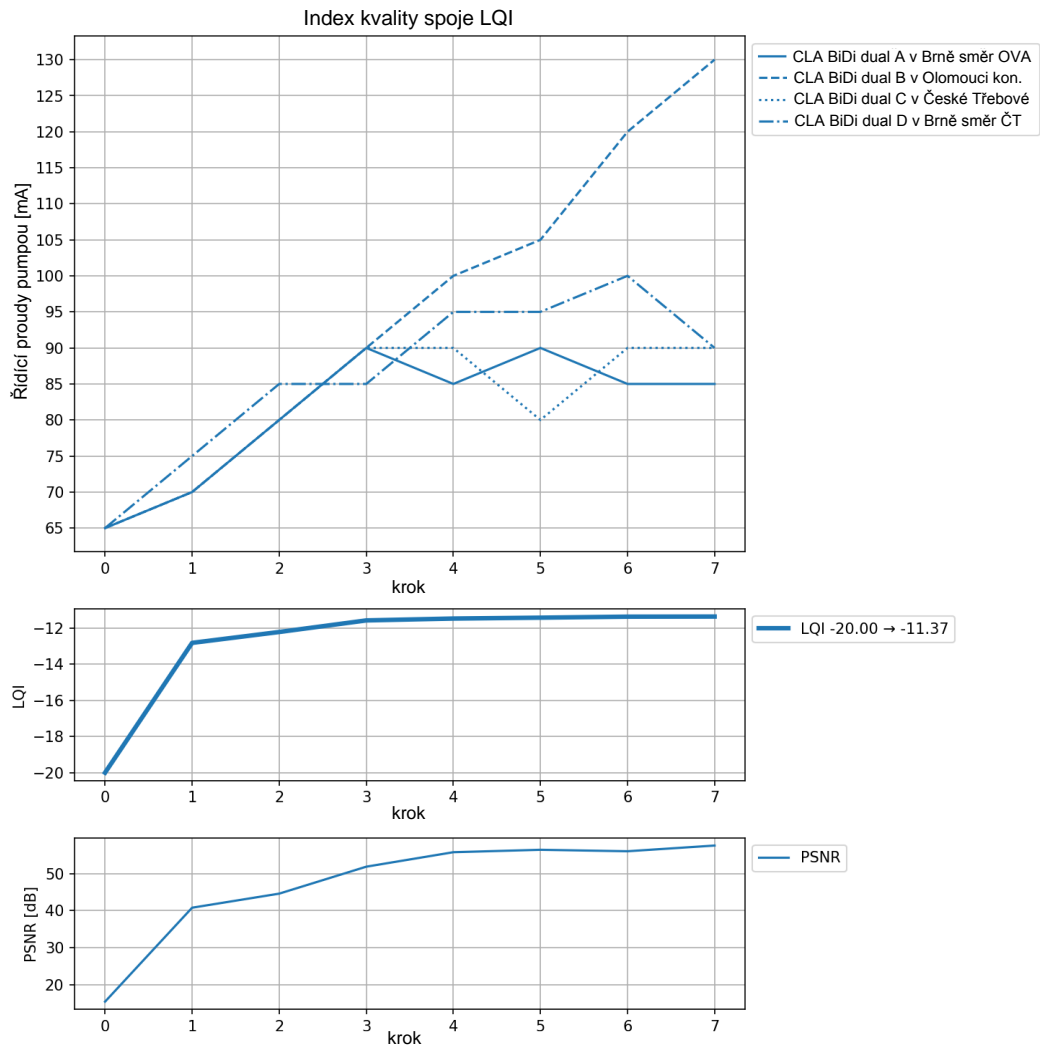
Tab. 4.4: Výsledky druhého scénáře, kaskádového vyvažování všech čtyřech obousměrných optických zesilovačů CLA BiDi dual [55].

Číslo běhu	Počáteční stav					Cílový stav				
	proudu pumpou [mA]				LQI	proudu pumpou [mA]				LQI
	CLA BiDi dual					CLA BiDi dual				
A	B	C	D	A	B	C	D			
1	65	65	65	65	-20,00	85	130	90	90	-11,37
2	75	75	75	75	-13,00	80	127	90	100	-11,40
3	85	85	85	85	-11,92	95	130	100	85	-11,22
4	95	95	95	95	-11,97	85	120	90	100	-11,40
5	105	105	105	105	-12,74	120	120	120	125	-11,08
6	115	115	115	115	-12,08	130	120	120	120	-10,78
7	125	125	125	125	-12,06	130	130	120	105	-10,86
8	65	75	85	95	-12,90	90	98	90	90	-11,45
9	125	115	105	95	-12,04	115	120	95	95	-11,03
10	70	80	90	100	-13,28	85	130	85	105	-11,38
11	80	80	80	80	-12,25	85	120	80	110	-11,37
12	110	90	90	110	-12,66	130	115	75	95	-11,27
13	100	100	100	100	-12,78	80	130	95	100	-11,37

Na obrázku 4.31 je v detailním zobrazení ukázán běh číslo 1, který dosáhl cílového stavu už v 7 kroku. Je třeba poznamenat, že CLA BiDi dual B má konečnou hodnotu proudu pumpou citelně vyšší než kterýkoliv jiný obousměrný optický zesilovač z kaskády. Lze předpokládat, že spany/úseky mezi obousměrnými optickými zesilovači CLA BiDi dual A a B nebo B a C, případně oba úseky, mají minimální odrazy, a jsou proto odolnější vůči nežádoucímu efektu samovolného laserování i při vyšších nastavených hodnotách proudu pumpou. Navíc v prvním běhu začalo vyvažování spoje ze stavu, v němž celá optická trasa nebyla v provozním stavu (tj. nepřenášela signály) viz hodnota -20 u LQI.

Přičemž cílový stav pro stejný běh nijak nevybočuje z ostatních výsledků. To ukazuje schopnost algoritmu oživit linku z nefunkčního stavu.

Za přijatelné z hlediska časové náročnosti se považuje i nastavení se čtyřmi obousměrnými optickými zesilovači. S rostoucím stavovým prostorem je vhodné uvažovat nad zvýšením kroku tedy stavový prostor rozdrobit na větší úseky a mít jich tedy méně.



