VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2021 Barbora Šimková

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

LABORATORNÍ ÚLOHA – ANALYZÁTOR OPTICKÝCH TRAS OTDR
LABORATORY EXERCISE - OTDR OPTICAL PATH ANALYZER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE Barbora Šimková
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. Petr Dejdar
SUPERVISOR

BRNO 2021

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Telekomunikační a informační systémy**

Ústav telekomunikací

Studentka: Barbora Šimková ***ID:*** 213978

Ročník: 3 ***Akademický rok:*** 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Laboratorní úloha – analyzátor optických tras OTDR

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je detailní teoretický rozbor problematiky OTDR se zaměřením na rozbor požadavků na jednotlivé komponenty. Práce by měla popisovat nejen zařízení samotné, ale např. i související standardy či doporučení. V rámci bakalářské práce bude provedena finalizace a optimalizace zapojení. S využitím sestaveného zapojení bude navržena minimálně jedna laboratorní úloha umožňující pochopení principu fungování OTDR a měření a vyhodnocení základních parametrů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

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

[2] CAVIGLI, Simone, 2018. OTDR: Basic Practical Handbook, ISBN : 979-1220036993

Termín zadání: 1.2.2021 ***Termín odevzdání:*** 31.5.2021

Vedoucí práce: Ing. Petr Dejdar

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:
Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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

Bakalářská práce obsahuje detailní rozbor problematiky OTDR a realizaci zapojení. Součástí práce je také teoretický rozbor optických vláken a jejich přenosových vlastností, zejména rozptylu a odrazu. Realizace zapojení byla provedena pomocí platformy Red Pitaya a připojené desky Koheron s laserem. Výsledný program byl vytvořen ve vývojovém prostředí LabView. Součástí programu je i uživatelské rozhraní pro snadné ovládání.

KLÍČOVÁ SLOVA

Fresnelův odraz, fotodetektor, Koheron, LabView, laser, optické vlákno, OTDR, Red Pitaya

ABSTRACT

The bachelor's thesis consists of detailed analysis of OTDR problematics and implementation of the connection. Part of the work also consists of theoretical analysis of optical fibers and their transmission properties, especially dispersion and diffraction. Realization of the connection was made using platform Red Pitaya and laserboard Koheron. Final program was created in development environment LabView. The program also contains graphical user interface.

KEYWORDS

Fresnel diffraction, Koheron, LabView, laser, optical fiber, OTDR, photodetector, Red Pitaya

ŠIMKOVÁ, Barbora. *Laboratorní úloha – analyzátor optických tras OTDR*. Brno, 2021, 49 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. Petr Dejdar

Vysázeno pomocí balíčku `thesis` verze 4.00; `http://latex.feec.vutbr.cz`

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Laboratorní úloha – analyzátor optických tras OTDR“ jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědoma 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 autorky

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Petru Dejdarovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod **9**

1 Optická vlákna **10**
1.1 Stavba optického vlákna . . . 10
1.2 Druhy optických vláken . . . 11
1.2.1 Jednovidová optická vlákna . . . 11
1.2.2 Mnohovidová optická vlákna . . . 12

2 Přenosové vlastnosti optického vlákna **14**
2.1 Útlum optických vláken . . . 14
2.1.1 Absorpce . . . 16
2.1.2 Rozptyl . . . 16
2.1.3 Fresnelův odraz . . . 17
2.1.4 Ohybové ztráty . . . 17
2.2 Disperze v optických vláknech . . . 17
2.2.1 Chromatická disperze . . . 18
2.2.2 Polarizační vidová disperze . . . 18
2.2.3 Vidová disperze . . . 19

3 Optical Time Domain Reflectometer **20**
3.1 Složení přístroje OTDR . . . 20
3.1.1 Optický vysílač . . . 21
3.1.2 Optický přijímač . . . 21
3.1.3 Optický cirkulátor . . . 21
3.1.4 Řídící jednotka . . . 21
3.2 Mrtvá zóna . . . 21
3.2.1 Event dead zone (EDZ) . . . 22
3.2.2 Attenuation dead zone (ADZ) . . . 22
3.3 Dynamický rozsah . . . 23
3.4 Vlnová délka . . . 23
3.5 Zobrazení měřených dat . . . 23

