

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2018

Bc. Petr Dejdar



# 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

## GRAFICKÉ UŽIVATELSKÉ ROZHRANÍ PRO SENZORICKÉ SYSTÉMY

GRAPHICAL USER INTERFACE FOR SENSING SYSTEMS

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Dejdar

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Münster, Ph.D.

BRNO 2018



# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

**Student:** Bc. Petr Dejdar

**ID:** 155148

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2017/18

**NÁZEV TÉMATU:**

## Grafické uživatelské rozhraní pro senzorické systémy

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Cílem práce je teoretický rozbor problematiky senzorických systémů založených na optických vláknech. Na základě teoretického rozboru a měření bude proveden návrh a realizace grafického uživatelského rozhraní (GUI) sensorického systému pro možnost nastavování parametrů dílčích komponent, vyčítání stavových hodnot z komponent, zobrazení naměřených dat, apod.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] FILKA, Miloslav. Optoelektronika : Pro telekomunikace a informatiku. Vyd. 1. Brno : Centa, 2009. 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.

[2] OTHONOS, Andreas. a Kyriacos. KALLI. Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing. Boston, Mass.: Artech House, c1999. ISBN 0890063443.

**Termín zadání:** 5.2.2018

**Termín odevzdání:** 21.5.2018

**Vedoucí práce:** Ing. Petr Münster, Ph.D.

**Konzultant:**

**prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**  
*předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce je zaměřena na vytvoření grafického uživatelského prostředí pro senzorický systém založený na fázové OTDR. V diplomové práci jsou popsány optická vlákna, vysvětlen princip Braggových mřížek, jejich výroba a jejich využití v senzorech. Následně jsou popsány metody měření útlumu v optických vláknech a fázová OTDR. V diplomové práci je také popsáno programovací prostředí LabVIEW a použitý senzorický systém a jeho komponenty. V praktické části je popsáno samotné uživatelské prostředí, které se skládá ze dvou záložek. První záložka je určena pro vyhodnocování a zobrazování naměřených dat. Druhá záložka slouží k ovládání a nastavování dílčích komponent systému. Obě tyto záložky jsou dále členěny na další podzáložky. V závěru je uveden další možný vývoj programu a také možnosti výměny hardwaru pro lepší funkci senzorického systému do budoucna.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

FBG, NI LabVIEW, Měření útlumu, Optické vlákno, Optické zesilovače, Fázová OTDR, OTDR

## **ABSTRACT**

Master thesis is focused on creating graphical user interface for the sensorical system based on Phase-OTDR. Theoretical part describes optical fibers, explains the principle of Bragg gratings, their production and their use in sensors. Methods of optical fiber attenuation and phase OTDR measurement are also described. Other part is focused on LabVIEW programming software and utilization of sensorical system and its components. Practical part deals with the user interface itself, which consists of two tabs. The first tab is designed for evaluation and display of measured data. The second tab is used to control and set up system components. Both of these tabs are further subdivided into other subtabs. Regarding the conclusion, further development of the program and options of hardware replacement for improving this sensorical system in the future will be discussed.

## **KEYWORDS**

FBG, NI LabVIEW, Measurement atenuation, Optical fiber, Optical amplifiers, Phase-OTDR, OTDR

DEJDAR, Petr. *Grafické uživatelské rozhraní pro senzorické systémy*. Brno, 2018, 57 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. Petr Münster, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Grafické uživatelské rozhraní pro senzorické systémy“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Petrovi Münsterovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno .....

.....

podpis autora



Faculty of Electrical Engineering  
and Communication  
Brno University of Technology  
Purkynova 118, CZ-61200 Brno  
Czech Republic  
<http://www.six.feec.vutbr.cz>

## PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsáný v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno .....

.....  
podpis autora



EVROPSKÁ UNIE  
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ  
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



# OBSAH

Úvod	11
<b>1 Optická vlákna a přenos signálu</b>	<b>13</b>
1.1 Optická vlákna	13
1.1.1 Jednovidové vlákno	13
1.1.2 Vícevidová vlákna	14
1.2 Konektory	15
1.3 Vlastnosti optických vláken	17
<b>2 FBG(Vláknové Braggovy mřížky)</b>	<b>18</b>
2.1 Braggovy mřížky	18
2.2 Fotosenzitivita	19
2.3 Výroba	20
2.3.1 Vnitřní zapisování	20
2.3.2 Interferometrická metoda	20
2.3.3 Výroba bod po bodu	21
2.3.4 Pomocí fázové masky	22
2.3.5 Ostatní metody výroby	22
2.4 Senzory	23
2.4.1 Teplotní senzory	23
2.4.2 Senzory mechanického napětí	24
<b>3 Měření útlumu v optických vláknech</b>	<b>25</b>
3.1 Přímá metoda	25
3.1.1 Varianty přímé metody	25
3.2 Metoda OTDR	26
3.2.1 Rayleighův rozptyl	27
3.2.2 Fresnelův odraz	27
3.2.3 Dynamický rozsah	28
3.2.4 Mrtvá zóna	28
3.2.5 Linearita	29
3.2.6 Vlnová délka	29
3.2.7 Fázová OTDR	29
<b>4 Měřicí zařízení</b>	<b>31</b>
4.1 Optické zesilovače EDFA	33
4.2 Analog Discovery 2	33



<b>5</b>	<b>LabVIEW</b>	<b>35</b>
5.1	Čelní panel (Front panel) . . . . .	35
5.2	Blokový diagram (Block diagram) . . . . .	36
5.3	Ovladače DAQmx . . . . .	37
5.4	Ovladače Digilent WaveForms . . . . .	37
5.5	Paleta Serial . . . . .	38
<b>6</b>	<b>GUI pro senzorické systémy</b>	<b>39</b>
6.1	GUI pro senzorický systém založený na fázové OTDR . . . . .	39
6.2	Main . . . . .	39
6.3	Settings . . . . .	42
6.3.1	Laser . . . . .	43
6.3.2	Input pulse . . . . .	43
6.3.3	EDFA 1 . . . . .	43
6.3.4	EDFA 2 . . . . .	45
6.4	Uvažované změny . . . . .	48
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>51</b>
	<b>Literatura</b>	<b>53</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>55</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>56</b>
<b>A</b>	<b>Obsah přiloženého CD</b>	<b>57</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Nákres složení optického vlákna[8]. . . . .	13
1.2	Nákres jednovidového optického vlákna. . . . .	14
1.3	Nákres vícevidového optického vlákna. . . . .	14
1.4	Nákres gradientního optického vlákna. . . . .	15
1.5	Přehled nejpoužívanějších konektorů v optických sítích [14]. . . . .	16
1.6	Broušení fermulí optických konektorů [2]. . . . .	17
2.1	Nákres Braggovy vláknové mřížky. . . . .	18
2.2	Typy mřížek. . . . .	19
2.3	Interferometrická metoda. . . . .	21
2.4	Metoda bod po bodu. . . . .	21
2.5	Metoda fázové masky. . . . .	22
2.6	Lloydův interferometr [7]. . . . .	23
2.7	Teplotní senzory [6]. . . . .	24
2.8	Senzor mechanického napětí [16]. . . . .	24
3.1	Schéma měřících variant přímé metody. . . . .	26
3.2	Přenosný reflektometr EXFO MaxTester 720C[4]. . . . .	26
3.3	Schematické znázornění Rayleigho rozptylu. . . . .	27
3.4	Schematické znázornění Fresnelova odrazu. . . . .	27
3.5	Příklad reflektogramu OTDR. . . . .	28
3.6	Příklad odraženého signálu fázového OTDR. . . . .	29
4.1	Schema sensorického systému založeného na fázové OTDR. . . . .	31
4.2	Čelní panel sensorického systému. . . . .	32
4.3	Celá skříň sensorického systému. . . . .	32
4.4	BKtel EDFA. . . . .	33
4.5	Digilent Analog Discovery 2 [3]. . . . .	34
5.1	Ukázka palety Controls. . . . .	35
5.2	Paleta funkcí a subpaleta struktur. . . . .	36
5.3	Paleta s ovladači ke kartám NI. . . . .	37
5.4	Paleta s ovladači Digilent WaveForms. . . . .	38
5.5	Ovladače umožňující práci se sériovou linkou. . . . .	38
6.1	Logika pro aktivaci karet. . . . .	39
6.2	Načítání binárních dat. . . . .	40
6.3	Označení jednotlivých period signálu pro pozdější zpracování. . . . .	40
6.4	Čelní panel se zobrazením grafu s daty. . . . .	41
6.5	Čelní panel se zobrazením Waterfall grafu. . . . .	42
6.6	Čelní panel záložky Input pulse. . . . .	43
6.7	Pohled na čelní panel s otevřenou kartou EDFA 1. . . . .	44

6.8	Ukázka odesílání příkazu SCC. . . . .	45
6.9	Nastavení sériové linky. . . . .	46
6.10	Ukázka textového souboru pro EDFA 1. . . . .	46
6.11	Ukázka čelního panelu pro optický zesilovač EDFA 2. . . . .	47
6.12	Smyčka pro detekci příkazu z EDFA 2. . . . .	48
6.13	Hybridní CPU-FPGA. . . . .	49
6.14	Ukázka použití Formula node. . . . .	50
6.15	Ukázka funkce modulu Math Script [12]. . . . .	50

# ÚVOD

Tato práce se věnuje vývoji grafického uživatelského prostředí pro měřicí senzorické systémy. Uživatelské prostředí bude vytvořeno v programu LabVIEW od National Instruments. Cílem diplomové práce je teoretický rozbor problematiky optických sítí, jako jsou optická vlákna a jejich vlastnosti. Poté jsou rozebrány bodové senzory využívající FBG (které jsou typickým představitelem bodového měření) a reflektometrické senzory. Náročnost na výrobu, zpracování a v neposlední řadě možnost pouze bodového měření, ukazují výhodu distribuovaných senzorů, zvláště těch založených na reflektometrickém principu. Následně prozkoumat teorii OTDR a jevů, kterých využívá. Na základě těchto znalostí vytvořit program pro obsluhu tohoto systému, vyhodnocování naměřených hodnot a nastavování parametrů jeho součástí.

Teoretická část rozebírá druhy optických vláken podle konstrukce jader vláken. Jsou zde popsány vlastnosti jednotlivých typů vláken, jejich výhody a nevýhody a základní pojmy nutné pro pochopení cesty paprsku optickým vláknem. Jsou zde také popsány nejčastěji používané konektory pro spojování vláken.

Následující kapitola se zabývá vlákny, které obsahují Braggovy mřížky a základní vlastnosti optických vláken, nutné pro výrobu FBG. Dále jsou popsány nejpoužívanější metody výroby vláknových mřížek a tyto metody jsou zde také ilustračně znázorněny.

V následující kapitole jsou popsány metody pro měření útlumu v optických vláknech. Tato kapitola obsahuje základní popis přímé metody měření a obsáhlejší popis nepřímé metody OTDR a jevů, kterých tato metoda využívá. Dále je popsána fázová OTDR, která je v této práci využívána pro vyhodnocování vibrací v okolí optického kabelu.

Další kapitola je věnována samotnému měřicímu systému a jeho komponentům. Poté je popsáno programovací prostředí LabVIEW, jeho základní funkce, používané bloky a knihovny, ovladače pro zpracovávání dat a konfigurace sériové linky, popřípadě přenos informací po sériové lince.

V následující kapitole je popsáno vytvořené uživatelské grafické prostředí, které se skládá ze dvou hlavních částí. První částí je program Main, který se stará o sběr dat a následné zpracování a vyhodnocení. Obsahuje po sobě dvě záložky pro změnu zobrazovaných grafů. První karta zobrazuje pouze signál, který je rozdělen na jednotlivé periody a ty jsou následně naskládány do grafu se stejnou osou x, tj. přes sebe. Druhá záložka zobrazuje z naměřených dat Waterfall graf.

Druhá část programu je záložka Settings, která se stará o komunikaci z dílčími komponenty systému. Je dále rozdělena na čtyři podzáložky. První z nich je připravená pro vytvoření ovládacího programu pro laser. Záložka Input pulse obsahuje ovládací program pro zařízení Analog Discovery 2. Poslední dvě záložky slouží

pro nastavování dvou optických zesilovačů EDFA. Tyto podprogramy jsou opatřeny také vyčítáním aktuálních hodnot ze zesilovačů, včetně grafické indikace příchozích alarmů.

V závěru této práce jsou shrnuty její výsledky a zhodnocení možných variant kódů použitých nebo nepoužitých v tomto grafickém uživatelském prostředí. Jsou zde shrnuty jednotlivé podprogramy podle jejich funkčnosti a funkčnosti některých komponent sensorického systému. Dále jsou zde také zamýšlené úpravy programu do budoucna na základě možného rozšíření hardwaru o další komponenty, popřípadě přidání hybridního CPU–FPGA, jak pro generování, tak i pro částečné, nebo úplné zpracování signálu.

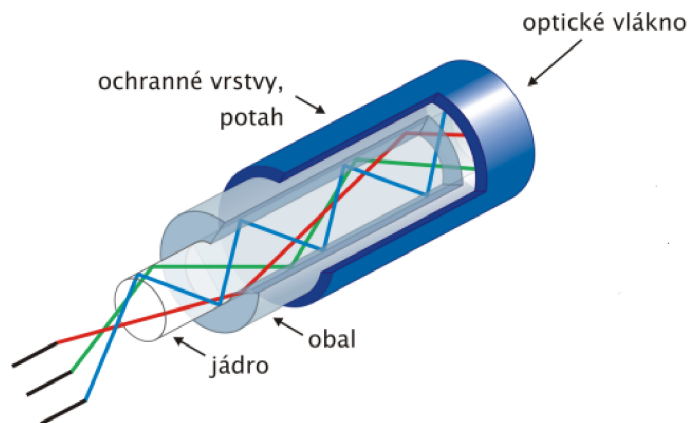
# 1 OPTICKÁ VLÁKNA A PŘENOS SIGNÁLU

## 1.1 Optická vlákna

Běžné optické vlákno se skládá ze tří částí, jak je vidět na Obr. 1.1. Uprostřed vlákna se nachází jádro, které je obklopeno obalem jádra a poslední vrstvou je primární ochrana vlákna, která chrání vlákno od nežádoucích účinků okolního prostředí. Dle konstrukce jádra lze vlákna dělit do tří kategorií:

- jednovidové,
- vícevidové,
- gradientní.

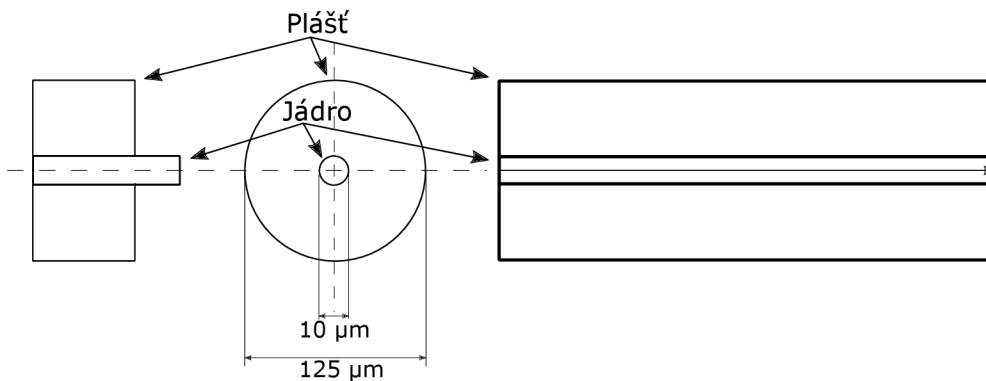
Každý typ má jiné výhody a nevýhody, a proto má každé vlákno svoje typické použití. Podle konstrukce vlákna se také mění numerická apertura, která vyjadřuje schopnost navázat do jádra optický výkon ze svého okolí. Maximální hodnota je 1, což odpovídá úhlu  $90^\circ$ , ale jedná se pouze o teoretickou hodnotu.



Obr. 1.1: Nákres složení optického vlákna[8].

### 1.1.1 Jednovidové vlákno

Jednovidové vlákna jsou používána pro přenosy dat na dlouhé vzdálenosti (mezi městy, státy, kontinenty). Jednovidové vlákno vykazuje nejlepší parametry přenosové cesty, a protože vedou pouze jeden vid, nevyskytuje se u něj vidová disperze. Jednovidové vlákno na Obr. 1.2 má mnohonásobně menší jádro než vlákna vícevidová a gradientní. Typicky se jedná o hodnotu do  $10\ \mu\text{m}$  a numerickou aperturu v rozmezí 0,08–0,15, což způsobuje problémy s navázáním optického výkonu do jádra.