Obr. 4.31: Průběh vyvažovacího běhu č.1 v druhém scénáři pro všechny čtyři obousměrné optické zesilovače CLA BiDi dual [55].

U obou scénářů během měření nebylo možné z Grafany vyčíst požadované optické výkony obousměrných optických zesilovačů v multiband polygonu pro dodatečné ověření nežádoucího efektu samovolného laserování. Protože parametry linek byly monitorovány v pětiminutových intervalech ve srovnání s časovým nastavením proudu pumpou a jeho následného ustálení na obousměrných optických zesilovačích (tj. jevy kratší než 5 minut nebyly vůbec zachyceny). Zvláště v případě, kdy dojde ke skokové změně a následně k návratu na předchozí hodnotu proudu pumpou u obousměrného optického zesilovače. Proto parametr monitorovacího intervalu v Grafaně bude vhodně nastaven tak, aby při dalších výzkumných měření a ověření došlo k zachycení změn [55].

5 Výsledky řešení dizertační práce

V rámci vývoje a rozvoje testbedů pro speciální aplikace a přenosy jsem udělal prvotní sestavení a následné oživení a ověření funkčnosti fotonického testbedu „One Setup“. Dále sestavení a následný rozvoj dynamického fotonického testbedu z pohledu dvou nezávislých tras pro různé přenosy, které daly podnět k vývoji HW části prototypu optického více-portového přepínače v provedení 16×16 a jeho následného sestavení, oživení, otestování a začlenění do dynamického fotonického testbedu pro efektivnější a větší dynamiku z pohledu připojení dalších zařízení nebo ostatních komponent, které zajišťují další možné rekonfigurace a možnosti dynamického fotonického testbedu. Také jsem se podílel na testování paralelních přenosů fotonických služeb (přenos dat, přesného času a stabilní frekvence).

Z pohledu vývoje, rozvoje, testování a nasazení prototypů obousměrných optických zesilovačů pro speciální přenosy jsem udělal HW sestavení prvního prototypu CLA BiDi, následné oživení a otestování. Na základě vývoje prvního prototypu CLA BiDi mě napadla myšlenka vytvoření modulární stavebnice pro tento druh zařízení, díky které vzniklo několik prototypů: CLA BiDi, CLA BiDi dual, CLA BiDi No-Lase a CLA SOA. U těchto prototypů jsem se přímo podílel na vývoji HW části, jejich sestavení a následném oživení a nasazení do různých testbedů, do reálné sítě CESNET pro přenos ultra-stabilních veličin a v multiband polygonu. Výsledky daly podnět k několika užitným vzorům a patentům v rámci sdružení CESNET, na nichž jsem se podílel.

U přenosu ultra-stabilních veličin ve vláknových sítích jsem se podílel na měření stability linek v T/F infrastruktuře CESNET, především na vhodném nastavení proudu pumpou u různých typů obousměrných optických CLA BiDi tak, aby nedocházelo k ovlivňování se sdíleným přenosem klasických telekomunikačních dat. Také jsem se věnoval vývoji a následnému sestavení a otestování různých filtrů pro vyhrazení určitých částí spektra v C a L pásmu pro přenos ultra-stabilních veličin. Dále jsem zajišťoval možnosti potlačení nežádoucího samovolného efektu laserování, tedy různé principy či postupy jak jej eliminovat, aby nedocházelo k degradaci přenosu. Podílel jsem se na HW vývoji prototypu end-shifteru pro přenos ultra-stabilních veličin a jeho následném sestavení, oživení, otestování a nasazení na linkách Brno–Temelín, Brno–Vídeň a v multiband polygonu.

V rámci multiband polygonu jsem sestavil 6ks CLA BiDi dual a zajistil jsem jejich nasazení v jednotlivých lokalitách. Dále jsem sestavil, otestoval a nasadil několik optických filtrů, které zajišťovaly v daných segmentech multiband polygonu vyhrazené optické spektrum pro přenos ultra-stabilních veličin a také izolaci od klasického přenosu telekomunikačních dat. Poskytoval jsem součinnost pro variabilitu v multiband polygonu během měření stability jednotlivých linek. Podílel jsem se na ověření a měření výkonového vyvažování kaskád u obousměrných optických zesilovačů.

6 Závěr

V rámci dizertační práce bylo dosaženo rozvoje dynamického fotonického testbedu a speciálních přenosů. Z dostupných zařízení, které vlastní sdružení CESNET, bylo možné sestavit první laboratorní demo „One Setup“, které umožňuje sestavení DWDM linky tvořené optickými cívkami s vláknem typu G.655 o celkové délce 300 km po 100 km spanu. Útlum sestavené trasy včetně použitých optických komponent a zařízení kompenzují čtyři EDFA zesilovače. Tímto prvním laboratorním demem byla ověřena dynamická funkce testbedu umožňující sdílení zdrojů: optických vláken, de/mux, zesilovačů, optických přepínačů a dalších optických zařízení na fotonické vrstvě, a dalo podnět k rozvoji dynamického fotonického testbedu. Vznikla tím flexibilní, snadno a rychle rekonfigurovatelná, reálná optická infrastruktura. Dále jsem provedl měření a testování paralelních přenosů fotonických služeb v rámci dynamického fotonického testbedu, tedy jeho rekonfigurace pro přenos na jednom vlákně, které je sdíleno jak pro přenos klasických telekomunikačních dat, tak přenosu T/F. Pro efektivní a větší dynamiku testbedu se plánuje vývoj, testování a nasazení zařízení víceportového optického přepínače alespoň varianty 32×32 .