4 Návrh OTDR založen na platformě Red Pitaya **24**
4.1 Red Pitaya . . . 24
4.1.1 Popis zařízení . . . 25
4.2 Deska Koheron s laserem a fotodetektorem . . . 25
4.3 Optický cirkulátor . . . 26
4.4 Konektory UPC a APC . . . 26

4.5 LabView 27

5 Programové řešení **28**
5.1 Generování pulzu 28
5.2 Spojení s Red Pitayou a konfigurace signálu 28
5.3 Průměrování 29
5.4 Přímá metoda 30
5.5 Metoda OTDR 32

6 Laboratorní úloha **35**
6.1 Cíl úlohy 35
6.2 Teoretický úvod 35
6.3 Pracovní postup 36
6.4 Seznam použitých přístrojů 38
6.5 Závěr 38
6.6 Literatura 38

Závěr **39**

Literatura **40**

Seznam symbolů, veličin a zkratek **42**

Seznam příloh **44**

A Přímá metoda **45**

B Metoda OTDR **47**

C Obsah elektronické přílohy **49**

Seznam obrázků

1.1 Základní zapojení optického spoje 10
1.2 Struktura optického vlákna 11
1.3 Jednovidové vlákno 11
1.4 Mnohavidové vlákno se skokovou změnou indexu 12
1.5 Gradientní mnohavidové vlákno s proměnným indexem lomu 12
1.6 Příklady různých profilů indexů lomu 13
2.1 Útlum ve vláknových světlovodech 14
2.2 Rayleighův a Mieův rozptyl 17
2.3 Chromatická disperze 18
2.4 Polarizační vidová disperze 19
2.5 Rozšíření výstupních impulzů vlivem vidové disperze 19
3.1 Přístroj OTDR Yokogawa AQ7270 20
3.2 Princip měření pomocí OTDR 20
3.3 Mrtvá zóna 22
3.4 Změřený průběh útlumu 23
4.1 Hlavní stránka uživatelského rozhraní Red Pitaya 24
4.2 Popis konektorů zařízení Red Pitaya 25
4.3 Deska Koheron s laserem a fotodetektorem 26
4.4 Schéma cirkulátoru 26
4.5 Schéma cirkulátoru 27
5.1 Část grafického zdrojového kódu – generování pulzu 28
5.2 Část grafického zdrojového kódu – spojení a konfigurace signálu . . . 29
5.3 Průměrování vygenerovaných signálů 30
5.4 Blokové schéma zapojení – přímá metoda 30
5.5 Výpočet délky vlákna – přímá metoda 31
5.6 Ukázka zapojení pro přímou metodu 31
5.7 Přední panel pro měření přímou metodou 32
5.8 Blokové schéma zapojení – metoda OTDR 32
5.9 Výpočet vzdálenosti kurzorů 33
5.10 Ukázka zapojení pro metodu OTDR 33
5.11 Měření vlákna o délce 8 km metodou OTDR 34
6.1 Příklad změřeného průběhu 35
6.2 Popis desky Koheron 36
A.1 Blokové diagram přímé metody 45
A.2 Přední panel přímé metody 46
B.1 Blokové diagram metody OTDR 47
B.2 Přední panel metody OTDR 48

Úvod

Cílem bakalářské práce je teoretický rozbor zařízení OTDR a následné sestavení zapojení za pomoci platformy Red Pitaya s využitím laseru, fotodetektoru a optického cirkulátoru.

První kapitola je zaměřena na základní popis optických vláken, která již v oblasti komunikací postupně nahrazují metalická vedení. Je zde popsána základní stavba optického vlákna a podrobný popis druhů optických vláken.

Druhá kapitola popisuje přenosové vlastnosti optických vláken, tedy jevy, kvůli kterým dochází k útlumu a disperzi v optických vláknech. Důležitá je zejména kapitola Fresnelův odraz, čehož využívá zařízení OTDR k určení místa přerušení vlákna.

Třetí kapitola se zabývá podrobným popisem zařízení OTDR, tedy složením tohoto přístroje a principem jeho fungování. Kapitoly dynamický rozsah a vlnová délka vysvětlují, jak dlouhé vlákno je možné měřit a na kterých vlnových délkách se vlákna testují.