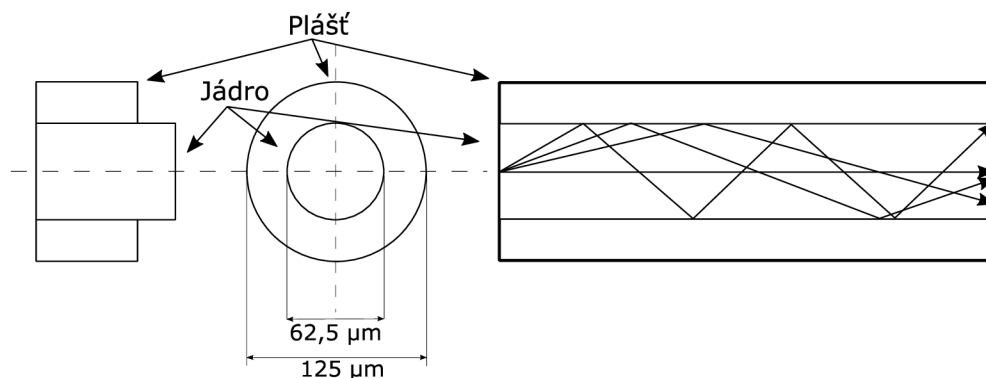
Obr. 1.2: Nákres jednovidového optického vlákna.

### 1.1.2 Vícevidová vlákna

Vícevidová vlákna se dělá do dvou kategorií. Vlákna se skokovou změnou indexu lomu a gradientní změnou indexu lomu.

#### 1. Vlákna se skokovou změnou indexu lomu

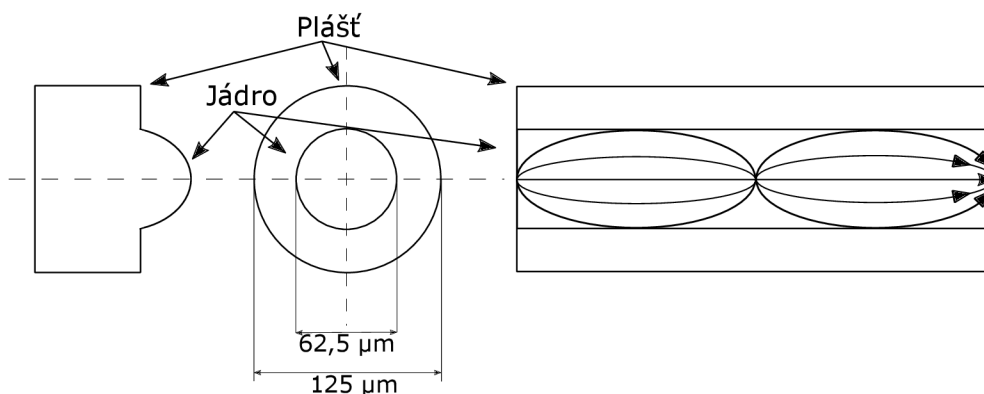
Vícevidová vlákna se skokovou změnou indexu lomu jsou používána pro přenosy na krátké vzdálenosti (typicky pro přenos uvnitř areálů nebo budov). V tomto typu vlákna jsou paprsky vedeny podél jádra za pomoci totálního odrazu Obr. 1.3. Výhodou vícevidových vláken je, jak nižší výrobní cena, tak i nižší požadavky na použitou elektroniku. Například jako světelné zdroje lze použít místo přesného laseru u jednovidových, LED diody nebo laserové diody. Vícevidová vlákna mají také větší numerickou aperturu a tudíž jsou vlastnostmi vhodnější ke spojování, jak kabel na kabel, tak i k připojování ke zdrojům a jiným zařízením. Nevýhodou je vznikající vidová disperze, což omezuje šířku přenášeného pásma. Speciální případem vícevidových vláken jsou gradientní optická vlákna.



Obr. 1.3: Nákres vícevidového optického vlákna.

## 2. Vlákná s gradientní změnou indexu lomu

Gradientní vlákna jsou speciálně upravená tak, aby se index lomu zvětšoval, čím je vzdálenost k ose vlákna menší na Obr. 1.4. Vlákno se skládá z několika tisíc vrstev s různým indexem lomu. Výhodou je výrazné snížení vidové disperze, protože jednotlivé vidy přichází přibližně ve stejném čase na konec vlákna.



Obr. 1.4: Nákres gradientního optického vlákna.

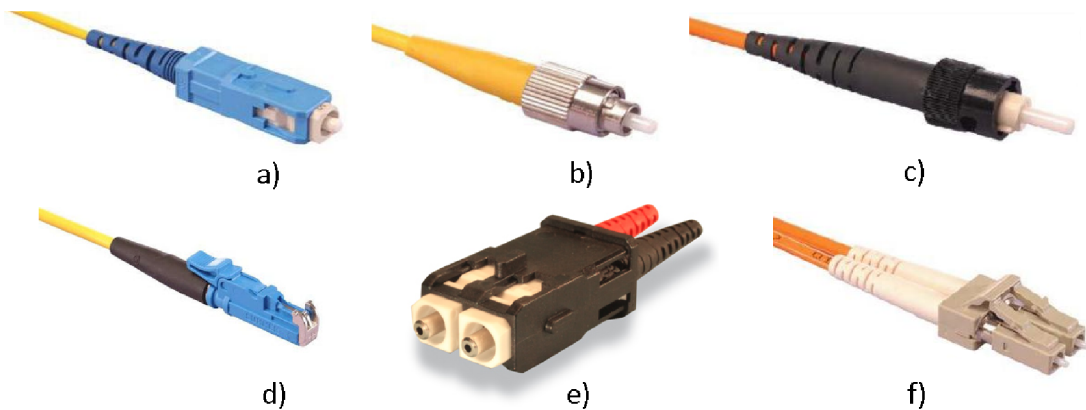
## 1.2 Konektory

Pro připojování a spojování optických kabelů se používají speciální optické konektory. Liší se podle způsobů připojení a podle velikosti ferrule, což je váleček uprostřed kterého se nachází samotné vlákno. Na přesnosti ferrule závisí parametry celého konektoru.

1. SC konektor na Obr. 1.5 a) se používá pro jednovláková i vícevláková vlákna. Nejčastěji používaný konektor v LAN sítích. SC je simplexní, avšak později se objevily i duplexní varianty, spojením dvou konektorů, jako SC-RJ. Velikost ferrule je 2,5 mm.
2. FC konektor na Obr. 1.5 b) se používá pro jednovláková vlákna. Používaný býval spíše v 90. letech. Postupem času byl vytlačován lepšími konektory. Pro uchycení konektoru je využíváno závitů. Velikost ferrule je také 2,5 mm.
3. ST konektor na Obr. 1.5 c) se používá u vícevlákových vláken a bývá také používán v LAN sítích. Pro uchycení využívá bajonetu. Průměr ferrule je opět 2,5 mm.
4. E-2000 na Obr. 1.5 d) je konektor vzhledem podobný konektoru SC, ale má menší ferruli (1,5 mm), zároveň také obsahuje krytku, která se při vytažení zaklopí a chrání tak ferruli proti prachu a poškrábání. Jeho duplexní varianta zabírá stejný prostor, jako konektor RJ-45



5. SC-RJ konektor na Obr. 1.5 e) je vlastně SC konektor upravený pro duplexní komunikaci. Zabírá stejně místa jako RJ-45 konektor.
6. LC konektor na Obr. 1.5 f) se stává jedním z nejpoužívanějších konektorů i díky podpoře společnosti Cisco. Má poloviční velikost oproti SC konektoru, takže do SC spojky se vleze duplexní varianta LC. Velikost fermule je pouze 1,25 mm. Existuje samozřejmě řada dalších konektorů. Jejich popis je však nad rámec této práce.



Obr. 1.5: Přehled nejpoužívanějších konektorů v optických sítích [14].

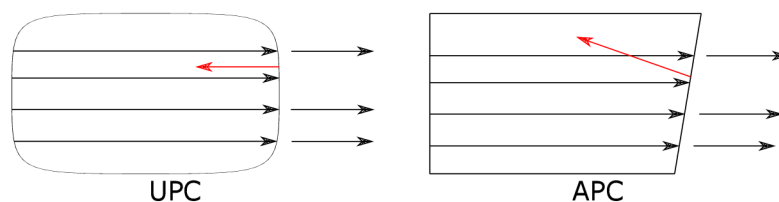
Fermule optických konektorů jsou dále děleny podle způsobů broušení. Způsoby broušení jsou v podstatě dva a to UPC (Ultra Physical Contact) a APC (Angled Physical Contact) viz Obr. 1.6. Podle typu broušení fermule se mění odrazové vlastnosti konektorů. Uváděným parametrem kvality je návratová ztráta, která se udává v záporných hodnotách dB [2]. Čím vyšší hodnota, tím lépe.

#### 1. Broušení UPC

U broušení typu UPC se fermule brousí do roviny. U většiny konektorů je tento typ broušení častější. Tyto konektory bývají modré a podle standardů mají mít návratovou ztrátu -50 dB nebo vyšší [2].

#### 2. Broušení APC

U Broušení APC se fermule brousí pod úhlem 8°. Toto broušení bývá až na výjimky používáno u jednovlákových vláken. Typicky jsou takto broušeny konektory E-2000. Jednovlákové konektory APC mají typicky zelenou barvu a podle standardů mají mít návratovou ztrátu -60 dB nebo vyšší [2].



Obr. 1.6: Broušení fermulí optických konektorů [2].

## 1.3 Vlastnosti optických vláken

Mezi základní vlastnosti optických vláken patří:

- Útlum, což je rozdíl síly signálu na začátku vedení, oproti síle signálu na konci vedení. U křemenných vláken se útlum pohybuje řádově v desetinách dB/km a u plastových vláken se pohybuje mezi 50 až 100 dB/km. Útlum je typicky způsobován materiálovou absorpcí, což je interakce fotonů se strukturou atomů optického vlákna. Dále materiálovým rozptylem nebo ohybem, ať už mikroskopickým nebo makroskopickým a také při spojování na konektorech.
- Disperze. Nejvýraznější disperze jsou vidová a chromatická disperze. Vidová disperze je způsobená lomem světla. Při každém lomu paprsku dojde k nepatrné odchylce dráhy jednotlivých vlnových délek a tím i ke zpoždování určitých délek. Chromatická disperze je způsobena rozdílným indexem lomu pro jednotlivé vlnové délky a tudíž se různé vlnové délky pohybují různou rychlostí.
- Numerická apertura je schopnost navázat optický výkon ze svého okolí do jádra optického vlákna, jak je zmíněno výše. V praxi to například znamená, že světelné zdroje mají mnohem vyšší vyzařovací úhel, než je numerická apertura vlákna. Vlákno nedokáže navázat všechny optický výkon a dochází ke ztrátám. Tyto ztráty se však nepočítají do přenosových ztrát.
- Okna[15]. Útlumová charakteristika optických křemenných vláken zobrazuje několik vrcholů, mezi kterými jsou úseky s nižším útlumem, kterým se říká okna. Pro jednovidové vlákno jsou tato okna definována takto:
  - O-band (Original) 1260–1360 nm,
  - E-band (Extended) 1360–1460 nm,
  - S-band (Short wavelength) 1460–1530 nm,
  - C-band (Conventional) 1530–1565 nm,
  - L-band (Long wavelength) 1565–1625 nm,
  - U-band (Ultra) nad 1625 nm.

## 2 FBG(VLÁKNOVÉ BRAGGOVY MŘÍŽKY)

### 2.1 Braggovy mřížky

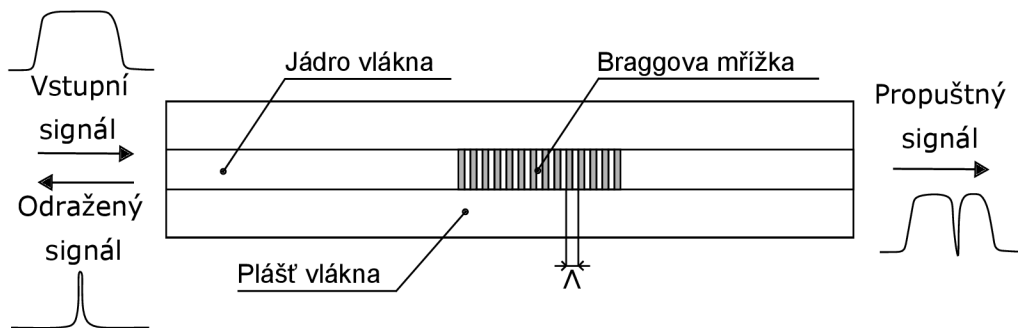
Braggovy mřížky jsou tvořeny periodickými změnami indexu lomu v jádře optického vlákna podél jeho osy, jak je vidět na Obr. 2.1. Mřížky jsou do jader optických kabelů zapisovány pomocí UV laserů. Změny indexu lomu ve vlákne vytvářejí zrcadla, která odrážejí pouze danou vlnovou délku a zbytek spektra propouštějí. Braggova mřížka se nevyrobí na celém vlákne, ale pouze na malé části (1 mm, 5 mm).

Nejdůležitější veličinou v Braggovy vláknové mřížky je Braggova vlnová délka. Na základě Braggovy vlnové délky lze určit vlnovou délku světla, které bude mřížkou odraženo. Hlavním využitím jsou optické senzory, popřípadě optické filtry.

Závislost mezi Braggovou vlnovou délkou a periodou mřížky udává vztah:

$$\lambda_{\text{Bragg}} = \frac{2n_{\text{eff}}\Lambda}{N}, \quad (2.1)$$

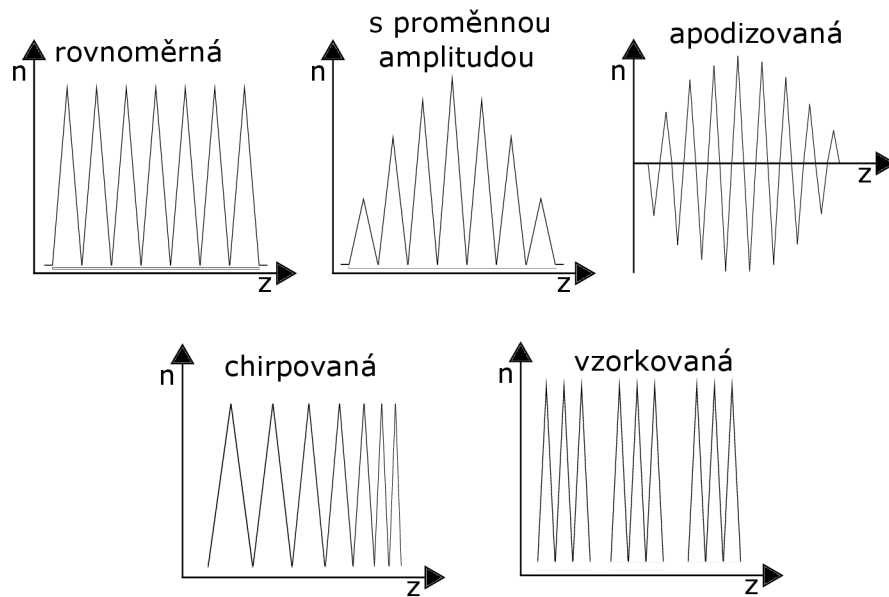
kde  $\lambda_{\text{Bragg}}$  ..... Braggova vlnová délka,  
 $N$  ..... řád periody mřížky,  
 $\Lambda$  ..... perioda mřížky,  
 $n_{\text{eff}}$  ..... efektivní vidový reflex.



Obr. 2.1: Nákres Braggovy vláknové mřížky.

Podle amplitudy a periody viz Obr.2.2 můžeme rozlišit mřížky na:

- rovnoměrné
- apodizované
- chirpované
- s proměnnou amplitudou
- vzorkované



Obr. 2.2: Typy mřížek.

## 2.2 Fotosenzitivita

Základní vlastností pro možnost výroby Braggových mřížek je fotosenzitivita. Právě díky fotozenzitivitě je možné pomocí UV laserů zapisovat změny v indexu lomu do jader optických vláken. Původně se předpokládalo, že je pro fotosenzitivitu potřeba vlákno z křemičitého skla a germánium dopované jádra. Dnes již víme, že lze vyrobit fotocitlivé vlákno, které germánium neobsahuje. I přes to je dodnes germánium dopované jádro nejdůležitější při výrobě vláknových mřížek. Další možností je jádro dopované europiem nebo ceriem, jejich fotocitlivost však nedosahuje fotocitlivosti germánium dopovaných jader. Při osvitu pouze křemičitého skla nedochází k zapsání mřížky.