V rámci rozvoje infrastruktury pro přenos ultra-stabilních veličin jsem vyvinul, sestavil, testoval a nasadil modulární zařízení obousměrného optického zesilovače, které díky své modularitě umožnilo vznik několika prototypů (CLA BiDi, CLA BiDi dual, CLA BiDi NoLase, CLA SOA). Na základě získaných zkušeností a výsledků z uvedených prototypů vznikly užité vzory a patenty. Tato zařízení byla nasazena na v T/F infrastruktuře i mimo ni v multiband polygonu, kde nyní probíhá jejich testování společně s přenosem ultra-stabilních veličin. Výsledky a měření jsou popsány v praktické části dizertační práce, kde byla dosažena relativní stabilita vláknových linek v rozmezí mezi $\times 10^{-15}$ a $\times 10^{-19}$.

Pro přenos ultra-stabilních veličin jsem dosáhl níže uvedených výsledků týkajících se samotné filtrace optického spektra pro daný přenos, aby nedocházelo k vzájemnému ovlivňování různých přenosů na sdíleném optickém vlákně pro různá optická spektra. Dále došlo k ověření metod, jak zamezit či eliminovat nežádoucí efekt samovolného laserování, který může vznikat během přenosu.

Posledním dosaženým cílem byla realizace multiband polygonu včetně nasazení různých prototypů obousměrných optických zesilovačů včetně filtrů pro ověření relativní stability jednotlivých linek. Díky variabilitě multiband polygonu byla možnost ověřit relativní stabilitu linek pomocí dvou metod end-to-end nebo in loop. Dále jsem ve spolupráci s kolegy ověřil metodu vyvažování kaskád obousměrných optických zesilovačů v multiband polygonu.

Na základě dosažených výsledků a budoucí efektivity z pohledu variability multiband polygonu jsem navrhl možnost nasazení optických přepínačů varianty 16×16 v centrálních bodech pro vzdálené automatické přepínání různých variant linek v multiband polygonu.

Toto řešení zamezí častému manuálnímu a mechanickému přepojování na různé linky a zabrání vzniku odrazů a možnému zanesení konektorového spojení nečistotou, které mohou způsobovat nežádoucí efekt samovolného laserování během přenosu ultra-stabilních veličin. Další podstatnou výhodou je časová a fyzická přítomnost technika, který prováděl přepojování na různé varianty v multiband polygonu.

Tato dizertační práce, dle mého názoru, přispěla k rozvoji teorie a zejména praktického uplatnění obousměrného optického zesilování, vylepšila filtraci optického spektra a poskytla další možné metody pro eliminaci nežádoucího efektu samovolného laserování pro přenos ultra-stabilních veličin. Různé prototypy obousměrných zesilovačů daly podněty ke zdokonalení technických řešení a přípravě podkladů pro již schválené užité vzory a patenty. Přinesla nové poznatky v chování vyvažování kaskád obousměrných optických zesilovačů na reálných linkách v multiband polygonu. Práce také ukázala další směry vývoje a zdokonalení technických prostředků i postupů v oblasti přenosu ultra-stabilních veličin.

Literatura

1. BECKER, Philippe M; OLSSON, Anders A; SIMPSON, Jay R. *Erbium-doped fiber amplifiers: fundamentals and technology*. Elsevier, 1999. ISBN 978-0120845903.
2. HAVLIS, Ondrej; VOJTECH, Josef; VELC, Radek; SLAPAK, Martin; HULA, Miloslav; RADIL, Jan; VLADIMIR, Smotlacha; MARTIN, Kolbe. Bidirectional optical amplifier delivering high gain. *2018 European Frequency and Time Forum (EFTF)*. IEEE, 2018, s. 303–307. Dostupné z DOI: 10.1109/EFTF.2018.8409055.
3. DUTTA, Niloy K; WANG, Qiang. *Semiconductor optical amplifiers*. World scientific, 2013.
4. LUCKI, Michal. Optické systémy a sítě. *Vysokoškolská skripta. České vysoké učení technické v Praze Fakulta elektrotechnická* [Dostupné z URL: https://psm.fei.stuba.sk/pages/83/LM13_F_CZ.pdf]. 2015.
5. DVOŘÁK, Tomáš. *Optické zesilovače a jejich aplikace*. 2016. Dipl. pr. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Münster, Ph.D.
6. ČECH, Martin. *Optické zesilovače pro metropolitní a přístupové sítě*. 2011. Dipl. pr. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Ing. Vladimír Tejkal.
7. IDIL. *Bi-directional amplifier summary* [Dostupné z URL: <https://www.idil-fibres-optiques.com/product/bi-directional-amplifier/>]. 2023. [citováno 19-04-2023].
8. CESNET. *Open Line System Czech Light* [Dostupné z URL: <https://czechlight.cesnet.cz/sitove-prvky/>]. 2017. [citováno 17-06-2019].
9. CESNET. *Czech Light Amplifier* [Dostupné z URL: <https://czechlight.cesnet.cz/en/network-elements/amplifier/>]. 2017. [citováno 17-06-2019].
10. CESNET. *Modular kit of the spectrally flexible device for bidirectional transmissions of optical signals sensitive to timing in the internet and other networks*. *Vynálezci: Vojtěch, J.; Radil, J.; Slavík, R.; Šíma, S.; Havliš, O.* [Spojené státy americké. IPC: H04B 10/00 H04B 10/25 H04B 10/2503 H04B 10/07955 H04B 10/07957. Patent, US 9 654 215 B2]. [citováno 03-11-2023]. Dostupné z URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/37/a7/f1/33425b05be6234/US9654215.pdf>.