Čtvrtá kapitola přibližuje zařízení, která byla v rámci práce použita. Jedná se o zařízení Red Pitaya, desku s laserem Koheron, optický cirkulátor. Dále je v této kapitole stručně popsáno vývojové prostředí Labview, které bylo použito k vytvoření výsledného programu a srovnání dvou typů konektorů pomocí kterých se optická vlákna spojují.

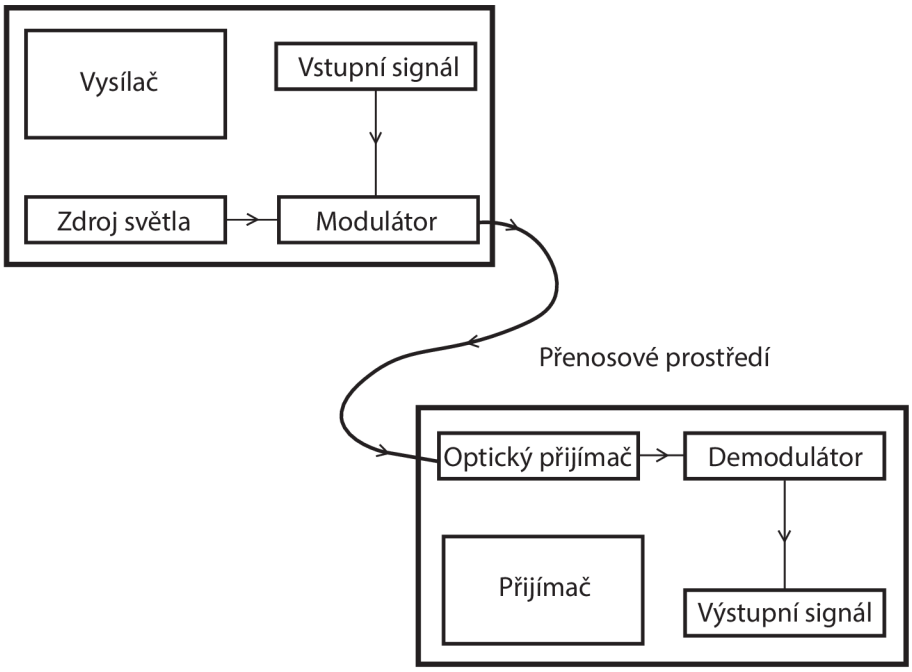
V páté kapitole je rozebrán vytvořený program. Jsou zde vysvětleny jednotlivé části kódu a následně popsány obě metody měření délky vlákna, tedy metoda přímá a metoda OTDR.

Šestá kapitola obsahuje návrh laboratorní úlohy, která slouží k seznámení s problematikou zařízení OTDR a následně k vlastnímu měření pomocí vytvořeného programu. V rámci laboratorní úlohy si studenti vyzkoušejí práci se zařízením OTDR.

1 Optická vlákna

Optické vlákno je vyrobeno z křemičitého skla, které obsahuje různé příměsi, nebo z plastu. Nosičem informace při optickém přenosu je optické záření. Rozdíl mezi signálem elektrickým a světelným je u nositelů signálu, u galvanické vazby jsou nositeli signálu elektricky nabité elektrony, u optické vazby elektricky nabité fotony. V dnešní době v oblasti komunikací již optická vlákna nahrazují klasické metalické vedení. Hlavními důvody jsou přenosové rychlosti, menší náchylnost k elektromagnetickému rušení a menší pravděpodobnost odposlechu.