Existuje také několik způsobů, jak je možné zvýšit fotosenzitivitu vláken. Jedná se o možnost zvýšit fotocitlivost zvyšováním obsahu germania v jádru. Fotocitlivost u jader je závislá na chybách při vazbách germania, tím pádem při zvýšení koncentrace germania, přibývá vazeb a tím i chyb, a jádro se tak stává více fotocitlivým.

Dalším způsobem je takzvaná hydrogenizace, při níž dochází k difuzi molekul vodíku do jádra vlákna. To se provádí za pomoci tlakové komory, ve které je vlákno uloženo na několik dní až týdnů. Komora se napustí plynným vodíkem a při teplotách 20-75 °C a při tlaku okolo 150 atm, dochází ke zmíněné difuzi vodíku do jádra [7].

U žárového žíhání dochází ke stejnému efektu jako u hydrogenizace a to k difuzi molekul vodíku do jádra. Technologický postup spočívá ve vystavení vlákna plamenu z vodíkového hořáku. Ten dosahuje teploty až 1700 °C a při těchto teplotách dochází k rychlé difuzi vodíku do jádra (do 20 minut). No rozdíl od hydrogenizace zůstává

fotosenzitivita stále stejná. U hydrogenizace dochází časem ke zpětně difuzi vodíku ven z vlákna.

Germanium-křemičité vlákno může být současně dopováno dalším prvkem. Nejčastěji používaným prvkem je bór, který dokáže zvýšit fotocitlivost až na čtyřnásobek. Dopace bórem nezvyšuje počet chyb při vazbách, jako je to u dopace germaniem, ale dochází ke změně termomechanických vlastností na rozhraní jádra a pláště. Další možností je dopace vzácnými kovy.

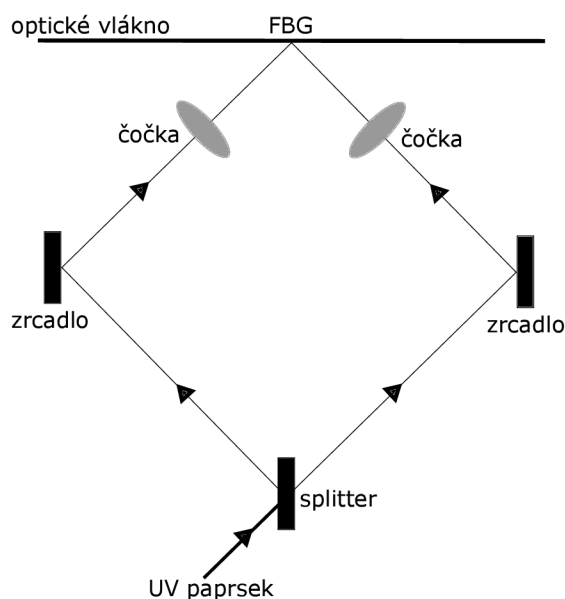
## 2.3 Výroba

### 2.3.1 Vnitřní zapisování

Vnitřní zapisování je historicky nejstarším způsobem zapisování Braggových mřížek do vlákna. První demonstraci vnitřního zapisování provedl kanadský fyzik Kenneth O. Hill v roce 1978. Při této metodě je potřeba jednofrekvenční laser, který má vlnovou délku v oblasti UV. Toto záření způsobuje, že fotocitlivé optické vlákno změní index lomu. Nevýhodou tohoto způsobu výroby je omezená vlnová délka mřížky, kterou udává vlnová délka argon-iontového laseru (514,5 a 480 nm) [5].

### 2.3.2 Interferometrická metoda

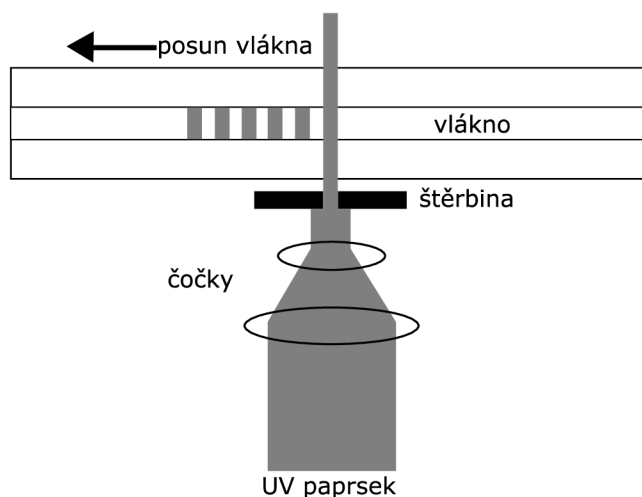
U interferometrické metody je využíváno paprsku vysoce koherentního, kontinuálního laseru, který je splittrem rozdělen na dva stejně výkonné svazky viz Obr. 2.3. Pomocí soustavy optických UV zrcadel je následně opět spojen v prostoru vlákna. Při opětovném spojení paprsků dochází k interferenci, která vytváří obrazec střídajících se interferenčních minim a maxim. Interferometrická metoda se používá pro zapisování krátkých mřížek jedním impulsem. Tato metoda je náchylná na přesnost. Její výsledek ovlivňují například vibrace použitých zařízení, čímž dochází ke zkreslení vzdálenosti optické trasy, teplotní výkyvy nebo vzdušné turbulence [7].



Obr. 2.3: Interferometrická metoda.

### 2.3.3 Výroba bod po bodu

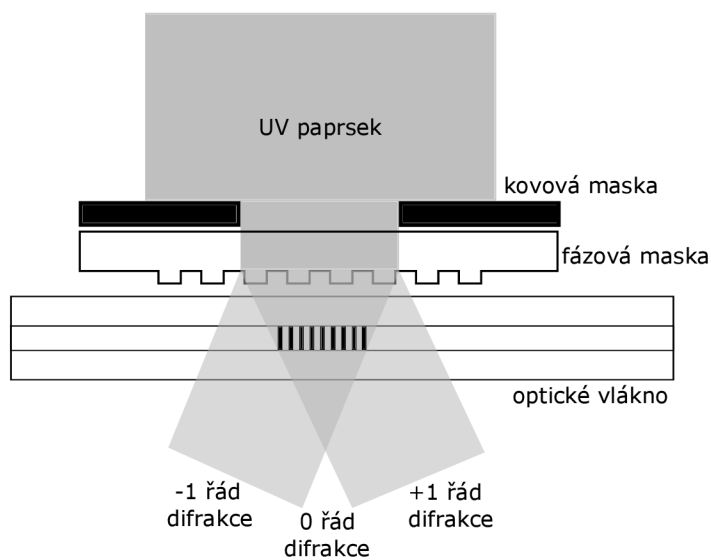
U této výroby je zapotřebí velmi výkonný pulzní laser, jehož paprsek je soustavou čoček upraven pro průchod úzkou štěrbinou na optické vlákno. Šířka štěrbinu odpovídá rozměru jedné oblasti se změněným indexem lomu viz Obr. 2.4. Laser je staticky namířen na vlákno, zatímco vlákno je umístěno na motorizovaném systému, který s vláknem pohybuje. Tudiž ovlivňujeme-li rychlost posunu nebo kmitočet laseru, můžeme přímo měnit periodu mřížky, popřípadě vyrábět chirpované mřížky, tj. s proměnnou periodou [11].



Obr. 2.4: Metoda bod po bodu.

### 2.3.4 Pomocí fázové masky

Tato metoda spočívá v průchodu koherentního UV záření přes průhlednou desku, na které je vytvořena reliéfní optická maska. Světlo procházející touto deskou interferuje a vytváří zóny s minimální a maximální intenzitou viz Obr. 2.5. Optické vlákno pod fázovou maskou je poté exponováno vzniklými maximy. Nevýhodou této metody je nutnost vytvářet zvláštní masku pro každou změnu Braggovy vlnové délky mřížky [18].

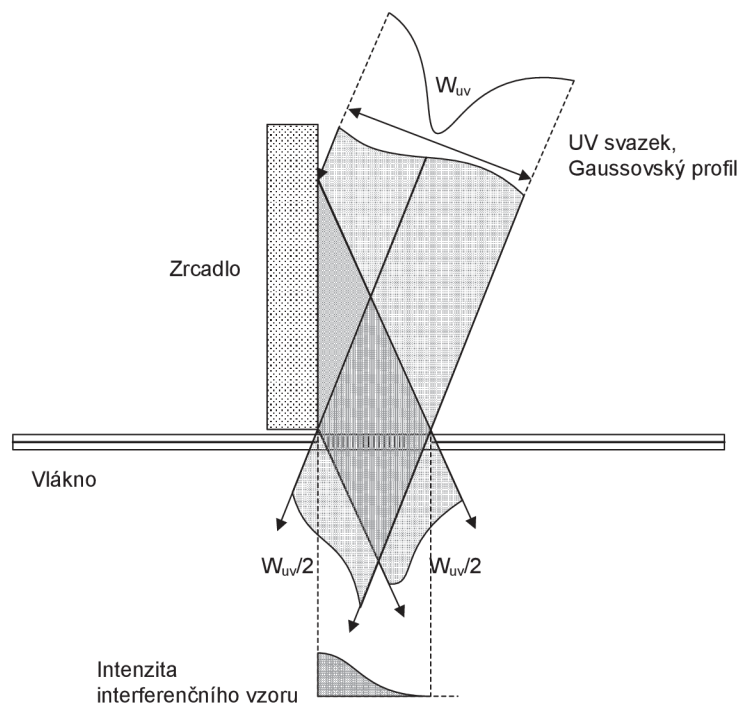


Obr. 2.5: Metoda fázové masky.

### 2.3.5 Ostatní metody výroby

Ostatní metody více méně odpovídají kombinaci výše zmíněných metod, nebo jejich upravením. Jednou ze známějších technologií je použití fázové masky v interferometrické metodě, kdy se maska použije na rozdělení paprsku do dvou svazků. Poté je možné jednoduše měnit Braggovu vlnovou délku zapisované mřížky pouhým posunutím zrcadel. Výhodou je, že při použití jediné fázové masky, je možné vyrobit několik Braggových mřížek s různou Braggovou vlnovou délkou.

Dalším příkladem je jednoduchý Lloydův interferometr viz Obr. 2.6, kdy je primární svazek UV laseru namířen na zrcadlo pod určitým úhlem. Tím dochází k částečnému odrazu paprsku přes svoji vlastní dráhu a k interferenci dochází tam, kde se paprsky znovu protnou. Nevýhoda této metody je, že kvůli odražené polovině paprsku, dochází k interferenci pouze na polovině šířky původního paprsku laseru.



Obr. 2.6: Lloydův interferometr [7].

## 2.4 Senzory

Senzory založené na Braggových mřížkách jsou v podstatě jednoduché. Působíme-li na optické vlákno s Braggovou mřížkou například teplotou nebo mechanickým namáháním, dochází ke změně vlnové délky odražené zpět, tím můžeme vyhodnotit změny v měřených veličinách. Výhodou těchto senzorů je možnost umístit na jediné vlákno i více, jak deset senzorů. Jsou vhodné do prostředí, kde působí koroze, silné rušení nebo zhoršené klimatické podmínky. V průmyslu se ke zpracování výsledků používají takzvané FBG vyhodnocovací jednotky.

### 2.4.1 Teplotní senzory

Jedná se o pasivní senzory (nepotřebují napájení). Jsou odolné proti elektromagnetickému rušení. Jsou vhodné kvůli své nízké hmotnosti a velikosti, jak pro nalepení na povrch, tak i pro zalití například do betonu. Teplotní sensor lze zapojit jako jediný, nebo jako sériový řetěz senzorů. Jednou z variant je zabudování teplotního senzoru přímo do optického patch kabelu. Vyrábí se v různých provedeních, pro různé možnosti použití viz teplotní senzory vyráběné firmou HBP na Obr. 2.7.



Dostupné varianty teplotních senzorů



Obr. 2.7: Teplotní senzory [6].

### 2.4.2 Senzory mechanického napětí

Mezi senzory mechanické napětí patří například tahové senzory, tlakové senzory nebo takzvané long gage senzory viz Obr.2.8. Long gage senzory měří prodloužení optického vlákna mezi dvěma pevnými body. Optické měřicí vlákno může být dlouhé od několika centimetrů, až po několik metrů. Na okrajích snímače jsou standardní optické konektory pro připojení dalších snímačů, nebo vyhodnocovacího zařízení. Tento druh senzorů se používá pro měření namáhání povrchu materiálu nebo pro sledování stavů konstrukcí (praskliny v pilířích, přehradách, tunelech).



Obr. 2.8: Senzor mechanického napětí [16].

## 3 MĚŘENÍ ÚTLUMU V OPTICKÝCH VLÁKNECH

Pro měření útlumu ve vláknech se používají dva typy metod. Metoda přímá a metoda nepřímá. Základním předpokladem pro měření jsou kvalitní měřicí přístroje a vhodně upravená optická trasa.

### 3.1 Přímá metoda

Základní předpoklad pro měření přímou metodou je, aby na jednom konci vlákna byl zdroj světelného záření a na druhém konci zařízení pro měření optického výkonu. Měření probíhá bez provozu. Pomocí přímé metody lze měřit celkový útlum trasy, tak i poškození vlákna nebo přítomnost makro i mikroohybů. Nevýhodou této metody je, že je nejprve nutné obě zařízení zkalibrovat, poté je rozpojit a následně napojit na oba konce měřené optické trasy.

Měření přímou metodou se může lišit v počtu použitých referenčních kabelů. Toto měření se využívá hlavně pro měření celkového útlumu trasy. Oproti OTDR má výhodu v levnějších zařízeních pro vysílání a detekci záření a měření je i rychlejší.

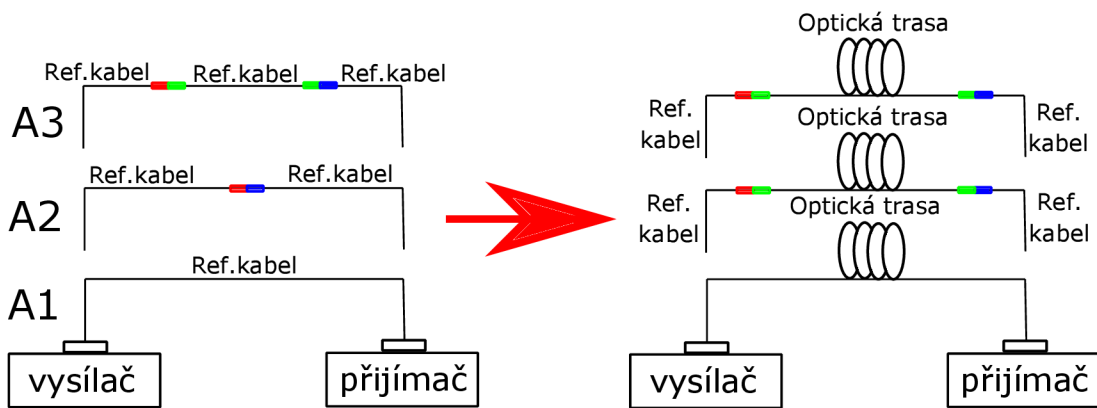
#### 3.1.1 Varianty přímé metody

Jak je uvedeno výše, varianty přímé metody se liší v počtu použitých referenčních kabelů při kalibraci. Vysílací a měřicí přístroj je před začátkem měření nutné zkalibrovat.

U metody A1, jak je vidět na Obr. 3.1 se pro kalibraci používá jeden referenční kabel, kterým se oba přístroje propojí. Pro měření se referenční kabel odpojí a místo něj se připojí optická trasa.

Při vyžití metody A2 viz Obr. 3.1 se u kalibrace ke zdroji připojí jeden referenční kabel, k přijímači druhý referenční kabel a tyto kabely se na závěr spojí. Využívá tedy dvou referenčních kabelů. Při samotném měření se referenční kabely rozpojí a mezi ně je připojena měřená trasa. Tato metoda však není příliš doporučována, protože při kalibraci se mezi referenčními kabely nachází pouze jeden spoj, zatímco po připojení optické trasy se zde nacházejí dva spoje.

Poslední metodou je metoda A3 Obr. 3.1, při které se využívá tři referenčních kabelů. Tak jako u metody A2 je při kalibraci jeden kabel připojen ke zdroji a jeden k přijímači, ale na rozdíl od A2 je mezi nimi připojen třetí kabel. Pro měření se pak tento prostřední kabel nahradí měřenou trasou.



Obr. 3.1: Schéma měřících variant přímé metody.

Přesnost naměřených výsledků závisí hlavně na kvalitě použitých přístrojů. Kvalitu naměřených výsledků však mohou nepříznivě ovlivnit i špatně očištěné, popřípadě poškrábané konektory.