11. CESNET. *Modulární stavebnice spektrálně flexibilního zařízení pro obousměrné přenosy optických signálů citlivých na časování v Internetu a jiných sítích. Vynálezcí: Vojtěch, J.; Radil, J.; Slavík, R.; Šíma, S.; Havliš, O.* [Česká republika. IPC: H04B 10/294 H04B 10/297 H04J 14/02. Patent, CZ 306 846 B6]. [citováno 03-11-2023]. Dostupné z URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/05/14/8b/3b28ba408849df/CZ306846B6.pdf>.
12. CESNET. *Modulární stavebnice zařízení pro opticky zesilované obousměrné přenosy optických signálů citlivých na časování v Internetu a jiných sítích. Původci: Vojtěch, J.; Radil, J.; Havliš, O.* [Česká republika. IPC: H04B 10/075 H04B 10/294 H04B 10/297. Užitný vzor, CZ 29 520 U1]. [citováno 03-10-2023]. Dostupné z URL: <https://isdv.upv.gov.cz/doc/FullFiles/UtilityModels/FullDocuments/FDUM0029/uv029520.pdf>.
13. CESNET. *Modulární stavebnice spektrálně flexibilního zařízení pro obousměrné přenosy optických signálů citlivých na časování v Internetu a jiných sítích. Původci: Vojtěch, J.; Radil, J.; Slavík, R.; Šíma, S.; Havliš, O.* [Česká republika. IPC: H04B 10/294 H04B 10/297. Užitný vzor, CZ 28 368 U1]. 2023. Dostupné z URL: <https://isdv.upv.gov.cz/doc/FullFiles/UtilityModels/FullDocuments/FDUM0028/uv028368.pdf>.
14. VOJTECH, Josef; HAVLIS, Ondrej; SLAPAK, Martin; SMOTLACHA, Vladimír; VELC, Radek; POSPISIL, Petr; KUNDRÁT, Jan; ALTMANNOVA, Lada; VOHNOUT, Rudolf; CIZEK, Martin et al. National research infrastructure for clock network services: CITAF. *Infrared Remote Sensing and Instrumentation XXX*. SPIE, 2022, sv. 12233, s. 87–92. Dostupné z DOI: 10.1117/12.2635013.
15. VOJTECH, Josef; HAVLIS, Ondrej; SLAPAK, Martin; RADIL, Jan; MÜNSTER, Petr; HORVATH, Tomas; ALTMANNOVA, Lada; VELC, Radek; KUNDRÁT, Jan; VOHNOUT, Rudolf et al. Optical amplification for quantum sources of ultra-stable optical frequency. *21st Czech-Polish-Slovak Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics*. SPIE, 2018, sv. 10976, s. 151–155. Dostupné z DOI: 10.1109/TSP.2016.7760986.
16. OPTOKON. *Webová stránka společnosti Optokon* [Dostupné z URL: <https://www.optokon.com/cz/>]. 2020. [citováno 11-09-2022].
17. OPTOKON. *CLAQ – CzechLight Amplifier devices BiDi EDFA* [Dostupné z URL: https://intra.optokon.com/intra/product-documents/316/CLAQ%20%C4%85%20CzechLight%20Amplifier%20devices%20BiDi%20EDFA_2022-04-11.pdf]. 2022. [citováno 11-09-2022].

18. OPTOKON. *January Newsletter 2022* [Dostupné z URL: https://www.optokon.com/files/newsletter/2022-01/OPTOKON%20January%202022%20newsletter_en.pdf]. 2022. [citováno 11-09-2022].
19. CZECHOS. *Webová stránka společnosti Czech optical solution* [Dostupné z URL: <https://czechos.cz>]. 2023. [citováno 09-04-2023].
20. INTEL DAT. *Webová stránka společnosti IntelDat* [Dostupné z URL: <https://www.intel-dat.cz>]. 2021. [citováno 11-11-2022].
21. INTEL DAT. *Optický zesilovač EDFA CzechLight* [Dostupné z URL: <https://intel-dat.cz/datasheets/DSED-CZ.pdf>]. 2021. [citováno 11-11-2022].
22. VOJTECH, Josef; RADIL, Jan; HAVLIS, Ondrej; ALTMANN, Michal; SKODA, Pavel; SMOTLACHA, Vladimír. Resilience of semiconductor optical amplifier with holding beam injection to reflections in bidirectional reciprocal operation. *2016 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. IEEE, 2016, s. 1–3. Dostupné z DOI: 10.1109/ICTON.2016.7550629.
23. VOJTECH, Josef; SLAPAK, Martin; SKODA, Pavel; RADIL, Jan; HAVLIS, Ondrej; ALTMANN, Michal; MUNSTER, Petr; VELC, Radek; KUNDRAT, Jan; ALTMANNOVA, Lada et al. Joint accurate time and stable frequency distribution infrastructure sharing fiber footprint with research network. *Optical Engineering*. 2017, roč. 56, č. 2, s. 027101–027101. Dostupné z DOI: 10.1117/1.OE.56.2.027101.
24. VOJTECH, Josef; SLAPAK, Martin; SKODA, Pavel; RADIL, Jan; HAVLIS, Ondrej; ALTMANN, Michal; MUNSTER, Petr; SMOTLACHA, Vladimír; KUNDRAT, Jan; VELC, Radek et al. Joint accurate time and stable frequency distribution infrastructure sharing fiber footprint with research network. *Remote Sensing System Engineering VI*. SPIE, 2016, sv. 9977, s. 90–95.
25. CIZEK, Martin; PRAVDOVA, Lenka; HUCL, Vaclav; RERUCHA, Simon; HRABINA, Jan; JELINEK, Michal; MIKEL, Bretislav; CIP, Ondrej; SMOTLACHA, Vladimír; HAVLIS, Ondrej; VOJTECH, Josef. Phase-coherent transfer of optical frequency between ISI CAS and CESNET. *2018 European Frequency and Time Forum (EFTF)*. IEEE, 2018, s. 293–295. Dostupné z DOI: 10.1109/EFTF.2018.8409052.