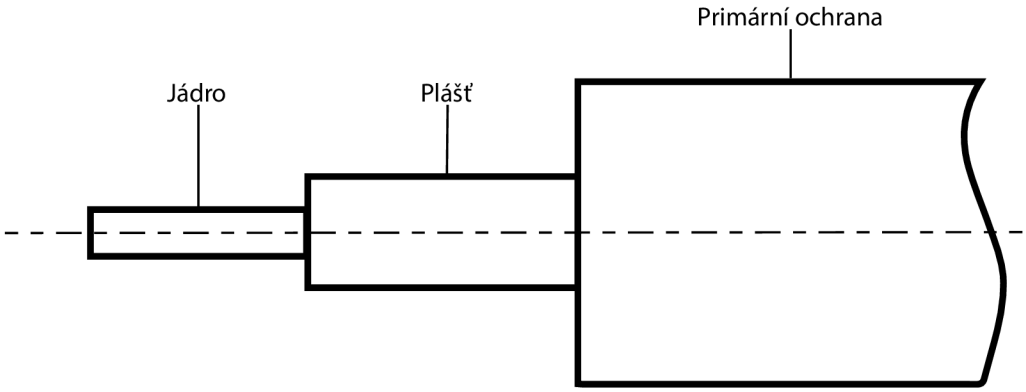
Optický spoj je tvořen modulovaným zdrojem záření, optickým prostředím a přijímačem záření. Vysílací a přijímací části optického systému musí převést optický signál z vysílače do optického prostředí a na fotodetektor přijímače s co nejnižšími ztrátami [1].



Obr. 1.1: Základní zapojení optického spoje [1].

1.1 Stavba optického vlákna

Optické vlákno se skládá z jádra, pláště, primární a sekundární ochrany. Optické vlákno se vyrábí z křemíku a tzv. legovacích příměsí, jako například oxid germaničitý, oxid boritý, oxid fosforečný a další. Tyto legovací příměsi ovlivňují přenosové vlastnosti optického vlákna. Existují i plastová optická vlákna, která jsou sice levnější, ale moc se nepoužívají, především kvůli většímu útlumu [1].



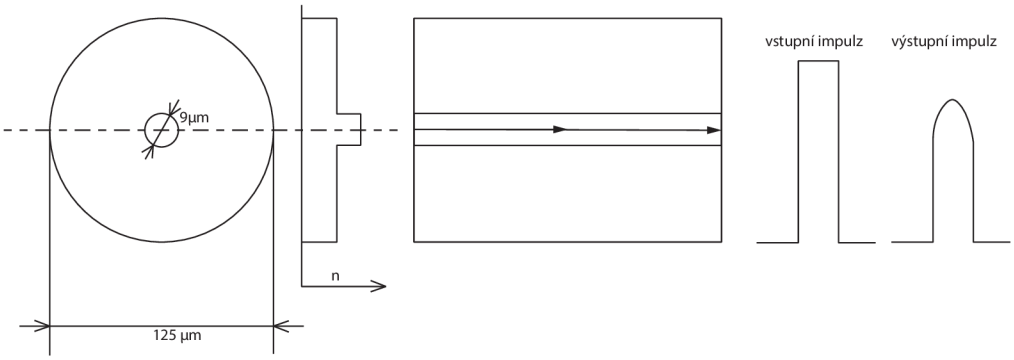
Obr. 1.2: Struktura optického vlákna [2].

1.2 Druhy optických vláken

Optická vlákna se rozdělují podle technologie druhu přenosu na tři základní typy konstrukcí: jednovidové, mnohovidové s konstantním indexem lomu jádra a pláště a na gradientní s proměnným indexem lomu. Rozdíl mezi konstrukcemi je především ve velikosti jádra a počtu vidů, které se vláknem šíří [1].

1.2.1 Jednovidová optická vlákna

Jednovidová optická vlákna mají malý průměr jádra a umožňují proto přenos pouze jednoho vidu ve směru osy. Jednovidová vlákna se využívají zejména pro dálkové přenosy, protože se vyznačují velmi malou disperzí, velmi malým útlumem a vysokou přenosovou kapacitou. Průměr jádra se pohybuje kolem hodnot $D_j = 7 - 9\,\mu$m a průměr pláště kolem hodnoty $D_p = 125\,\mu$m jak je znázorněno na obrázku 1.3 [1].