### 3.2 Metoda OTDR

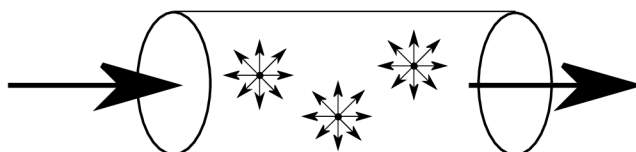
OTDR je metoda nepřímého měření vlastností optického vlákna. Pro měření se používá zařízení zvané reflektometr, které je optický vysílač a zároveň i přijímač, tudíž měřená trasa je analyzována přímo v místě měření. Většina moderních přístrojů dokonce umí automaticky analyzovat naměřená data. OTDR měří optický výkon rozptýlený Rayleighovým rozptylem při průchodu vláknem a Fresnelovy odrazy ve spojích nebo na konci vlákna. Tato metoda se nepoužívá pouze na určení útlumu trasy. Na základě naměřených hodnot jsme schopni najít na optické trase konektory, špatné sváry popřípadě přerušování vlákna. Podle reflektogramu jsme schopni určit celý profil trasy, její délku atd..



Obr. 3.2: Přenosný reflektometr EXFO MaxTester 720C[4].

### 3.2.1 Rayleighův rozptyl

Rayleighův rozptyl vzniká při průchodu paprsku vláknem. Vláknem obsahuje mikroskopické částice zvané dopanty, které paprsek rozptýlí do všech směrů viz Obr. 3.3. Tento rozptyl je hlavní příčinou útlumu ve vlákně. Čím větší je koncentrace dopantů ve vlákně tím větší útlum vláknem má. Pro snížení útlumu vzniklého Rayleighovým rozptylem je možné používat světlo větší vlnové délky. Při větší vlnové délce útlum klesá. Například při použití 1550 nm je útlum  $\pm 2,5$  dB/km, zatímco při použití světla s vlnovou délkou 850 nm se útlum pohybuje okolo 5 dB/km. Samozřejmě záleží také na typu vlákna.

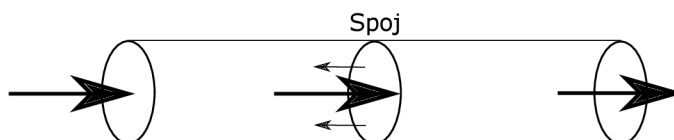


Obr. 3.3: Schematické znázornění Rayleighova rozptylu.

Rayleighova rozptylu se využívá i při fázové OTDR. Přijmutím zpět odraženého signálu a na základě znalosti odeslaného pulzu, lze detekovat vlastnosti vlákna po celé jeho trase a tím i případné změny způsobené vlivem okolí. To znamená, že v případě stále stejného naměru můžeme konstatovat, že se nedějí žádné kritické změny. V případě změny amplitudy, můžeme určit, jak to že dochází k nějaké změně, tak i v kterém místě se tato změna odehrává.

### 3.2.2 Fresnelův odraz

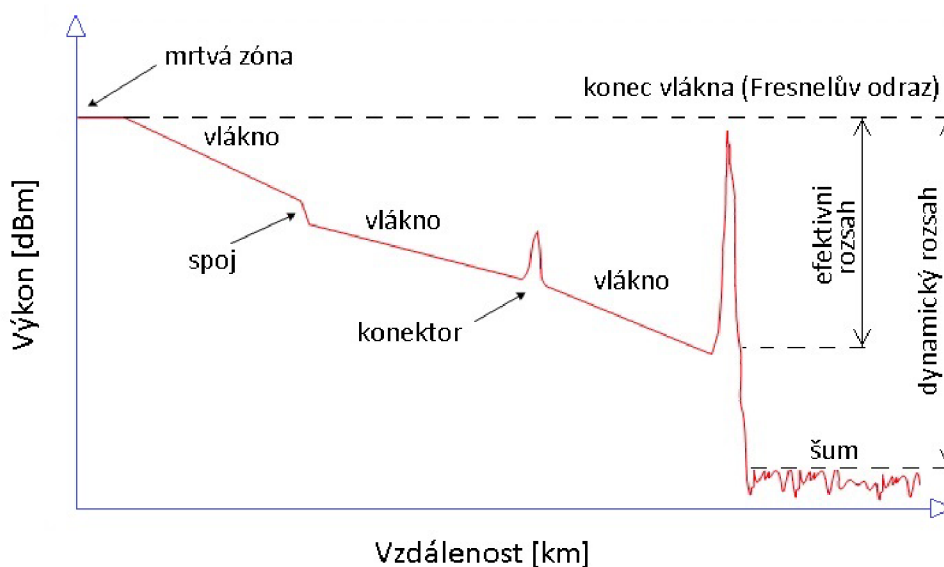
Při průchodu paprsku optickým vláknem, dochází při průchodu dvěma prostředími, k odrazu části záření zpět ke zdroji, jak je vidět na Obr. 3.4. Těmto odrazům se říká Fresnelovy odrazy. V optické trase může být takový odraz způsobený například špatným svárem vlákna, na konci vlákna, ve zlomech a také při průchodu konektory. Zbytek světla pokračuje vláknem dále.



Obr. 3.4: Schematické znázornění Fresnelova odrazu.

### 3.2.3 Dynamický rozsah

Dynamický rozsah určuje jak dlouhá vlákna je možné změřit. Určuje rozdíl mezi úrovní signálu a šumem v dB. Dynamický rozsah musí být dostatečně velký, aby signál došel až na konec vlákna. Dále se zde objevuje pojem efektivní rozsah, který udává hodnotu v dB, do které lze měřit nehomogenity na reflektogramu viz Obr 3.5. Velikost dynamického rozsahu závisí na síle zdroje a na citlivosti senzoru. V případě silného zdroje a citlivého senzoru je dynamický rozsah dostatečně vysoký. Při kombinaci slabého zdroje a průměrného snímače bude dynamický rozsah nízký.



Obr. 3.5: Příklad reflektogramu OTDR.

### 3.2.4 Mrtvá zóna

Mrtvá zóna vzniká na základě Fresnelových odrazů, které svým výkonem zastíní nižší výkony Rayleighova rozptylu. Největší mrtvá zóna vzniká v místě připojení přístroje OTDR, respektive jeho předřadného vlákna. Mrtvé zóny jsou tak dlouhé, jak dlouhý byl vyslaný pulz (o něco delší kvůli obnovovacímu času senzoru). Čím je senzor kvalitnější, tím rychlejší má obnovovací dobu a tím kratší jsou mrtvé zóny. Mrtvé zóny tedy můžeme zkrátit tak, že zvolíme co nejmenší šířku impulzu. Tím ale zase snižujeme dynamický rozsah. Je tedy nutné rozhodnout, jestli je důležitější vidět více detailů na trase, nebo měřit dlouhou trasu s méně detaily. Pro odstranění největší mrtvé zóny na začátku se vyžívá dostatečně dlouhé předřadné vlákno, které mrtvá zóna zakryje. Na měření to však nemá vliv, protože měřeny jsou parametry trasy a ne parametry předřadného vlákna.

### 3.2.5 Linearita

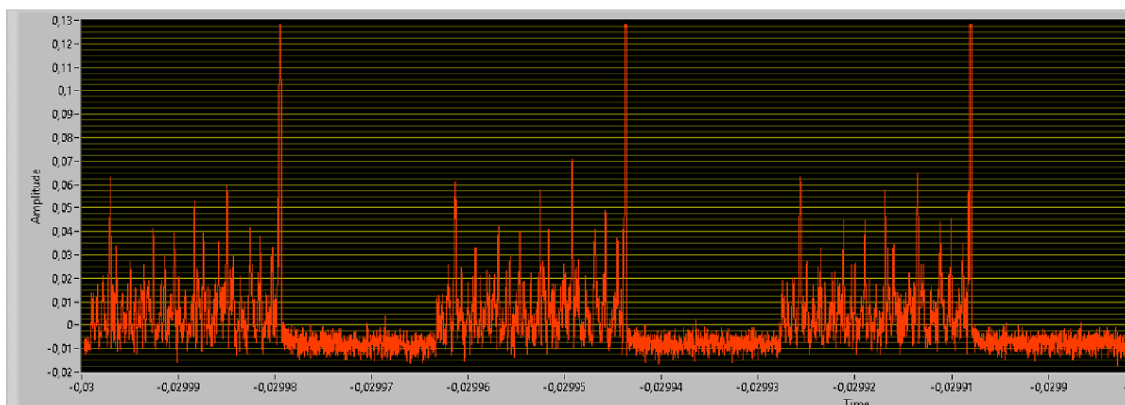
Pro kvalitní měření je nutné mít přístroj, který dokáže co nejlépe lineárně měřit. Je tedy nutné, aby přístroj měřil v celém svém dynamickém rozsahu co nejpřesněji a s co nejmenší odchylkou.

### 3.2.6 Vlnová délka

Optická vlákna se typicky testují pouze na třech vlnových délkách. Jednovidová vlákna vlnových délkách 1300 a 1550 nm a mnohovidová vlákna na 850 a 1300 nm. Udávána je vlnová délka a takzvaná šířka čáry. Šířka čáry je okolí vlnové délky, se kterou přístroj OTDR pracuje. Například pro vlnovou délku 1550 nm a šířku čáry 10 nm víme, že bude přístroj pracovat na rozsahu 1545 až 1555 nm. Čím je tato šířka čáry menší, tím je měřicí přístroj přesnější. Útlum vlákna je závislý na vlnové délce, proto je nezbytné měřit útlum vlákna stejnou vlnovou délkou, jaká následně bude použita v praxi.

### 3.2.7 Fázová OTDR

Fázová OTDR byla vyvinuta hlavně kvůli dynamické detekci a přesnému polohování [17]. Za pomoci Rayleighových rozptylů je fázová OTDR citlivá na vibrace nebo tlak. Z toho důvodu může být použita jako bezpečnostní prvek pro sledování vibrací způsobených lidmi nebo auty, nebo také pro detekování seismické aktivity. Pro fázovou OTDR je nutné použít vysoce koherentní světlo a místo vyhodnocování útlumu jsou sledovány fázové změny. Fázové změny lze vyhodnocovat na základě změny amplitudy odraženého signálu.



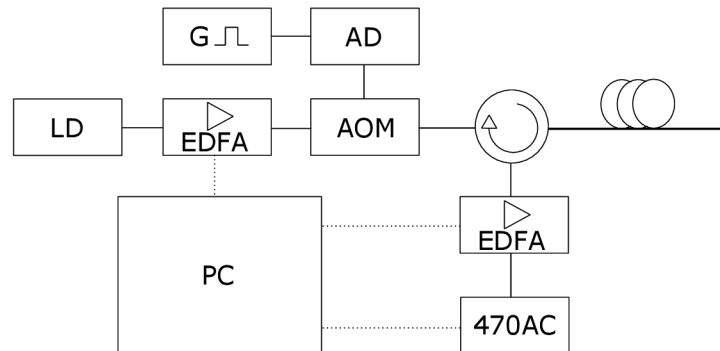
Obr. 3.6: Příklad odraženého signálu fázového OTDR.

Princip této metody spočívá v tom, že pokud dochází poblíž vlákna například k otřesům, dochází ke změně vnitřní struktury jádra, následkem pohybů mikročástic (dopantů), což mění fázi zpět odraženého světla. Tudíž podle změn fáze v čase jsme schopni určit v jaké části vlákna dochází k otřesům. Tato metoda dosahuje velice dobré přesnosti i na dlouhé vzdálenosti, je však nutné použití kvalitních vysílacích i přijímacích přístrojů. Příklad přijatého signálu z fázového OTDR je na Obr. 3.6.

Na Obr. 3.6 jsou vidět tři periody změřeného signálu. Pro detekování vibrací je nutné tento signál rozdělit na jednotlivé periody. Následně je nutné zjistit změny ve všech bodech signálu. Pokud pozorujeme v určitém bodě nárůst amplitudy odraženého signálu, pak v tomto místě dochází k působení na vlákno. Přijaté signály je také nutné vhodně upravovat, například průměrováním nebo různými filtry. Na základě znalosti délky vlákna a parametrů vyslaného pulzu jsme schopni zjistit přesné místo změn.

## 4 MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ

Jako měřicí zařízení slouží počítač vybavený čtyřjádrovým procesorem Intel Core i5-6400 s taktom 2.7 GHz, integrovanou grafickou kartou Intel HD Graphic 530, operační pamětí 16 GB, dvěma optickými zesilovači EDFA a Analog Discovery 2. Dále obsahuje vysokorychlostní SSD paměť rozhraní M.2 (rychlost čtení/zápisu až 3 000/2 400 MB/s) o velikosti 500 GB a ukládací HDD o velikosti 4 TB. Celý tento systém běží na 64bitovém operačním systému Windows 10.

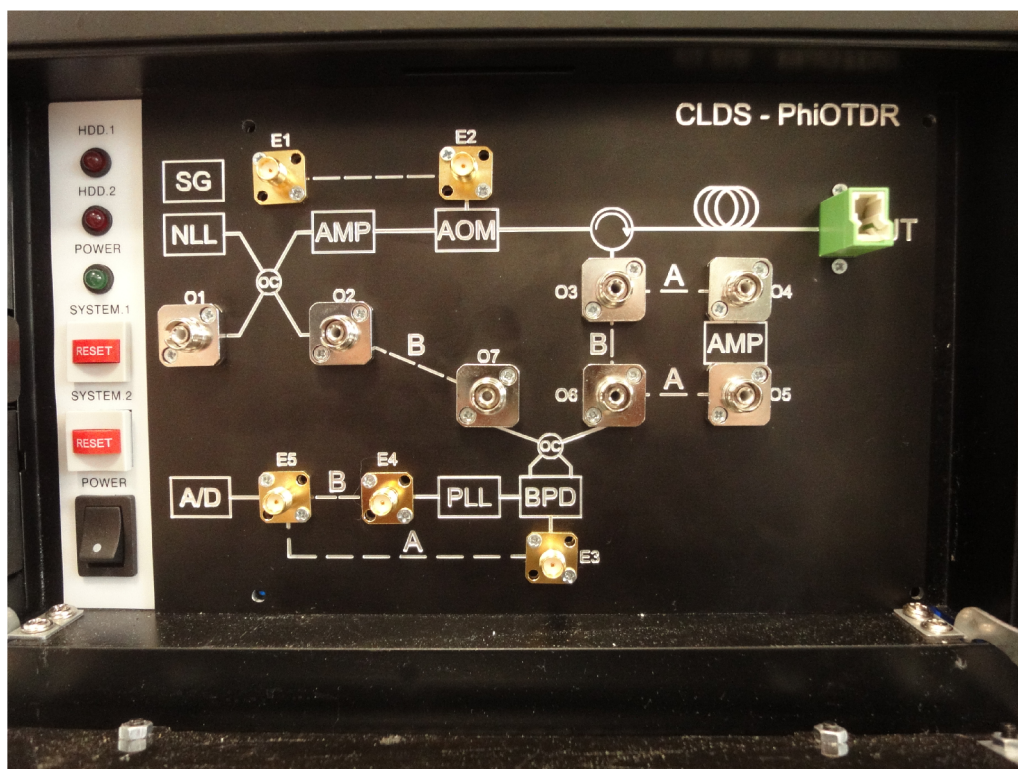


Obr. 4.1: Schema sensorického systému založeného na fázové OTDR.

Na schématu na Obr.4.1 je naznačeno složení sensorického systému. Systém začíná Laserovou Diodou, což je vlastně zdroj úzkopásmového záření, který je následně zesílen na požadovanou hodnotu zesilovačem EDFA. Do bloku Akusticko-Optické Modulace je přiváděn signál z generátoru, který upraví optické záření na pulzy nutné pro měření. Pulzy jsou následně předávány do optického cirkulátoru, který posílá pulzy do optického vlákna měřené trasy a z tohoto vlákna je následně zpětně odražený signál odeslán do druhého zesilovače EDFA. Tento zesilovač zesílí signál z optické trasy, který je sám o sobě dost slabý. Ze zesilovače signál putuje na detektor, který přemění optický signál na elektrický k následnému zpracování pomocí počítače.

Počítač je připojený na detektor pro vyhodnocování výsledků, dále je připojený na oba optické zesilovače EDFA, kvůli nastavování jejich parametrů. Následná představa je taková, že by i Laser a Generátor byly připojeny. Celý systém by bylo pak možné ovládat pomocí jednoho programu. Jak je vidět na Obr.4.2, je čelní panel systému vybaven konektory pro připojení externích zařízení v případě, kdy by byla potřeba jiné přístroje než ty, které budou integrovány ve skříni sensorického systému viz Obr. 4.3.





Obr. 4.2: Čelní panel senzorkého systému.