26. HUCL, Vaclav; CIZEK, Martin; PRAVDOVA, Lenka; HRABINA, Jan; JELINEK, Michal; MIKEL, Bretislav; SMOTLACHA, Vladimir; HAVLIS, Ondrej; VOJTECH, Josef; LAZAR, Josef et al. Optical frequency transfers between ISI CAS and CESNET. *21st Czech-Polish-Slovak Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics*. SPIE, 2018, sv. 10976, s. 235–240. Dostupné z DOI: 10.1117/12.2518456.
27. CIZEK, Martin; PRAVDOVA, Lenka; HRABINA, Jan; LAZAR, J; PRONEBNER, Thomas; AEIKENS, E; PREMPER, J; HAVLIS, O; SMOTLACHA, V; ALTMANNOVA, L et al. Fibre Link for Optical Frequency Transfer between ISI and BEV. *2021 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS)*. IEEE, 2021, s. 1–2. Dostupné z DOI: 10.1109/EFTF/IFCS52194.2021.9604302.
28. CIZEK, Martin; PRAVDOVA, Lenka; PHAM, Tuan Minh; LESUNDAK, Adam; HRABINA, Jan; LAZAR, Josef; PRONEBNER, Thomas; AEIKENS, Elke; PREMPER, Jörg; HAVLIS, Ondrej et al. Coherent fibre link for synchronization of delocalized atomic clocks. *Optics Express*. 2022, roč. 30, č. 4, s. 5450–5464. Dostupné z DOI: 10.1364/OE.447498.
29. VOJTĚCH, Josef; HAVLIŠ, Ondřej; ŠLAPÁK, Martin; ŠKODA, Pavel; SMOTLACHA, Vladimír; VELC, Radek; MÜNSTER, Petr; KUNDRÁT, Jan; ALTMANN, Michal; RADIL, Jan et al. Joint stable optical frequency and precise time transfer over 406 km of shared fiber lines—Study. *2017 40th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*. IEEE, 2017, s. 694–697. Dostupné z DOI: 10.1109/TSP.2017.8076076.
30. VOJTECH, Josef; HAVLIS, Ondrej; SLAPAK, Martin; ALTMANNOVA, Lada; SMOTLACHA, Vladimir; POSPISIL, Petr; KUNDRAT, Jan; VOHNOUT, Rudolf; VELC, Radek; ANDRIANTSARAZO, Elisabeth et al. National infrastructure for dissemination of precise time and interconnection of quantum sources of ultra-stable optical frequency CITAF. *22nd Polish-Slovak-Czech Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics*. SPIE, 2022, sv. 12502, s. 151–156. Dostupné z DOI: 10.1117/12.2663805.
31. VOJTECH, Josef; SMOTLACHA, Vladimir; HAVLIS, Ondrej; SLAPAK, Martin; KUNDRAT, Jan; VOHNOUT, Rudolf; VELC, Radek; CIZEK, Martin; PRAVDOVA, Lenka; HUCL, Vaclav; RERUCHA, Simon; HRABINA, Jan; MIKEL, Bretislav; LAZAR, Josef; CIP, Ondrej; KUNA, Alexander; ROZTOCIL, Jaroslav. Bezkolizní ultrastabilní přenosy ve sdílených optických vláknech. *Elektronický sborník příspěvků multioborové konference LASER61*. Lednice, 2021, s. 27–29.

32. HAVLIŠ, Ondřej; VOJTĚCH, Josef; ŠLAPÁK, Martin; ČÍP, Ondřej; ČÍŽEK, Martin; HRABINA, Jan; PRAVDOVÁ, Lenka; SLODIČKA, Lukáš. Multi-pásmový vláknový polygon pro přenos přesného času a koherentní frekvence. *Elektronický sborník příspěvků multioborové konference LASER62* [Dostupné z URL: <http://alisi.isibrno.cz/upload/files/esbornik-laser62.pdf#page=22>]. 2022, s. 23–26. ISBN 978-80-87441-31-2.
33. VOJTECH, Josef; SMOTLACHA, Vladimír; HAVLIS, Ondrej; SLAPAK, Martin; ALTMANNOVA, Lada; KUNDRAT, Jan; BHOWMICK, Sarbojeet; VOHNOUT, Rudolf; VELC, Radek; POSPISIL, Petr et al. National Infrastructure for Dissemination of Precise Time and Coherent Ultra-stable Optical Frequency-CITAF. *Proceedings of the 53rd Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting*. 2022, s. 235–242. Dostupné z DOI: 10.33012/2022.18289.
34. CESNET. *Webová stránka CITAF* [Dostupné z URL: <https://citaf.org/cs/index/>]. 2021. [citováno 18-07-2022].
35. VOJTĚCH, Josef; ŠLAPÁK, Martin; ŠKODA, Pavel; SMOTLACHA, Vladimír; VELC, Radek; MÜNSTER, Petr; KUNDRÁT, Jan; HAVLIŠ, Ondřej; ALTMANNOVÁ, Lada; ALTMANN, Michal. Precise time transfer on the IPE-VUGKT line-a detailed analysis. *2016 39th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*. IEEE, 2016, s. 757–760. Dostupné z DOI: 10.1109/TSP.2016.7760986.
36. SMOTLACHA, Vladimír; VOJTĚCH, Josef. Accurate time distribution using optical fiber. *2015 International Association of Institutes of Navigation World Congress (IAIN)*. IEEE, 2015, s. 1–5. Dostupné z DOI: 10.1109/IAIN.2015.7352265.
37. VOJTECH, Josef; RADIL, Jan; SMOTLACHA, Vladimír. Accurate WDM Based Time Transfer Using Semiconductor Optical Amplifiers. *ICMAT15*. 2015, s. 81–99. ISBN 978-981-09-5900-5.
38. CIZEK, Martin; PRAVDOVA, Lenka; HUCL, Vaclav; RERUCHA, Simon; HRABINA, Jan; MIKEL, Bretislav; LAZAR, Josef; CIP, Ondrej. Fázově koherentní přenos stabilní optické frekvence pro senzorické sítě. *Elektronický sborník příspěvků multioborové konference LASER56*. Třešť, 2016, s. 21–23. ISBN 978-80-87441-18-3.