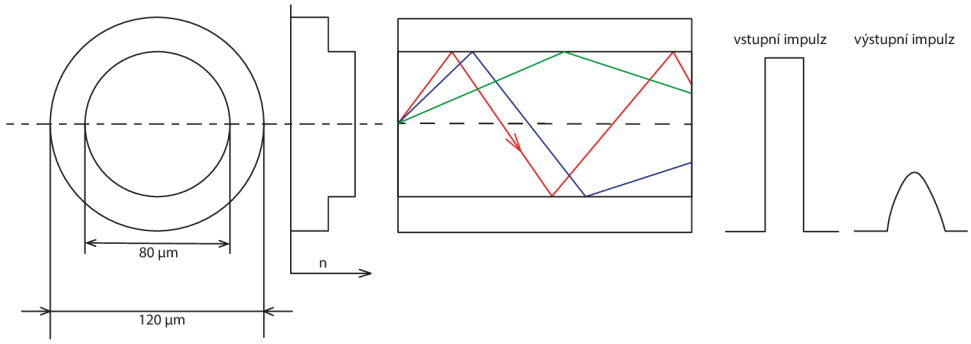


Obr. 1.3: Jednovidové vlákno [3].

1.2.2 Mnohovidová optická vlákna

Mnohovidová optická vlákna se skokovou změnou indexu lomu

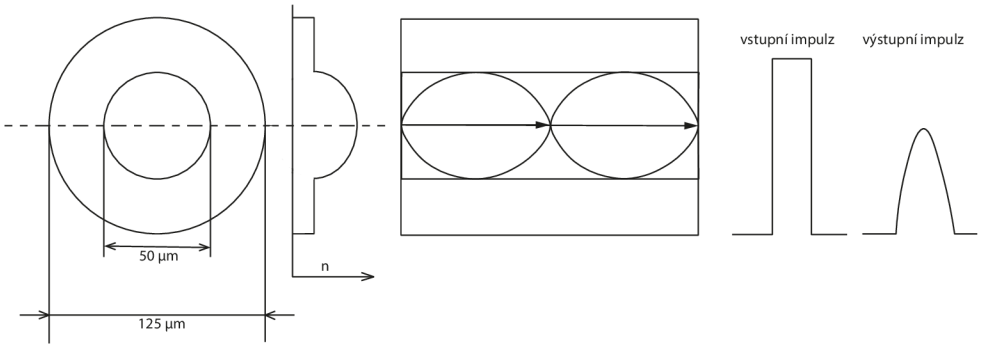
Zvětšením průměru jádra se zvyšuje také počet vidů, které se mohou vláknem šířit. Mnohohovidová vlákna se skokovou změnou indexu lomu jsou jednoduché na výrobu a manipulaci, nicméně nevýhodou je větší útlum, disperze a malá přenosová kapacita, proto jsou tato vlákna využívána k přenosu dat zejména na krátkých vzdálenostech. Přenos dat je v těchto vláknech založen na principu úplného odrazu jádro–plášť. Průměr jádra se pohybuje kolem hodnot $D_j = 50 - 200\,\mu$m a průměr pláště kolem hodnoty $D_p = 120 - 300\,\mu$m jak je znázorněno na obrázku 1.4 [1].



Obr. 1.4: Mnohavidové vlákno se skokovou změnou indexu [3].