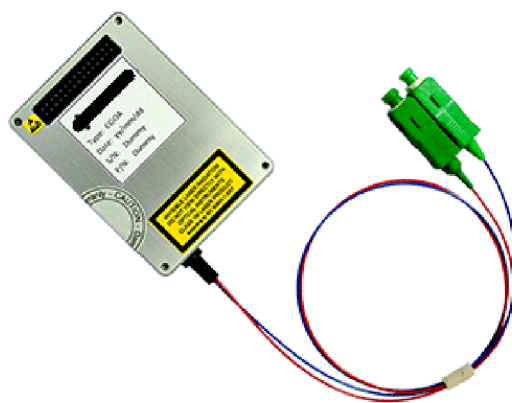
Obr. 4.3: Celá skříň senzorkého systému.

## 4.1 Optické zesilovače EDFA

GOA-Modul nebo-li MSA EDFA je samostatný optický zesilovač, vhodný pro integraci do vlastní skříně viz Obr. 4.4. Tento modul je vyroben pro zesilování vlnové délky C-band (1530 - 1565 nm) s vysokým výstupním optickým výkonem.

Modul zesilovače se skládá z laserových diod, vlnových multiplexorů, erbiem dopovaného vlákna, optických splitterů a mikroprocesoru vhodného pro samostatnou činnost. Komunikace s tímto zařízením probíhá pomocí sériové linky RS-232.

Měřicí senzorický systém obsahuje dva tyto optické zesilovače EDFA 1 a EDFA 2. Každý je od jiného výrobce a tak se liší příkazy, pomocí kterých jsou nastavovány. Dále se také liší doby od přijetí signálu a odeslání odpovědi. EDFA 1 dokáže komunikovat velmi rychle EDFA 2 má dlouhou odezvu a je nutné počítat se spožděním. Toto může být způsobeno rokem výroby zařízení, kde EDFA 1 je mnoho novější než EDFA 2.



Obr. 4.4: BKtel EDFA.

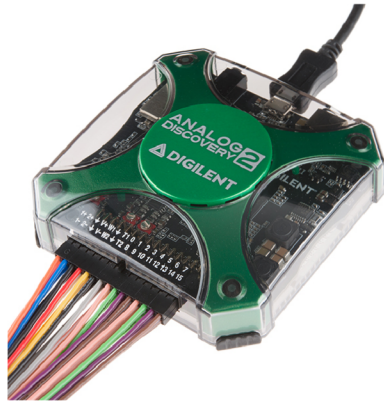
## 4.2 Analog Discovery 2

Digilent Analog Discovery 2 [3] je multifunkční nástroj, který uživatelům umožňuje měřit, vizualizovat, vytvářet, zaznamenávat a řídit smíšené signální obvody všech druhů. Nízkonákladový Analog Discovery 2, jak je vidět na Obr. 4.5 je dostatečně malý, aby se vešel do kapsy, ale byl dostatečně výkonný na to, aby nahradil několik laboratorních přístrojů a poskytl studentům, nadšencům i profesionálům svobodu pracovat s analogovými a digitálními obvody prakticky v jakémkoli prostředí.

Analogové a digitální vstupy a výstupy mohou být připojeny k obvodům pomocí jednoduchých drátových sond. Analog Discovery 2 může být konfigurován tak, aby fungoval jako jeden z několika tradičních nástrojů, mezi něž patří:

- 2-kanálový osciloskop (1 M $\Omega$ ,  $\pm$  25 V, 14-bitů, 100 MS/s)

- 2-kanálový generátor ( $\pm 5$  V, 14-bitů, 100 MS/s)
- 1-kanálový voltmeter (AC, DC,  $\pm 25$  V)
- dva programovatelné výkonové zdroje
- spektrální analyzátor
- analyzátor digitálních sběrnic (SPI, I<sup>2</sup>C, UART)
- 16-kanálový digitální logický analyzátor



Obr. 4.5: Digilent Analog Discovery 2 [3].

## 5 LABVIEW

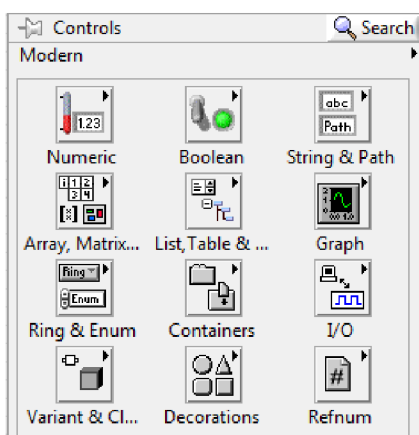
LabVIEW (Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench) je programovací a vývojové prostředí vyvinuté firmou National Instruments. V LabVIEW se používá takzvaný grafický programovací jazyk (G-language), pomocí kterého se vytvářejí testovací, měřicí a řídicí aplikace. V tomto programovacím jazyce se používají bloky, které se mezi sebou propojují a postupně tak vzniká daná aplikace. Programátor se tudíž nemusí učit žádný programovací jazyk, pouze stačí pochopit funkci jednotlivých bloků a tyto bloky na sebe správně navázat.

Programy v LabVIEW se tvoří v takzvaných virtual instruments (VIs) [12]. Tyto soubory mají příponu .vi a obsahují dvě části programu. První částí je čelní panel, se kterým přichází do styku uživatel a druhou částí je blokový diagram, který je určený pro programátora. Na čelním panelu je obsaženo vše, co uživatel potřebuje k ovládnání programu a v blokovém diagramu je samotné programové řešení dané aplikace.

### 5.1 Čelní panel (Front panel)

Na čelní panel se vkládají ovladače z palety Controls viz Obr. 5.1, která se dá vyvolat pravím tlačítkem myši. Všechny zde umístěné prvky se dají vložit na čelní panel v několika variantách vzhledu (Modern, Silver, Classic).

Ze záložky Numeric lze na čelní panel vkládat různé numerické i grafické indikátory. V Boolean jsou umístěny tlačítka a signalizační diody pro ovládnání dvoustavových možností true / false. String & Path slouží k vkládání textových polí. Graph slouží pro vkládání diagramů, grafů, 3D grafů atd.. Dále je možné vkládat dekorace, seznamy, ovladače vstupů a výstupů, matice, pole s daty, popřípadě panely s obrázky. Všechny tyto prvky lze vkládat v několika různých grafických provedeních.



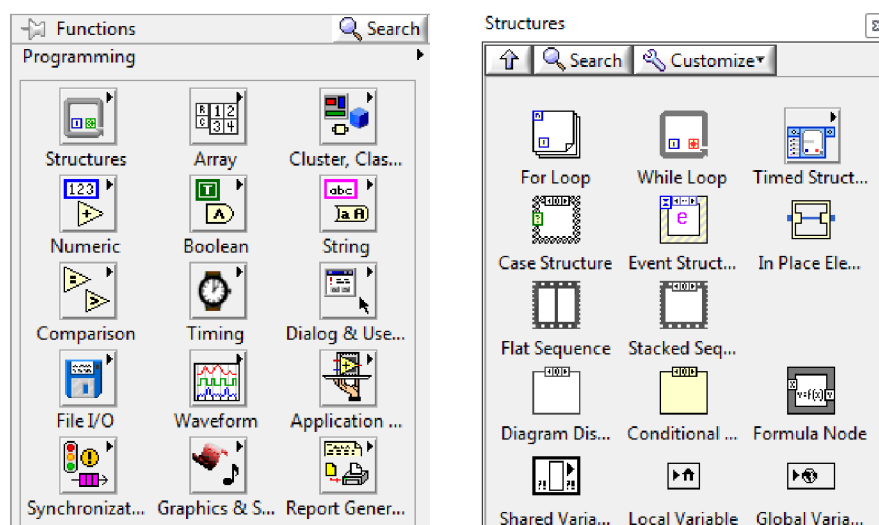
Obr. 5.1: Ukázka palety Controls.

## 5.2 Blokový diagram (Block diagram)

Nabídka se vyvolává stejně jako u čelního panelu. U každého bloku se dají jako vstupy použít konstanty a ovladače. Jako výstupy lze používat numerické, grafické nebo textové indikátory. Základní nabídka „Functions“ obsahuje položky, které jsou vidět na Obr. 5.2.

Karta Structures obsahuje velice důležité programové funkce. Všechny bloky umístěné do struktury For Loop se opakovaně vykonávají tolikrát, kolik je nastaveno opakování [19]. Tomuto podobná struktura se nazývá While Loop, která se vykonává, pokud nenastane nějaká situace. Často se používá jako nekonečná smyčka, která dokáže proběhnout bez externího časovače maximálně tisíckrát za sekundu. Case Structure je případová struktura, která se vykoná v případě splnění vstupních podmínek. Na základě vstupních podmínek také rozhoduje, které okno se spustí. Flat a Stacked Sequence se používají kvůli krokování programu. Instrukce se vykonávají podle toho do jakého okna jsou vloženy. Čím nižší je číslo okna, tím dříve bude instrukce vykonána. Formula Node slouží k vkládání částí kódů z jiných programovacích jazyků. Event Structure lze použít například k testování tlačítek, proběhne pouze, pokud zaznamená změnu stavu.

V nabídce jsou také umístěny početní (Numeric), porovnávací (Comparison), textové (String) a logické (Boolean) konstanty a operátory. Pro časování struktur se využívají bloky z karty Timing. Pro práci se souborovým systémem slouží paleta File I/O. Umožňuje číst, zapisovat, otevírat, zavírat, hledat a přesouvat soubory. Waveform slouží ke zpracování dat pro zobrazování v grafech. Záložka Graphics & Sounds slouží k nastavování parametrů grafů, popřípadě vytváření komplexnějších a složitějších 3D grafů.

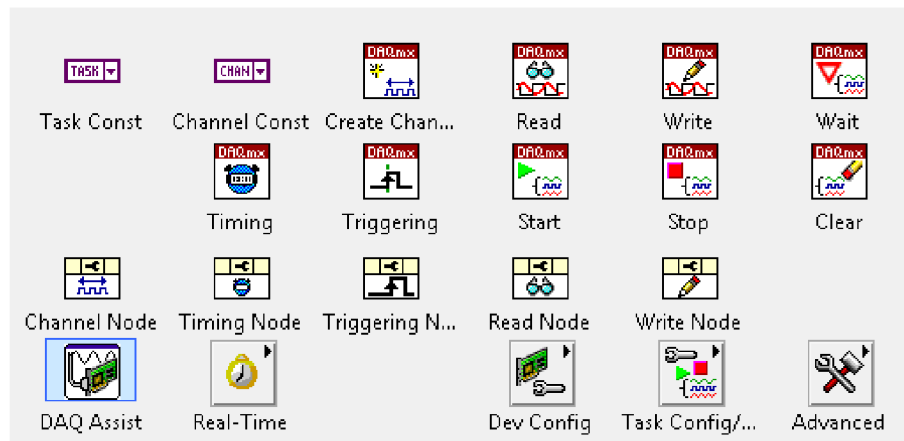


Obr. 5.2: Paleta funkcí a subpaleta struktur.

## 5.3 Ovladače DAQmx

Tyto ovladače slouží pro práci se zařízeními a kartami od National Instruments. Tyto ovladače jsou používány knihovnou OSA. Za pomoci těchto ovladačů dokáže LabVIEW namapovat jakékoliv zařízení připojené k měřicímu počítači. Pomocí položek Task a Channel Const na Obr. 5.3 se vytvoří vstupy, které se softwarově připojí na fyzické kanály na kartě. Dalšími bloky se vytváří virtuální kanály, čte data z analogových nebo digitálních vstupů, zapisuje data na analogové a digitální výstupy, ovládá časování programu, nastavuje přesnost měření karet, přepínají kanály, spouští a nastavují trigger.

Důležitou položkou je zde DAQ Assist, který provede programátora celým procesem nastavení určitého kanálu. Problémem je, že asistent sice provede nejdůležitější nastavení, ale pro pokročilejší práci s kartami, je lepší si vytvořit nastavení pomocí jednotlivých bloků, z důvodu větší kompaktnosti a variability.

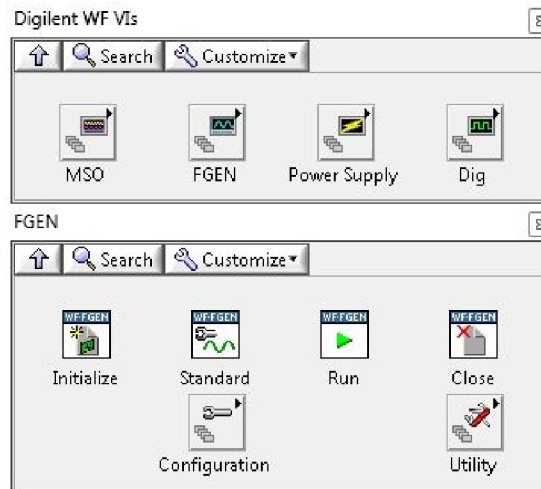


Obr. 5.3: Paleta s ovladači ke kartám NI.

## 5.4 Ovladače Digilent WaveForms

Tyto ovladače slouží především pro ovládání zařízení vyrobené firmou Digilent. S pomocí těchto ovladačů je možné nastavovat dále použité zařízení Analog Discovery 2. Základní nabídka dělí ovladače do čtyř kategorií. Kategorie MSO (Mixed Signal Oscilloscope) slouží k používání zařízení jako osciloskop smíšených signálů. FGEN (Function Generator) umožňuje ovládání zařízení jako generátor. Jeho podkategorie jsou vidět na Obr. 5.4. Pomocí těchto ovladačů je možné přesně nastavit generátor pro jakýkoliv signál (sinus, obdélník, trojúhelník nebo stejnosměrný signál). Dále je možné nastavovat frekvenci, periodu, střihu atd.. Následuje kategorie Power Supply

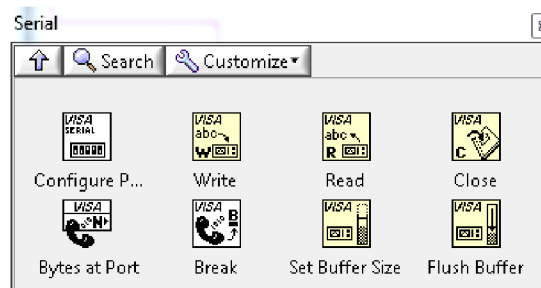
pro vytváření a nastavování napěťových i proudových zdrojů. Poslední kategorie Digital složí k přenosu dat z a do zařízení.



Obr. 5.4: Paleta s ovladači Digilent WaveForms.

## 5.5 Paleta Serial

Pomocí této palety je možné komunikovat se zařízeními po sériové lince. Configure port slouží k prvotnímu nastavení portu. Podle zařízení je nutné vybrat baudrate (nejčastěji 9600), paritu, data bity a hlavně port, na kterém se zařízení nachází. Poté lze použít i ovladače pro čtení popřípadě zapisování na sériovou linku. Tyto ovladače přebírají nastavení z předchozího Configure port. Close slouží k zavření kanálu a ukončení komunikace. Ve druhém řádku se nachází nástroje pro práci se zásobníkem. Tyto ovladače je nutné použít, pokud zařízení nemá již specializované ovladače. Například Analog Discovery 2 má vytvořeny ovladače Digilent WaveForms, proto je výhodnější využít je, ale pokud zařízení nemá podporu LabVIEW, jako třeba zesilovač EDFA, je nutné použít paletu Serial a vytvořit si ovladače ručně.

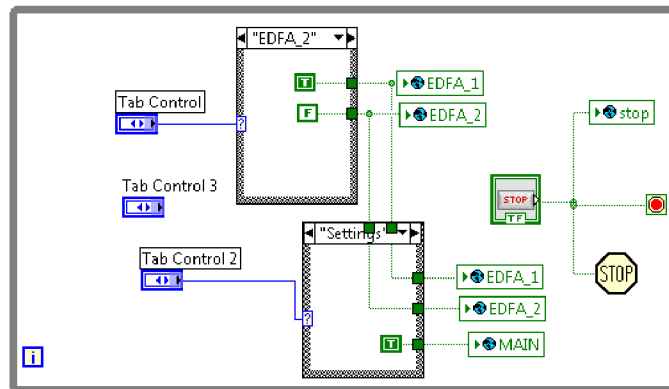


Obr. 5.5: Ovladače umožňující práci se sériovou linkou.