39. VOJTECH, Josef; SMOTLACHA, Vladimír; HAVLIS, Ondřej; SLAPAK, Martin; KUNDRAT, Jan; BHOWMICK, Sarbojeet; VOHNOUT, Rudolf; VELC, Radek; ALTMANNOVA, Lada; HORVATH, Tomas et al. Towards Czech national research infrastructure for Clock Network Services. *Optical Sensors 2021*. SPIE, 2021, sv. 11772, s. 219–224. Dostupné z DOI: 10.1117/12.2589156.
40. FS.COM. *CWDM vs DWDM: What's the Difference?* [Dostupné z URL: <https://community.fs.com/article/what-is-the-difference-between-dwdm-and-cwdm-optical-technologies.html>]. 2023. [citováno 28-10-2023].
41. HAVLIŠ, Ondřej. *Pasivní optické sítě WDM-PON* [Dostupné z URL: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/8981/final-thesis.pdf?sequence=-1>]. 2012. Dipl. pr. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Münster, Ph.D.
42. VOJTECH, Josef; HAVLIS, Ondřej; SLAPAK, Martin; BHOWMICK, Sarbojeet; RADIL, Jan; MUNSTER, Petr; HORVATH, Tomas; VELC, Radek; KUNDRAT, Jan; ALTMANNOVA, Lada et al. Alternative spectral windows for photonic services distribution. *Infrared Remote Sensing and Instrumentation XXVII*. SPIE, 2019, sv. 11128, s. 39–46. Dostupné z DOI: 10.1117/12.2529713.
43. VOJTECH, Josef; RADIL, Jan; HAVLIS, Ondřej; ALTMANN, Michal; SKODA, Pavel; SMOTLACHA, Vladimír; MUNSTER, Petr. Effects of reflections in present optical networks with bidirectional transmissions. *28th Conference and Exhibition on OPTICAL COMMUNICATIONS 2016 NGA*. Agentura Action M, 2016, s. 25–26. ISBN 978-80-86742-45-8.
44. SIMSARIAN, Jesse E; WINZER, Peter J. Shake before break: Per-span fiber sensing with in-line polarization monitoring. *Optical Fiber Communication Conference*. Optica Publishing Group, 2017, M2E–6. Dostupné z DOI: 10.1364/OFC.2017.M2E.6.
45. KUMAR, Dinesh; SHARMA, Ashutosh; KUMAR, Rajiv; SHARMA, Neeru. A holistic survey on disaster and disruption in optical communication network. *Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering (Formerly Recent Patents on Electrical & Electronic Engineering)*. 2020, roč. 13, č. 2, s. 130–135. Dostupné z DOI: 10.2174/2352096512666190215141938.

46. DUBOVAN, Jozef; LITVIK, Jan; BENEDIKOVIC, Daniel; MULLEROVA, Jarmila; GLESK, Ivan; VESELOVSKY, Andrej; DADO, Milan. Impact of wind gust on high-speed characteristics of polarization mode dispersion in optical power ground wire cables. *Sensors*. 2020, roč. 20, č. 24, s. 7110. Dostupné z DOI: 10.3390/s20247110.
47. ZHAO, Jian; LIU, Yaping; XU, Tianhua. Advanced DSP for coherent optical fiber communication. *Applied Sciences*. 2019, roč. 9, č. 19, s. 4192. Dostupné z DOI: 10.3390/app9194192.
48. FS.COM. *PC vs UPC vs APC Connector: Selecting the Right Fiber Connector Type* [Dostupné z URL: <https://community.fs.com/article/pc-vs-upc-vs-apc-connector-selecting-the-right-fiber-connector-type.html>]. 2021. [citováno 17-09-2023].
49. PROMAXELECTRONICS. *Optical fiber connector types: An easy guide* [Dostupné z URL: <https://www.promaxelectronics.com/ing/news/578/optical-fiber-connector-types-an-easy-guide/>]. 2019. [citováno 27-09-2023].
50. CESNET. *Pozor na spojování optických konektorů typu PC a APC!* [Dostupné z URL: <https://staff.cesnet.cz/~michal/vms/APC/>]. 2019. [citováno 21-09-2023].
51. HAVLIS, Ondrej; VOJTECH, Josef; VELC, Radek; SLAPAK, Martin; FILKA, Miloslav; SKALJO, Edvin. Influence of phase-sensitive optical time-domain reflectometer on community antenna television transmission. *Optical Engineering*. 2021, roč. 60, č. 2, s. 026103–026103. Dostupné z DOI: 10.1117/1.OE.60.2.026103.
52. HAVLIS, Ondrej; VOJTECH, Josef; SLAPAK, Martin; CIP, Ondrej; CIZEK, Martin; HRABINA, Jan; PRAVDOVA, Lenka. Infrastruktura pro přenos přesného času a koherentní frekvence s využitím multi bandu. *Elektronický sborník příspěvků multioborové konference LASER61*. Lednice, 2021, s. 24–26.
53. VOJTECH, Josef; HAVLIS, Ondrej; SLAPAK, Martin; VELC, Radek; MUNSTER, Petr; HORVATH, Tomas; KUNDRAT, Jan; SMOTLACHA, Vladimír; HRABINA, Jan; CIZEK, Martin et al. Multi-purpose infrastructure for dissemination of precise stable optical frequency. *Infrared Remote Sensing and Instrumentation XXVI*. SPIE, 2018, sv. 10765, s. 60–65. Dostupné z DOI: 10.1117/12.2321333.