## 6 GUI PRO SENZORICKÉ SYSTÉMY

### 6.1 GUI pro senzorický systém založený na fázové OTDR

Celý program (čelní panel je na Obr. 6.7) je koncipován tak, že jako první po spuštění proběhne detekce EDFA modulů. V případě detekování některého z modulů dojde k přiřazení modulu ke komunikačnímu portu. Dále je mimo podprogramy funkce, která zastavuje nečinné karty viz Obr. 6.1. V této funkci jsou použity globální proměnné, které lze volat i z podprogramů. Je zbytečné, aby na pozadí běžel program, který uživatel nevidí. Tato funkce ověřuje, která karta je aktivní a pouze na této kartě běží program, ostatní karty se zastaví. Jakmile dojde k překliknutí na jinou kartu, logika programu okamžitě zastaví činnost neaktivní kartě a aktivuje kartu, kterou zvolil uživatel. Program je rozdělen na dvě hlavní části. Část Main, která načítá binární data a zobrazuje je v grafech. Dále část Settings, která slouží k nastavování komponent systému, obsahuje další čtyři podčásti. Záložka Laser je nachystaná na budoucí nastavování laseru použitého pro generování světelných impulzů. Záložka Input pulse obsahuje program, který ovládá připojené Analog Discovery 2. Poslední dvě části slouží k nastavování a vyhodnocování nastavení zesilovačů EDFA.



Obr. 6.1: Logika pro aktivaci karet.

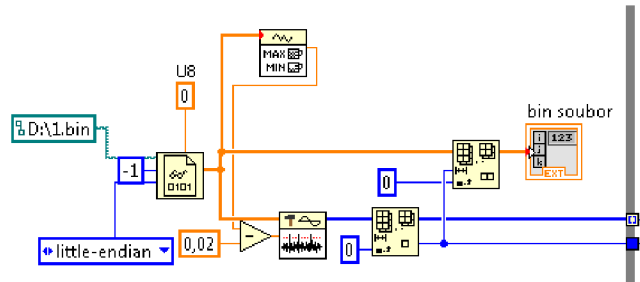
### 6.2 Main

Program Main pracuje v současné době pouze s daty ukládanými jiným programem. Předpokladem však je vytvořit takový program, který bude co nejkompaktnější a dokáže, jak nastavovat dílčí komponenty, tak ukládat a v neposlední řadě i zpracovávat naměřená data. Momentálně tedy program načítá z předpřipravených souborů a tyto



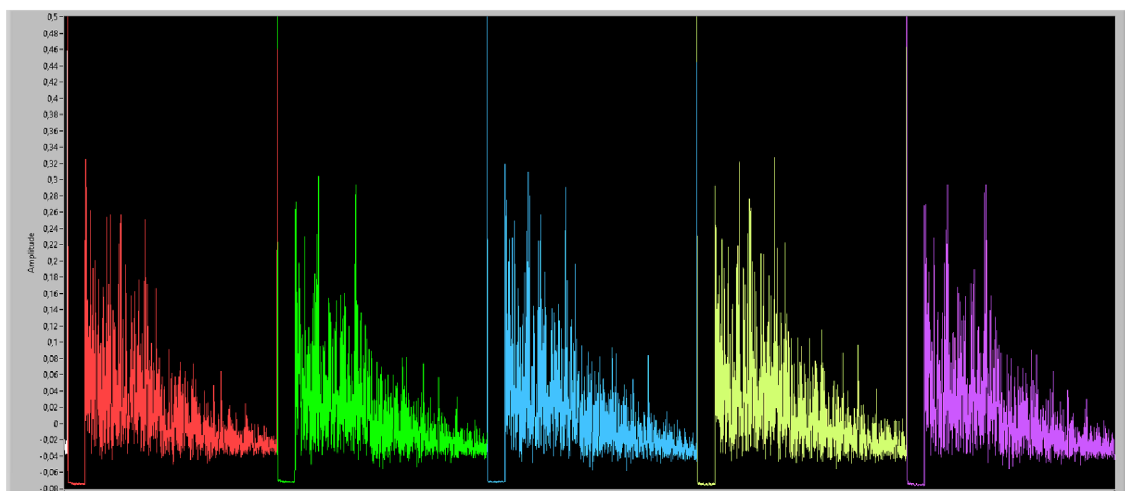
soubory vyhodnocuje. Všechny soubory jsou ve formátu .bin a každý má velikost okolo 1,5 GB.

Prvním problémem bylo vůbec načíst data ze souboru. V LabVIEW se k tomu používá blok Read from Binary File. Problém spočívá v interpretaci dat. Bylo tedy nutné prozkoumat naslepo většinu možností. Nakonec se ukázalo, že jsou data nahraná ve formátu double a endianitou Little Endian viz Obr. 6.2. Na obrázku je také vidět, že ihned po načtení dat probíhá detekce špiček a umístění těchto špiček jsou dále ukládány pro pozdější zpracování.



Obr. 6.2: Načítání binárních dat.

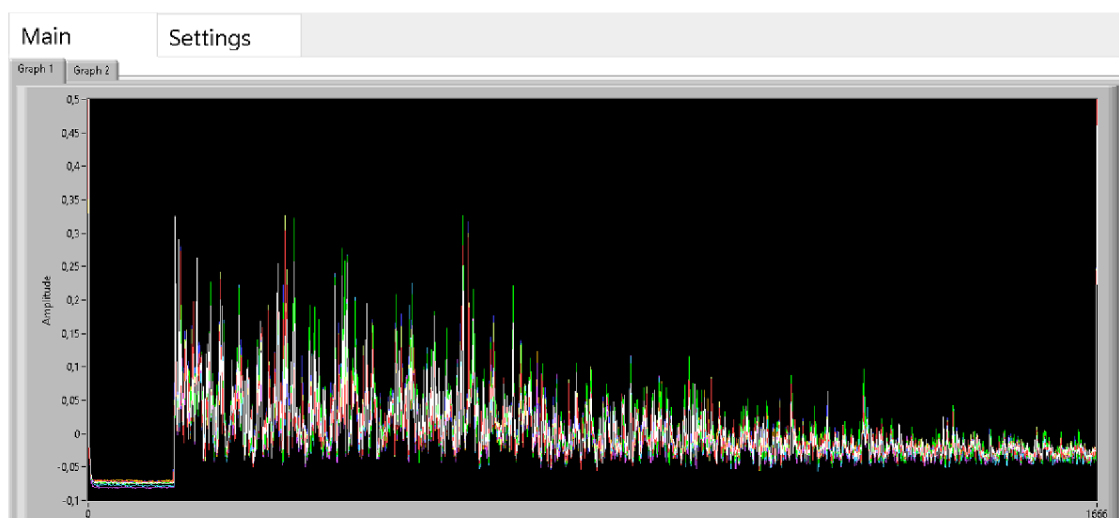
Následně jsou tyto signály očištěny od necelých period, což jsou při práci v režimu offline první a poslední perioda. Všechny ostatní periody jsou pak podle sestupné hrany označeny pro další zpracování a ukládány do pole viz Obr 6.3. Program počítá kolik hodnot je mezi značkami začátku a konce periody. Poté následuje odmazávání signálu od začátku. Program vždy načte původní signál a odmaže z něj první periodu. Zbytek signálu předá znovu na začátek pro zpracování a odmazaný signál se ukládá do dvojrozměrného pole do sloupců. Tudíž první perioda obsadí první sloupec pole,  $n$ -tá perioda  $n$ -tý sloupec.



Obr. 6.3: Označení jednotlivých period signálu pro pozdější zpracování.

Program takto odmazává signál, dokud původní zpracovávané pole není prázdné. Jakmile se velikost původně zpracovávaného signálu rovná nule, končí nekonečná smyčka, která signál odmazává. V první verzi programu probíhalo zobrazování naměřených hodnot až po ukončení smyčky, tedy až je signál zpracovaný celý. Pokud však bude program spuštěn s daty v reálném čase je třeba signál zobrazovat okamžitě. Proto se okamžitě po uložení první periody, začnou periody vykreslovat. Z toho vyplývá, že kolik period je uložených, tolik hodnot je reálně i zobrazených.

Takto rozsegmentovaná data jsou tedy okamžitě zobrazována na čelním panelu v Main záložka Graf 1. Data nejsou nijak upravována, jsou pouze zobrazena s jednou časovou základnou v  $n$  křivkách viz Obr. 6.4. Data jsou do grafu přidávána neustále, což v konečném důsledku zpomaluje běh programu a tím i rychlost zpracování. Jakmile však program poběží v reálném čase, bude zde nastaveno, aby zobrazovala pouze posledních  $n$  křivek a stará data budou zahozena. Pro menší zahlcení programu i paměti RAM, budou zahozena také stará data ze všech ostatních proměnných. V případě nutnosti udržovat tato stará data v paměti by bylo nutné rozšířit paměť RAM, která má v současné době velikost pouze 16 GB a dále vytvořit program pomocí paralelizace více vyhodnocovacích smyček.



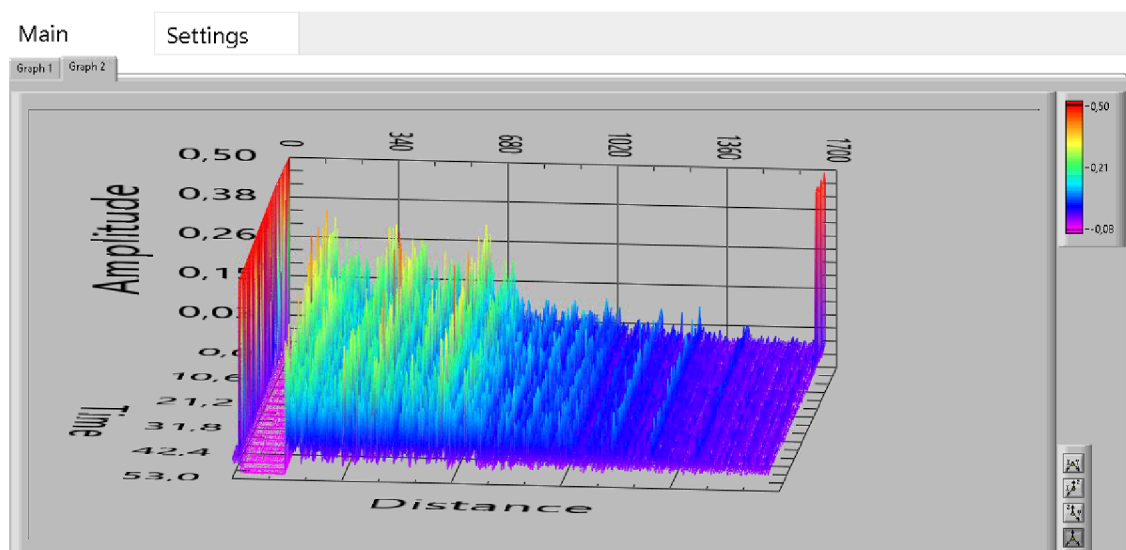
Obr. 6.4: Čelní panel se zobrazením grafu s daty.

Druhá záložka obsahuje takzvaný Waterfall graf viz Obr 6.5. Waterfall graf spočívá v tom, že naměřené křivky vynáší do grafu, a jestliže přijde další perioda signálu, odsune dříve zobrazenou křivku do pozadí a novou před ní. Takto při nashromáždění dostatečného množství signálů lze pouhým okem identifikovat skokový nárůst amplitudy v určité části signálu.

Jak je z obrázku patrné, 3D grafy v LabVIEW nejsou úplně ideální, tak při změně úhlu pohledu z důvodu lepší viditelnosti, se popisky grafu deformují, nebo

úplně mizí. Také hodnoty na osách jsou dost omezené. Není možné změnit font nebo tučnost a při změně velikosti dochází také k deformaci. Dalším problémem je, že při invertování některé z os se invertuje i její popisek, což se nedá vrátit zpět a tak je vzhůru nohama.

Pro vytvoření takového grafu je možné použít plot helper, který slouží k vytváření právě takových, různých 3D grafů. Vstupem do helperu je matice Z. Je tedy nutné námi naměřená data znovu upravovat do podoby matice, kterou dokáže helper zpracovat. I toto má ovšem svoje omezení. 3D grafy v LabVIEW nedisponují možností omezené paměti grafu. Graf tedy neustále načítá nová data a stará nezapomíná. Jediným řešením tohoto problému je data z matice programově mazat, což zbytečně zatěžuje procesor.



Obr. 6.5: Čelní panel se zobrazením Waterfall grafu.

### 6.3 Settings

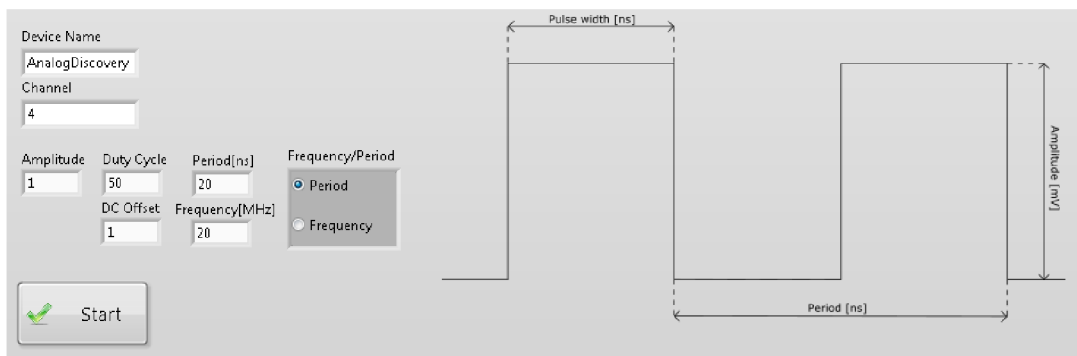
Sekce Settings v sobě sdružuje nastavování všech komponent. V případě nastavování Input pulse jsou zastaveny karty EDFA 1 a EDFA 2. Jelikož program je nastavený tak, že pokud jsou aktivní, neustále periodicky obnovují informace o modulech a to v případě, kdy jsou tyto karty skryté je nežádoucí, protože posbíraná data nejsou vidět a program by tak zbytečně zatěžoval sériovou linku. V případě, že uživatel klikne na nějaký z těchto modulů karta se stane aktivní po dobu nastavování. Jakmile uživatel tuto kartu opustí, stává se opět nečinnou.

### 6.3.1 Laser

Tato karta je prázdná a je pouze nachystaná k pozdějšímu přidání programu pro nastavení a případnou komunikaci s laserem, který bude využit jako zdroj koherentního záření.

### 6.3.2 Input pulse

Čelní panel obsahuje pouze nastavovací pole pro Analog Discovery 2 se jménem zařízení a kanálu. Složitější grafické prostředí nemá momentálně žádné opodstatnění, jelikož zatím není zcela jasné, jakou roli bude mít toto zařízení v systému, popřípadě jestli bude vůbec součástí. Dále je zde nutné nastavit amplitudu pulzu, střídu, popřípadě DC offset. Poté uživatel vybere, jestli bude zadávat kmitočet, nebo periodu. Podle výběru se hodnoty přepočítají a odešle se pouze hodnota, která je zaškrtnuta, druhé pole je ignorováno. Perioda se zadává v nanosekundách a kmitočet v megahertzích. Po vyplnění všech polí je nutné, aby uživatel stisknul Start, tím program přenese nastavení do zařízení. Vedle nastavovacích polí obsahuje čelní panel ještě náčrt obdélníkového signálu, kde jsou pro lepší orientaci naznačeny zadávané veličiny viz Obr. 6.6. Program využívá ovladačů přímo pro Analog Discovery 2 Digilent WaveForms, které jsou zmíněné v podkapitole 5.4.

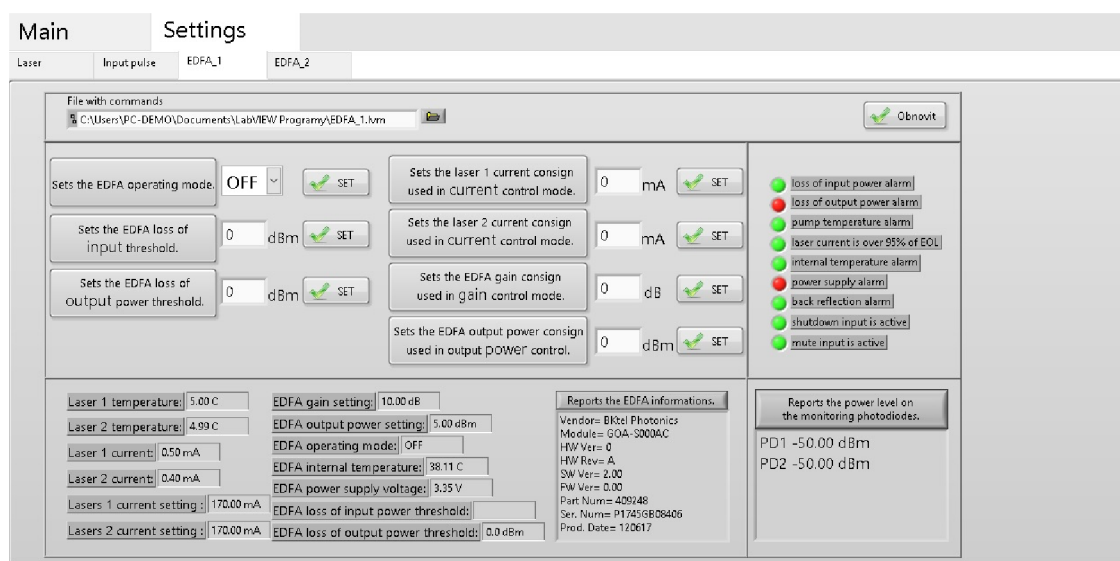


Obr. 6.6: Čelní panel záložky Input pulse.

### 6.3.3 EDFA 1

Tato záložka je rozdělena na dvě části. První část čeká, jestli není stisknuto nějaké tlačítko pro odesílání dat a druhá část, pokud není nic stisknuto, obnovuje hodnoty. Všechny příkazy k tomuto modulu jsou načítány z předpřipraveného textového souboru.

Část pro odesílání dat je podstatně jednodušší než načítací část. V první části program prověří, jestli cesta k souboru s příkazy zadaná uživatelem je správná. Pokud ne, program vyvolá dialogové okno, kde uživatel vybere cestu k souboru. Poté program načte všechny příkazy ze souboru a uloží si je do proměnné. Nastavování parametrů probíhá tak, že uživatel zadá hodnotu, kterou chce zapsat a stiskne tlačítko SET. V tu chvíli program přeruší funkci automatického načítání hodnot a vybere na základě stisklého tlačítka správný příkaz a odešle ho po sériové lince, i s nastavenou hodnotou, do zařízení (ukázka zdrojového kódu je na Obr. 6.8). EDFA poté pošle potvrzující hlášku, že přijala příkaz. Na výběr je z devíti nastavovacích tlačítek viz Obr. 6.7.

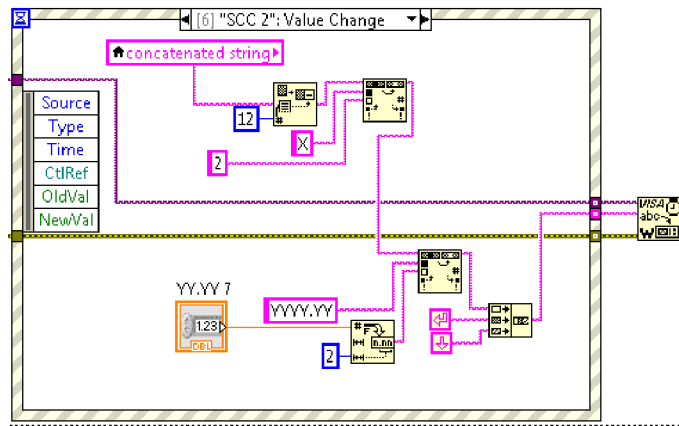


Obr. 6.7: Pohled na čelní panel s otevřenou kartou EDFA 1.

Nastavované veličiny jsou uspořádány tak, že vlevo nahoře se nachází výběr módu, zatímco na pravé straně jsou pouze nastavení hodnot pro jednotlivé režimy. Pro proudový režim lze nastavit hodnoty proudů pro oba lasery. Ve výkonovém módu lze nastavit hodnotu výkonu pro celé zařízení v dBm a stejně tak, lze pro celé zařízení nastavit gain v dB. Jednotky nastavovaných veličin se nachází vedle kolonek s hodnotami. Najetím na tyto kolonky se zobrazí malá nápověda v jakém formátu se hodnoty zadávají.

Mnohem náročnější část je načítací a vyhodnocovací část. Záměrem bylo, aby se hodnoty parametrů obnovovali a byly stále aktuální. Jelikož některé parametry se mění pouze pokud je změni uživatel, je nutné při prvním cyklu programu načíst všechny hodnoty a při každém dalším cyklu, obnovovat pouze hodnoty, které se mohly změnit, například teploty. Hodnoty, které se bez zásahu uživatele nemůžou změnit, zůstávají neaktualizované. Při odeslání jakékoliv změny, odesílá EDFA zpět

potvrzení. Na toto potvrzení program čeká a na základě tohoto potvrzení upraví hodnoty ve spodní části čelního panelu viz Obr. 6.7. Jsou zde zobrazovány hodnoty proudů, teplot a proudových nastavení obou laserů. Ve druhém sloupci jdou všeobecné parametry EDFA, jako jsou vnitřní teplota, operační mód, nastavení gainu nebo výstupního výkonu.

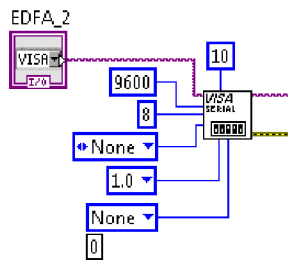


Obr. 6.8: Ukázka odesílání příkazu SCC.

V pravé části jsou indikátory alarmových stavů. Program spolu s hodnotami ze spodní části obnovuje také alarm status. Každý cyklus pošle program příkaz pro výpis alarmových stavů. Podle odpovědi program nejprve vynuluje hodnoty a poté změni při alarmu příslušnou ledku do červené barvy. Alarmové hlášky program detekuje podle klíčových slov, které jsou uvedeny v datasheetu k tomuto modulu. V okamžiku, kdy dojde ke zrušení alarmu, příslušná ledka opět mění barvu na zelenou. V této části je nezbytně nutné, aby v programu byly řešeny všechny varianty, které mohou nastat. Program umí zareagovat na jakýkoliv příkaz, který zařízení zná, nebo ho může vygenerovat. Tedy na veškeré příkazy uvedené v návodu. Některé příkazy z datasheetu ovšem nefungují. Jedná se například o spuštění gainového módu. Je možné, že je tento datasheet vytvořený pro mírně odlišnou verzi firmwaru. Na Obr. 6.12 je vidět smyčka pro detekci všech příkazů u modulu EDFA 2.

### 6.3.4 EDFA 2

Program pro EDFA 2 vychází z programu pro EDFA 1. S počítačem komunikuje také po sériové lince a přibližně podobnými příkazy. Na začátku opět probíhá načtení příkazů z textového souboru pro EDFA 2. Příkazů je ovšem více a jsou podrobnější. Po nastavení sériové linky viz Obr. 6.9 podle datasheetu EDFA 2 probíhá stejný proces jako u předchozího programu, jedna část odesílá příkazy a druhá obnovuje hodnoty a naslouchá.



Obr. 6.9: Nastavení sériové linky.

Při odesílání postupuje stejně jako předchozí program. Načítá tlačítka, a pokud je nějaké stisknuté, pošle příslušný příkaz po sériové lince. Jediný rozdíl je v počtu tlačítek. V tomto programu je tlačítek nadepsaných SET osm. Uspořádání je stejné jako u předchozího programu, tj. nahoře mód a vpravo nastavování parametrů módů. Tlačítko navíc slouží k povolení, nebo zakázání automatického vypnutí. Po odeslání opět probíhá potvrzení od zesilovače.

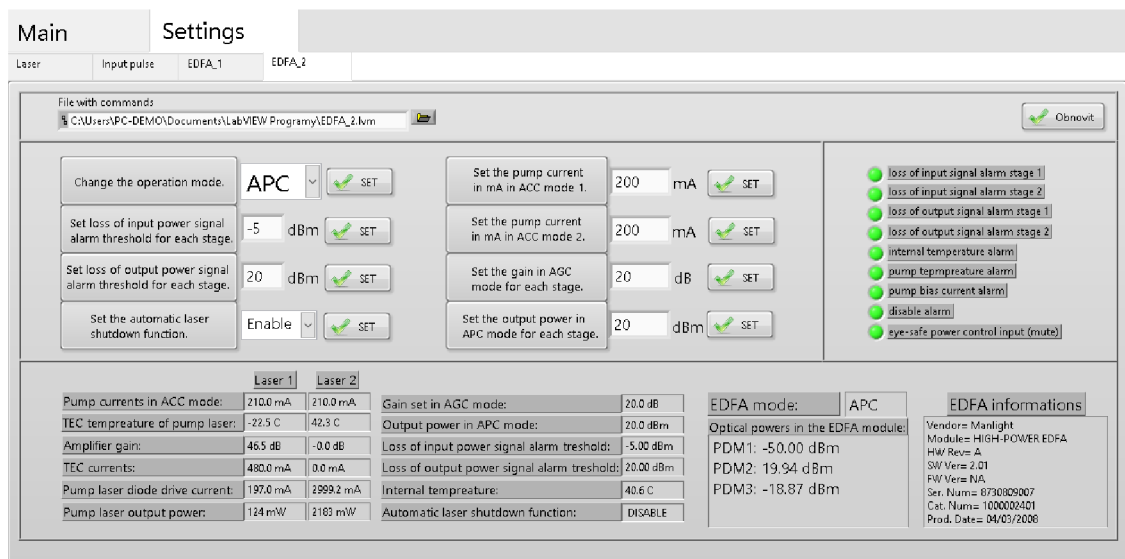
Při načítání dat se obnoví všechny kolonky ze spodní části pouze v prvním cyklu. Dále už se také načítají pouze hodnoty, na které nemá uživatel vliv. Problémem u tohoto zesilovače je fakt, že neposílá zpět hodnotu příkazu, ale pouze hodnotu laseru. Například u EDFA 1 pro získání hodnoty teploty laseru 1 se odešle příkaz RLT 1 (ukázka souboru s příkazy je na Obr. 6.10). Odpovědí zesilovače je LT 1 20 C. Z toho lze jednoduše detekovat, že se jedná o teplotu podle písmen LT, která jsou jedinečná. U EDFA 2 je příkaz na zjištění teploty LT 1. Ovšem odpovědí je LASER 1: 20 C a u každého dalšího příkazu přichází odpověď ve stejném formátu LASER X:. Z toho není možné detekovat, o jakou hodnotu se jedná, proto je program rozšířen o paměť odeslaných příkazů a na základě nich přiřazuje hodnoty. Proto je program o něco pomalejší, protože pokaždé, kdy dá požadavek je nutné čekat na odpověď, zatímco program pro EDFA 1 je schopen odpovědi sbírat náhodně.

```

EDFA_1 - Poznámkový blok
Soubor Úpravy Formát Zobrazení Nápověda
Reports the EDFA alarms status. RA
Reports the lasers temperature. RLT X
Reports the lasers current. RLC X
Reports the EDFA internal temperature. RIT
Reports the EDFA informations. RI
Reports the power level on the monitoring photodiodes. RPM
Reports the EDFA power supply voltage. RV
Reports the EDFA loss of input power threshold. RLI
Sets the EDFA loss of input threshold. SLI YY.YY
Reports the EDFA loss of output power threshold. RLO
Sets the EDFA loss of output power threshold. SLO YY.YY
Reports the lasers current setting used in current control mode. RCC X
Sets the lasers current consign used in current control mode. SCC X YYYY.YY
Reports the EDFA gain setting used in gain control mode. RGC
  
```

Obr. 6.10: Ukázka textového souboru pro EDFA 1.

Jako u prvního zesilovače i tento má několik alarmových stavů viz Obr.6.11. Indikátory jsou umístěny opět v pravé části, aby programy měli podobnou formu a uživatel se v nich snáze orientoval. Ve spodní části jsou hodnoty uspořádány jinak než u předchozího programu. V prvním sloupci se nacházejí hodnoty, které má každý laser jiný. Levý sloupec nadepsaný Laser 1 je pro první laser a Laser 2 pro druhý. V dalším sloupci se nacházejí hodnoty, které jsou pro celý modul. Ve třetím sloupci se nachází hodnota nastaveného módu a optické výkony tohoto modulu. V posledním sloupci se nachází informace o zařízení, jako jsou název výrobce, typ modulu, verze firmwaru, softwaru atd..

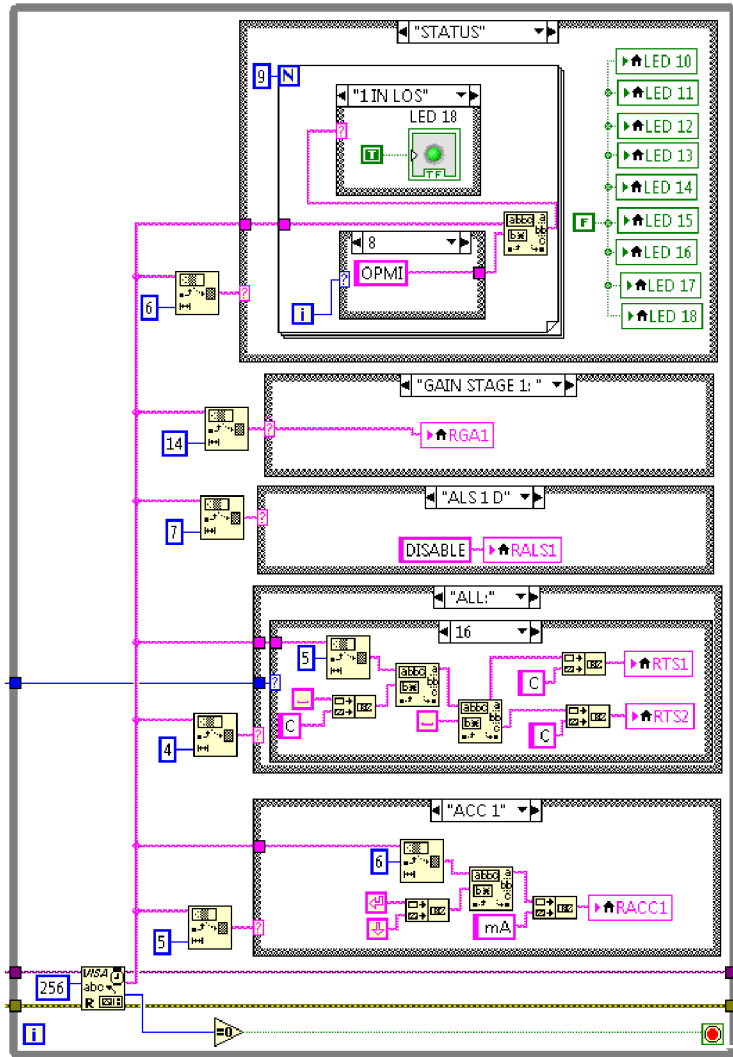


Obr. 6.11: Ukázka čelního panelu pro optický zesilovač EDFA 2.

Oproti EDFA 1 je tato EDFA v komunikaci mnohem pomalejší, tak je nutné program uměle zpožďovat. Bez zpoždování přicházejí absolutně chaotická data nebo neúplné zprávy. Na malé přenosy o jednom řádku stačí zpoždění cca 50 ms, na vyvolání stavu na diodách o třech řádcích 100 ms a na vyvolání informací o zařízení je nutné vyčkat 200 ms mezi dobou odeslání příkazu a přijetím odpovědi.

V rámci diplomové práce byly z programů EDFA 1 a EDFA 2 vytvořeny samostatné programy. Jde o zkopírování části blokového diagramu a upravení těchto částí pro samostatnou činnost. Tudíž je možné ovládat zesilovače EDFA pouze těmito programy bez nutnosti spouštět hlavní program. Tyto programy vznikly z důvodu nedostačujících vyvinutých programů od výrobců. Bylo nezbytně nutné znát příkazy, takže programy fungovali pouze jako příkazová řádka do sériové linky. U EDFA 2 bylo dokonce nutné spouštět tento program přes virtuální distribuci OS Ubuntu na bázi linuxu.





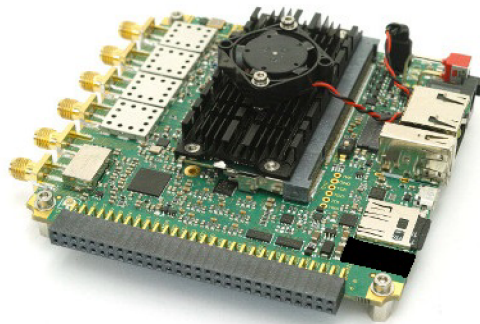
Obr. 6.12: Smyčka pro detekci příkazu z EDFA 2.

## 6.4 Uvažované změny

V rámci vylepšení toho sensorického systému přišla v úvahu možnost použití zařízení, které by dokázalo fungovat jako generátor, tak i částečně zpracovávat signál. Jako jedno z řešení se nabízí možnost využití zařízení kombinující funkci procesoru a FPGA. Jako nad zařízením splňující všechny požadavky, bylo uvažováno o sestavách od National Instruments, kvůli podpoře LabVIEW, nebo o sestavách od jiných výrobců. Deska na Obr. 6.13 obsahuje procesor Zynq 7020 SoC (System on a Chip), který v sobě kombinuje dvoujádrový ARM procesor a FPGA. Obsahuje paměť 512 MB DDR3L. Tato kombinace se jeví jako dostatečná pro aplikaci v tomto sensorickém systému. Jako operační systém je na Mikro SD kartě nahrána zjednodušená distribuce Ubuntu 16.04 na bázi Linuxu. Toto zařízení je napájeno 12 V. Obsahuje také Ethernet konektor, vstup a výstup pro časovač.