54. VOJTECH, Josef; ALTMANN, Michal; SKODA, Pavel; HORVATH, Tomas; SLAPAK, Martin; SMOTLACHA, Vladimír; HAVLIS, Ondřej; MUNSTER, Petr; RADIL, Jan; KUNDRAT, Jan et al. Optical stabilization for time transfer infrastructure. *Applied Optical Metrology II*. SPIE, 2017, sv. 10373, s. 261–266. Dostupné z DOI: 10.1117/12.2274815.
55. ŠLAPÁK, Martin; HAVLIŠ, Ondřej; VOHNOUT, Rudolf; VOJTĚCH, Josef; ČÍŽEK, Martin. Stabilization of super coherent frequency transfers via amplifier cascade balancing. *Preprint submitted to Elsevier*. 2024. Vědecký článek v recenzním řízení.
56. SLAPAK, Martin; HULA, Miloslav. Multiagent system in automatic light power balance in optical networks. *Current Developments in Lens Design and Optical Engineering XIV* [Dostupné z URL: https://photonics.cesnet.cz/_media/publications/transmission-systems/2013/lipoba.pdf]. SPIE, 2013, sv. 8841, s. 264–270.
57. SLAPAK, Martin; HULA, Miloslav. *Software Light Power Balance (LiPoBa)*. 2013.
58. AIRSPY. *Airspy is Software-Defined Radio* [Dostupné z URL: <https://airspy.com>]. 2023. [citováno 2023-08-11].
59. EID, Mahmoud MA; RASHED, Ahmed Nabih Zaki. Simulative and analytical methods of bidirectional EDFA amplifiers in optical communication links in the optimum case. *Journal of Optical Communications*. 2021, s. 193. Dostupné z DOI: 10.1515/joc-2020-0193.
60. SALWIK, Karol; ŚLIWCZYŃSKI, Łukasz; KREHLIK, Przemysław; KOŁODZIEJ, Jacek. Optimization of time and frequency fiber-optic links exploiting bi-directional amplifiers, based on real-time performance measurement. *Optical Fiber Technology*. 2021, roč. 62, s. 102465.
61. DORAN, NJ; ELLIS, AD. Minimising total energy requirements in amplified links by optimising amplifier spacing. *Optics express*. 2014, roč. 22, č. 16, s. 19810–19817. Dostupné z DOI: 10.1364/OE.22.019810..
62. WIKIPEDIA. *Hill climbing* [Dostupné z URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Hill_climbing]. 2023. [citováno 14-11-2023].
63. DALLAGLIO, Matteo; SAMBO, Nicola; CUGINI, Filippo; CASTOLDI, Piero. YANG models for vendor-neutral optical networks, reconfigurable through state machine. *IEEE Communications Magazine*. 2017, roč. 55, č. 8, s. 170–178. Dostupné z DOI: 10.1109/MCOM.2017.1600733.

64. KUNDRÁT, Jan; LE ROUZIC, Esther; MÅRTENSSON, Jonas; CAMPANELLA, Andrea; HAVLIŠ, Ondřej; D'AMICO, Andrea; GRAMMEL, Gert; GALIMBERTI, Gabriele; CURRI, Vittorio; VOJTĚCH, Josef. GNPY & YANG: open APIs for end-to-end service provisioning in optical networks. *Optical Fiber Communication Conference*. Optica Publishing Group, 2021, M1B–6.
65. KUNDRÁT, Jan; CAMPANELLA, Andrea; LE ROUZIC, Esther; FERRARI, Alessio; HAVLIŠ, Ondřej; HAŽLINSKÝ, Michal; GRAMMEL, Gert; GALIMBERTI, Gabriele; CURRI, Vittorio. Physical-layer awareness: GNPY and ONOS for end-to-end circuits in disaggregated networks. *Optical Fiber Communication Conference*. Optica Publishing Group, 2020, M3Z–17. Dostupné z DOI: 10.1364/OFC.2020.M3Z.17.
66. KUNDRÁT, Jan; HAVLIŠ, Ondřej; JEDLINSKÝ, Jaroslav; VOJTĚCH, Josef. Opening up ROADMs: let us build a disaggregated open optical line system. *Journal of Lightwave Technology*. 2019, roč. 37, č. 16, s. 4041–4051. Dostupné z DOI: 10.1109/JLT.2019.2906620.
67. KUNDRÁT, Jan; HAVLIŠ, Ondřej; RADIL, Jan; JEDLINSKÝ, Jaroslav; VOJTĚCH, Josef. Opening up ROADMs: a filterless add/drop module for coherent-detection signals. *Journal of Optical Communications and Networking*. 2020, roč. 12, č. 6, s. C41–C49. Dostupné z DOI: 10.1364/JOCN.388893.
68. KUNDRÁT, Jan; VAŠKO, Michal; KREJČÍ, Radek; KUBERNÁT, Václav; PECKA, Tomáš; HAVLIŠ, Ondřej; ŠLAPÁK, Martin; JEDLINSKÝ, Jaroslav; VOJTĚCH, Josef. Opening up ROADMs: streaming telemetry. *Journal of Optical Communications and Networking*. 2021, roč. 13, č. 10, E81–E93. Dostupné z DOI: 10.1364/JOCN.425167.

Curriculum Vitæ

Ing. Ondřej Havliš

Osobní informace

Datum narození: 23. 09. 1987
Místo narození: Nové Město na Moravě
Národnost: Česká
Stav: ženatý
Adresa: Jabloňová 51, 664 48 Moravany u Brna
Telefon: +420 777 938 764
E-mail: havli.ondra@centrum.cz

Vzdělání

2015–nyní Ph.D. student
Vysoké učení technické v Brně
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Téma disertační práce: Efektivní optické funkce ve vláknových fotonických sítích
Vedoucí dizertační práce: prof. Ing. Miloslav Filka, CSc., a doc. Mgr. Karel Slaviček, Ph.D.,

2010–2012 Magisterský diplom
Vysoké učení technické v Brně
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Téma diplomové práce: Pasivní optické sítě WDM-PON
Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Münster, Ph.D.,

2007–2010 Bakalářský diplom
Vysoké učení technické v Brně
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Téma bakalářské práce: Metody vyhledávání a dokumentace optických kabelů
Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.,

2013 Měření a vyhodnocení optických tras
PROFiber Networking CZ s.r.o.

2013 Základy vláknové optiky
PROFiber Networking CZ s.r.o.

2012 Jazykový kurz angličtiny-chroničtí začátečníci
Nepustilova jazyková škola

2012 Jazykový kurz angličtiny-mírně pokročilí
Nepustilova jazyková škola

2011 Optické přístupové sítě WDM-PON
PROFiber Networking CZ s.r.o.

Ocenění

2010 Cena děkanky FEKT, VUT v Brně za bakalářskou práci

Pracovní zkušenosti

2015–nyní Výzkumný pracovník v optických sítích
CESNET, zájmové sdružení právnických osob
Generála Píky 430/26, 160 00 Praha 6
Člen výzkumného týmu optických sítí, zabývající se výzkumem, vývojem a inovací v oboru síťových technologií, zejména v oblasti pokročilých fotonických zařízení, budování fotonických sítí a přenosem ultra-stabilních veličin

Participace na projektech

2024–2028 Kvantové inženýrství a nanotechnologie
identifikační kód: CZ.02.01.01/00/22_008/0004649
člen řešitelského týmu

2023–2026 SUBMarine cablEs for ReSearch and Exploration
identifikační kód: 101095055
člen řešitelského týmu

2023–2026 Kvantově šifrovaná komunikace se zvýšeným zabezpečením fyzické vrstvy
identifikační kód: VK01030193
člen řešitelského týmu

2023–2026 nike-Infrastruktura CZ, identifikační kód: LM2023054
člen řešitelského týmu

2021–2025 Kybernetická bezpečnost sítí v postkvantové éře
identifikační kód: VJ01010008
člen řešitelského týmu

2020–2023	e-INFRA CZ: Modernizace identifikační kód: CZ.02.1.01/0.0/0.0/18_072/0015659 člen řešitelského týmu
2016–2022	E-infrastruktura CESNET, identifikační kód: LM2015042 člen řešitelského kolektivu se zaměřením na moderní vysokorychlostní optické sítě a jejich výzkum a vývoj
2015–2020	Detekce ohrožení bezpečnosti infrastruktur identifikační kód: VI20152020045 člen řešitelského týmu
2012–2015	Velká infrastruktura CESNET, identifikační kód: LM2010005 člen řešitelského kolektivu se zaměřením na moderní vysokorychlostní optické sítě a jejich výzkum
2012–2015	GN3 a GN3plus – EU projekty panevropské výzkumné a vzdělávací sítě GÉANT člen řešitelského kolektivu zaměřením na výzkumné a provozní aktivity: Joint Research Activities a Service Activities

Významné výsledky výzkumu

CESNET. Modular kit of the spectrally flexible device for bidirectional transmissions of optical signals sensitive to timing in the internet and other networks. Vynálezci: Vojtěch, J.; Radil, J.; Slavík, R.; Šíma, S.; Havliš, O. [Spojené státy americké. IPC: H04B 10/00 H04B 10/25 H04B 10/2503 H04B 10/07955 H04B 10/07957. Patent, US 9 654 215 B2]. [citováno 03-11-2023]. Dostupné z URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/37/a7/f1/33425b05be6234/US9654215.pdf>

CESNET. Modulární stavebnice spektrálně flexibilního zařízení pro obousměrné přenosy optických signálů citlivých na časování v Internetu a jiných sítích. Vynálezci: Vojtěch, J.; Radil, J.; Slavík, R.; Šíma, S.; Havliš, O. [Česká republika. IPC: H04B 10/294 H04B 10/297 H04J 14/02. Patent, CZ 306 846 B6]. Dostupné z URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/05/14/8b/3b28ba408849df/CZ306846B6.pdf>

CESNET. Modulární stavebnice zařízení pro opticky zesilované obousměrné přenosy optických signálů citlivých na časování v Internetu a jiných sítích. Původci: Vojtěch, J.; Radil, J.; Havliš, O. [Česká republika. IPC: H04B 10/075 H04B 10/294 H04B 10/297. Užitný vzor, CZ 29 520 U1]. Dostupné z URL: <https://isdv.upv.gov.cz/doc/FullFiles/UtilityModels/FullDocuments/FDUM0029/uv029520.pdf>

CESNET. Modulární stavebnice spektrálně flexibilního zařízení pro obousměrné přenosy optických signálů citlivých na časování v Internetu a jiných sítích. Původci: Vojtěch, J.; Radil, J.; Slavík, R.; Šíma, S.; Havliš, O. [Česká republika. IPC: H04B 10/294 H04B 10/297. Užitený vzor, CZ 28 368 U1]. 2023. Dostupné z URL:

<https://isdv.upv.gov.cz/doc/FullFiles/UtilityModels/FullDocuments/FDUM0028/uv028368.pdf>

HAVLIS, Ondrej; VOJTECH, Josef; VELC, Radek; SLAPAK, Martin; et al. Bidirectional optical amplifier delivering high gain. In: *2018 European Frequency and Time Forum (EFTF)*. IEEE, 2018. p. 303-307. DOI: [10.1109/EFTF.2018.8409055](https://doi.org/10.1109/EFTF.2018.8409055)

HAVLIS, Ondrej; VOJTECH, Josef; VELC, Radek; SLAPAK, Martin; et al. Influence of phase-sensitive optical time-domain reflectometer on community antenna television transmission. *Optical Engineering*, 2021, 60.2: 026103-026103. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.OE.60.2.026103>

HAVLIŠ, Ondřej; VOJTECH, Josef; SLAPAK, Martin; OCIP, Ondrej et al. MULTIPÁSMOVÝ VLÁKNOVÝ POLYGON PRO PŘENOS PŘESNÉHO ČASU A KOHERENTNÍ FREKVENCE. In: *e-Sborník příspěvků multioborové konference*. 2022. p. 23. Dostupné: <http://alisi.isibrno.cz/upload/files/esbornik-laser62.pdf#page=22>

VOJTECH, Josef; HAVLIS, Ondrej; SLAPAK, Martin; et al. National infrastructure for dissemination of precise time and interconnection of quantum sources of ultra-stable optical frequency CITAF. In: *22nd Polish-Slovak-Czech Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics*. SPIE, 2022. p. 151-156. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2663805>

ŠLAPÁK, Martin; HAVLIŠ, Ondrej; VOHNOUT, Rudolf; VOJTECH, Josef; ČÍŽEK, Martin. Stabilization of super coherent frequency transfers via amplifier cascade balancing. Preprint submitted to Elsevier, 2024. *Probíhá recenzní řízení*.

KUNDRÁT, Jan; HAVLIS, Ondrej; et al. Opening up ROADMs: let us build a disaggregated open optical line system. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37.16: 4041-4051. DOI: [10.1109/JLT.2019.2906620](https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2906620)

KUNDRÁT, Jan; HAVLIS, Ondrej; et al. Opening up ROADMs: a filterless add/drop module for coherent-detection signals. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2020, 12.6: C41-C49. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOCN.388893>

Publikační aktivity

- Články v odborných impaktovaných časopisech: 10
- Články publikované v konferenčních sbornících: 40
- Spoluautorství na užiteném vzoru: 2
- Spoluautorství na patentu: 2

Uvedené informace jsou uvedeny k datu 26. 01. 2024.