Výrobci těchto hybridních desek bohužel nedisponuje ovladači do LabVIEW (výjma desek od NI a několika málo dalších). Ovšem na stránkách National Instruments je psáno, že tento typ procesoru na nepodporovaných deskách je podporován. Programovat by se mělo stejně jako obyčejná FPGA, popřípadě lze vzít ovladače k jiné desce. Ty následně analyzovat a podle nich vytvořit ovladače schopné komunikovat s jakoukoliv deskou obsahující procesor Zynq 7020 SoC.

Při vhodném naprogramování by tato deska mohla obstarávat většinu práce se zpracováním dat a uživatelské prostředí by nebylo tolik zatěžováno, popřípadě vůbec a sloužilo by pouze jako zobrazovací zařízení změřených charakteristik a pro ukládání dat. Výhodou tohoto hybridního procesoru je, že při podpoře linuxu a driverů k FPGA, není nutné programovat toto FPGA pomocí jeho programovacích jazyků, jako jsou VHDL a Verilog.

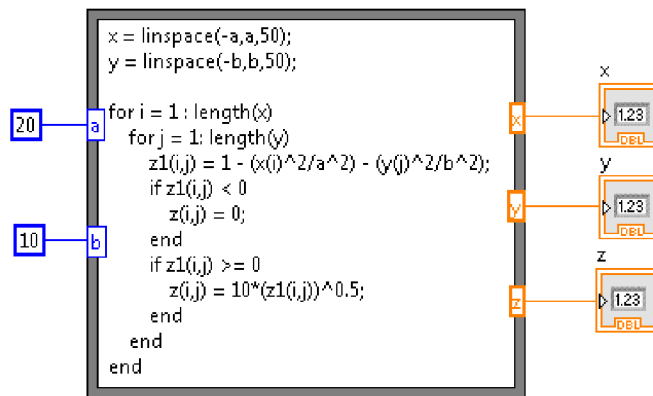


Obr. 6.13: Hybridní CPU-FPGA.

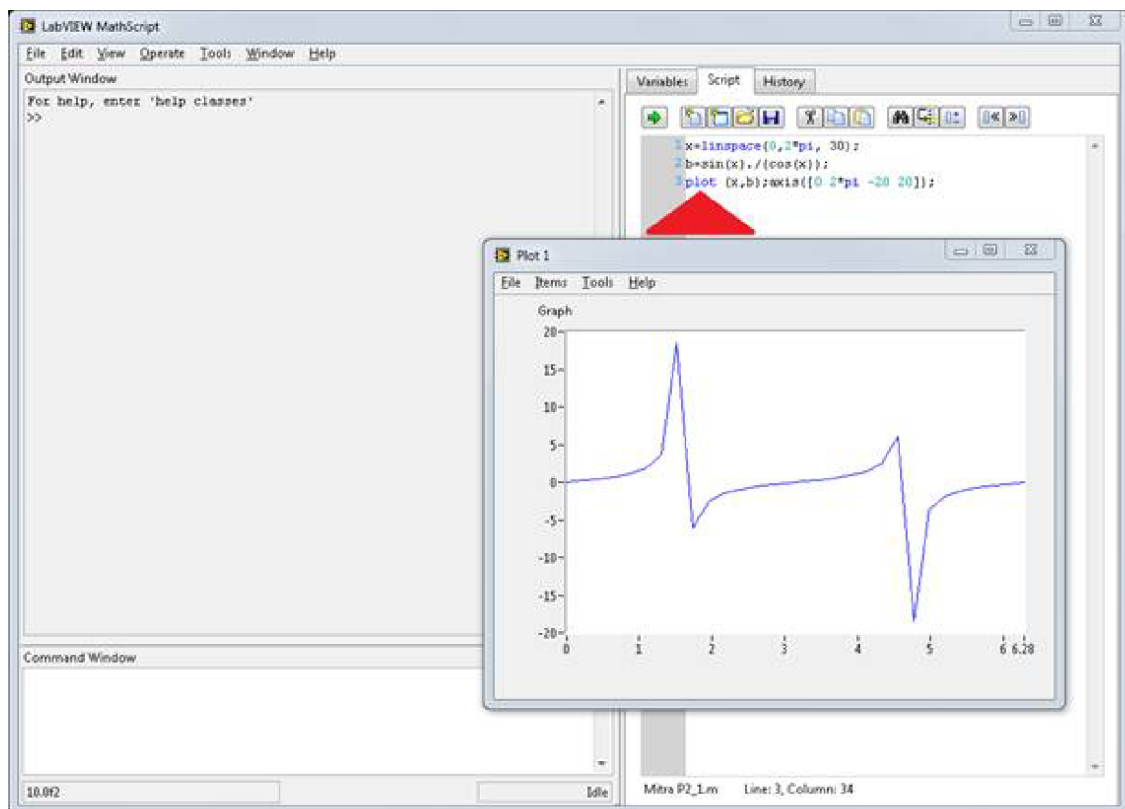
Dalším vylepšením programu by mohla být implementace Matlabovského kódu do programu LabVIEW. Jak je vidět na Obr. 6.14, je možné v LabVIEW používat kódy přejeté z jiných programovacích jazyků. Na tuto smyčku se napojí konstanty nebo proměnné z LabVIEW, následně proběhne výpočet kódem Matlabu a následně tato smyčka předá vypočítané hodnoty na výstup do indikátorů, nebo do proměnných pro další zpracování.

Mimo Formula node lze do LabVIEW doinstalovat Math Script, který prací s Matlabem vylepšuje. Dokonce dokáže generovat grafy v novém okně a v podobném formátu jako Matlab, jak je vidět na Obr. 6.15.

Jak bylo zmíněno výše, ani 3D grafy v LabVIEW, nejsou příliš propracované. Bude tedy nutné najít takové rozšíření, které bude splňovat grafické nároky. Nabízí se například Advanced Plotting Toolkit, který se na první pohled jeví dobře, ovšem jenom při používání 2D grafů. 3D grafy je nutné prozkoumat a vyzkoušet jejich možnosti, pokud jsou vůbec podporovány. Další možností je propojení LabVIEW s dalším softwarem, který zvládá lepší grafy, jako je například Origin.



Obr. 6.14: Ukázka použití Formula node.



Obr. 6.15: Ukázka funkce modulu Math Script [12].

## 7 ZÁVĚR

V první kapitole této práce jsou popsány optická vlákna. Jejich základní dělení podle šířky jádra a podle způsobu šíření paprsků uvnitř vláken. U každého typu vlákna jsou alespoň stručně popsány výhody a nevýhody použití. Dále jsou popsány nejběžněji používané konektory, popsány jejich způsoby uchycení a průměry fermulí jednotlivých konektorů. V poslední části této kapitoly jsou popsány základní vlastnosti optických vláken jako jsou útlum, disperze, numerická apertura nebo okna vlnových délek.

V další kapitole byly rozebrány základní principy funkce Braggových vláknových mřížek a jejich typy dělené podle periody změn indexů lomu. Mimo to je zde popsán základní vzorec pro výpočet Braggovy vlnové délky. Dále je zde rozebrána základní vlastnost optických vláken nutná pro výrobu vláknových mřížek. Tou je fotosenzitivita. Je zde uvedeno, jak se dá ovlivňovat míra fotosenzitivity vlákna. V podkapitole výroba jsou uvedeny základní metody výroby FBG. Tyto metody jsou znázorněny v přehledných schématech. Následně jsou uvedeny možnosti použití vláknových mřížek jako senzorů. Jsou zde popsány reálně vyráběné senzory mechanického napětí a tepla.

V kapitole číslo tři jsou popsány metody měření útlumu vláken. U přímé metody jsou popsány tři varianty použití referenčního kabelu a ty jsou zde také nakresleny. Dále je popsána nepřímá metoda měření útlumu OTDR. Jsou zde vysvětleny základní principy funkce přístrojů pro měření a základní fyzikální jevy, jako je Rayleighův rozptyl a Fresnelův odraz. Poté jsou popsány základní pojmy důležité pro čtení reflektogramů. Na závěr této kapitoly jsou uvedeny důležité parametry těchto měřicích přístrojů.

Ve čtvrté kapitole se nachází základní seznámení s měřicím systémem, jeho základních parametrů a funkcí. Základem tohoto sensorického systému je počítač s operačním systémem Windows 10. Dále jsou zde popsány komponenty sensorického systému, kterými jsou dva optické zesilovače s erbiem dopovaným vláknem a zařízení Analog Discovery 2, které je použito jako funkční generátor.

Následuje kapitola, která se věnuje programovacímu prostředí National Instruments LabVIEW. Na začátku je popsán čelní panel, způsob práce s ním a vysvětleny základní vkládané prvky. Je zde popsáno také menu blokového diagramu a jeho základních použitelných struktur. Následuje popis ovladačů pro sběr dat, jejich elementární popis a postup při připojování měřicí karty pomocí DAQAssist, který je pro základní sběr dat ideální, ale pro využití pokročilejších funkcí již nestačí. Poté je stručně popsán ovladač Digilent WaveForms, který je nutný pro připojení a práci s Analog Discovery 2. V poslední části je rozebrána paleta pro práci sériovou linkou a čtení a zapisování dat.

Poslední kapitola se věnuje vlastní práci. Začátek kapitoly stručně popisuje celkovou funkci a vzhled programu. Následující podkapitoly již obsáhleji popisují jednotlivé záložky programu.

Jako první je popisována záložka Main, její funkce a princip jejího pracování s daty. Jak slovně, tak pomocí ukázek z programu je zde popsáno, jak karta zpracovává data, která pak zobrazuje ve dvou grafech. Jeden z nich je klasický graf, kde jsou křivky skládány přes sebe viz Obr. 6.4 a druhý graf je tzv. Waterfall graf 6.5, který skládá signály za sebe pro rychlou vizuální detekci změn, kterou usnadňuje i fakt, že jsou křivky podle amplitudy barevně odlišeny spektrem od fialové do červené.

V další části této kapitoly jsou podrobně popsány všechny součásti programu Settings. Na úvod části je uveden stručný popis, následovaný rozborem jednotlivých záložek. U záložky Input je popsán program i přiblíženy důvody jednoduchého grafického vzhledu. Následuje popis programů ovládající moduly EDFA. Jsou zde popsány některé části programu i s ukázkami blokového diagramu. Je zde také popsán způsob ovládání čelních panelů a popsáno rozmístění jednotlivých prvků umístěných na čelní panel. Na obrázcích 3.6, 6.3 a 6.4 je zobrazen skutečně naměřený signál, který posloužil jako testovací signál pro odlazování programu. Na závěr podkapitoly jsou uvedeny rozdíly mezi ovládáním jednotlivých modulů a rozdílné doby zpracování komunikace.

Jako poslední je uvedeno zamýšlené směřování zdokonalování programu i senzorického systému. Jsou zde také popsány některé prvky vhodné k doplnění senzorického systému. Nachází se zde i informace o vytvoření podpůrných programů pro samostatné ovládání modulů EDFA bez nutnosti spouštět celý program. Je zde popsána možnost, jak implementovat kódy z jiných programovacích jazyků, například kód z Matlabu. Nakonec jsou zde popsány možnosti vylepšení grafické stránky programu, hlavně co se týká generování grafů, za použití nástrojů implementovatelných do LabVIEW nebo externích nástrojů.

# LITERATURA

- [1] BALON, J. *Měřicí metody klíčových parametrů optických sítí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 82 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Vladimír Tejkal.
- [2] BELDEN Inc. *UPC or APC?* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://www.belden.com/blog/data-centers/upc-or-apc?success=true>
- [3] DIGILENT Inc. *Analog discovery 2 Reference manual* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <https://reference.digilentinc.com/reference/instrumentation/analog-discovery-2/reference-manual>
- [4] EXFO Inc. *MaxTester 720C - access OTDR* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.exfo.com/en/products/field-network-testing/otdr-iolm/maxtester-720c/>
- [5] FAJKUS, M. *Výroba Braggovských mřížek*. Optické komunikace a optoelektronika - OPTICE [online]. [cit. 2017-10-14]. Dostupné z: <http://optice.vsb.cz/mfajkus/index.php/optika/braggovske-mrizky/4-vyroba-braggovskych-mrizek>
- [6] HBP měřicí technika. *FS63 – optické FBG snímače teploty* [online]. [cit. 2017-10-14]. Dostupné z: <http://www.hbm.cz/produkty/fs-line-fibersensing/fs63-opticke-fbg-snimace-teploty/>
- [7] HELÁN, R. *Modelování a optimalizace komplexních vláknových difrakčních struktur*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 126 s. Vedoucí doktorské práce doc. Ing. František Urban, CSc.
- [8] HOLUB, P. *Lambda služby*. Zpravodaj ÚVT MU. ISSN 1212-0901, 2004, roč. XV, č. 2, s. 8-13.
- [9] JEŘÁBEK, J. *Pokročilé komunikační techniky*. Vysoké učení technické v Brně: 2012. 193 s.
- [10] KOHERON. *250 MSPS acquisition board* [online]. [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <https://www.koheron.com/products/>
- [11] MIŠUREC, J. *Analýza parametrů apodizovaných Braggových vláknových mřížek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 52 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. František Urban, CSc.

- [12] NATIONAL INSTRUMENTS. *National instruments: Podpora* [online]. [cit. 2017-09-29]. Dostupné z: <http://www.ni.com/cs-cz/support.html>
- [13] NATIONAL INSTRUMENTS. *PXI-6251 National Instruments* [online]. [cit. 2017-11-26]. Dostupné z: <http://www.ni.com/cs-cz/support/model.pxi-6251.html>
- [14] PETRÁSEK M. *Optika 2* [online]. [cit. 2018-03-14]. Dostupné z: <http://pedro-cz.blogspot.cz/2011/03/optika-2-druhy-konektoru.html>
- [15] RP Photonics Consulting. *Optical Fiber Communications* [online]. [cit. 2018-03-17]. Dostupné z: [https://www.rp-photonics.com/optical\\_fiber\\_communications.html](https://www.rp-photonics.com/optical_fiber_communications.html)
- [16] SAFIBRA s.r.o. *Monitorovací systémy* [online]. [cit. 2017-10-14]. Dostupné z: <http://www.safibra.cz>
- [17] SHI, Yi, FENG, Hao and ZENG, Zhoumo *Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometer with Dual-Wavelength Probe Pulse* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1155/2015/624643>
- [18] URBAN, F. *Měřicí pracoviště pro analýzu vlastností vláknových mřížek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 54 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Miroslav Filka, CSc.
- [19] VLACH, Jaroslav, Josef HAVLÍČEK a Martin VLACH. *Začínáme s LabVIEW*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 247 s. ISBN 978-80-7300-245-9.

## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

APC	úhlové broušení fermulí – Angled Physical Contact
FBG	vláknové Braggovy mřížky – Fiber Bragg Gratings
GUI	grafické uživatelské prostředí – Graphical User Interface
N	řád periody mřížky
EDFA	zesilovač s erbiovým vláknem – Erbium Doped Fiber Amplifier
$n_{\text{eff}}$	efektivní vidový reflex
FPGA	programovatelná hradlová pole – Field Programmable Gate Array
I/O Port	vstupní/výstupní port – Input/Output Port
OTDR	optická reflektometrie – Optical Time Domain Reflectometry
SoC	jednočipový počítač – System on a Chip
subVI	podprogram LabVIEW ve formátu .vi
UPC	rovné broušení fermulí – Ultra Physical Contact
VISA	The Virtual Instrument Software Architecture
$\Lambda$	perioda mřížky
$\lambda_{\text{Bragg}}$	Braggova vlnová délka



# SEZNAM PŘÍLOH

A Obsah přiloženého CD

57

## A OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

Na přiloženém CD naleznete elektronickou verzi bakalářské práce, hlavní program pro upravování a spustitelný .exe soubor.

```
/.....kořenový adresář přiloženého CD
├── Diplomová práce Petr Dejdar
│   ├── Diplomová práce Petr Dejdar.pdf.....elektronická verze DP
│   └── GUI.zip.....komprimované soubory s programem
│       ├── Centralni program.vi.....hlavní program
│       ├── Ovladani karty EDFA 1.vi.....dílčí program pro ovládaní EDFA 1
│       ├── Ovladani karty EDFA 2.vi.....dílčí program pro ovládaní EDFA 2
│       ├── Global 1.vi.....soubor s globálními proměnnými
│       ├── EDFA 1.txt.....textový soubor s příkazy pro EDFA 1
│       └── EDFA 2.txt.....textový soubor s příkazy pro EDFA 2
```