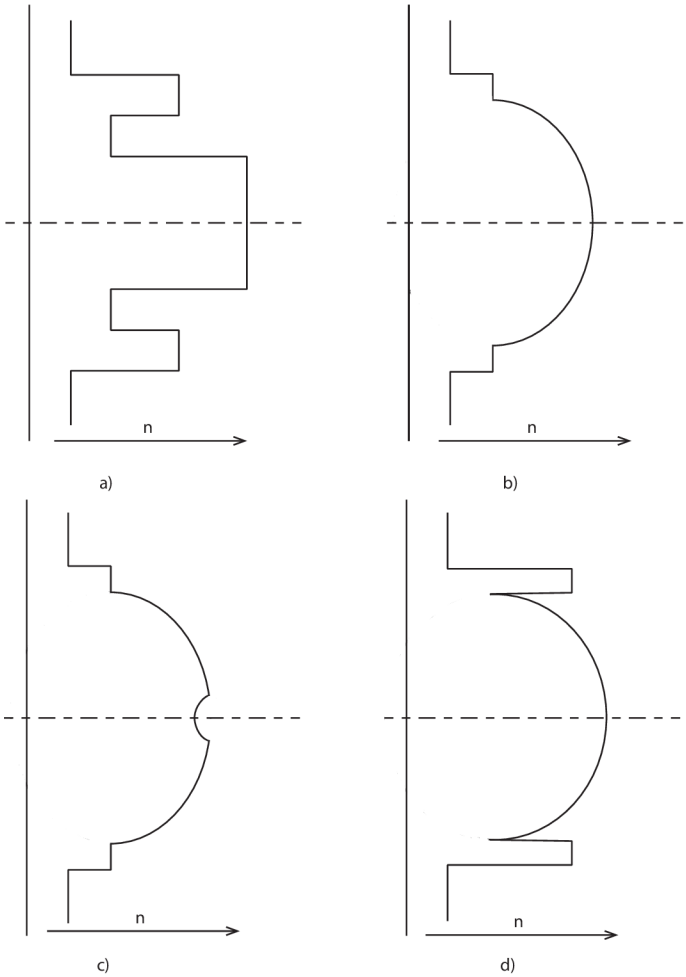
Gradientní optická vlákna

Gradientní optická vlákna, neboli mnohovidová vlákna s proměnným indexem lomu jsou složitější na výrobu, konstruování a spojování vláken. Mají menší disperzi a menší útlum, využívají se proto na kratší vzdálenosti především v telekomunikaci. U vláken tohoto typu má dráha paprsku tvar eliptické nebo kruhové spirály. Rozměry jádra a pláště jsou normalizovány $D_j = 50\,\mu$m a $D_p = 125\,\mu$m [1].



Obr. 1.5: Gradientní mnohavidové vlákno s proměnným indexem lomu [3].

Vzhledem k tomu, že přenosové vlastnosti jsou závislé na průběhu rozložení indexu lomu, aplikují výrobci různé profily indexu lomu, viz obrázek 1.6. Například na obrázku 1.6a můžeme vidět vlákno, které se používá jako alternativa jednovidových vláken [1].



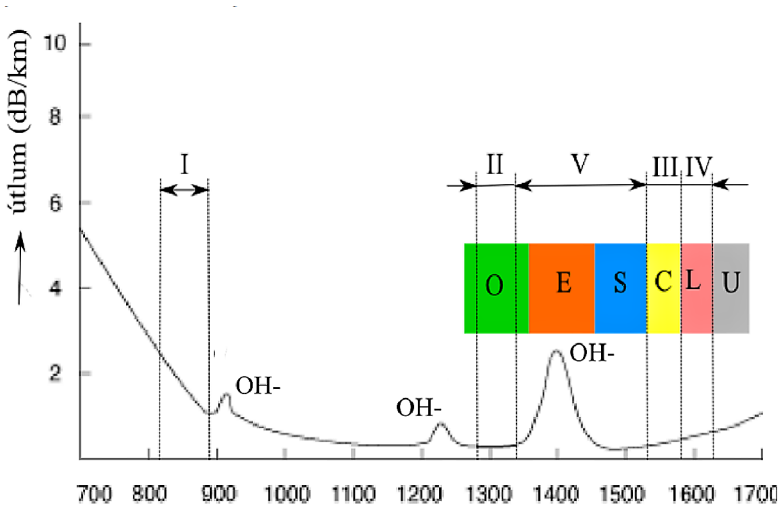
Obr. 1.6: Příklady různých profilů indexů lomu [1].

2 Přenosové vlastnosti optického vlákna

2.1 Útlum optických vláken

Podobně jako u metalického vedení klesá výkon přenášeného signálu v závislosti s přibývající vzdáleností i u vedení optického. Útlum v optických vláknech je způsobován především absorpcí prostředí, v němž se záření šíří, vyzařováním z vlákna, rozptylem na nehomogenitách a odrazem, například od konektorů. Vliv na útlum má také teplota. Při běžných teplotních podmínkách k útlumu nedochází, pouze při velkém mrazu (při –30 °C) nebo při vysokých teplotách (nad 70 °C). Útlum se zpravidla uvádí v dB/km [1]. Jedná se o poměr přijatého a vyslaného výkonu pro danou vlnovou délku:

$$A = 10\log_{10}\frac{P_1}{P_2}, \tag{2.1}$$



Obr. 2.1: Útlum ve vláknových světlovodech [4].

Tab. 2.1: Jednotlivá pásma vlnových délek jednovidových optických vláken [1].

Pásmo	**Název**	**Rozsah [nm]**
O	Original	1260–1360
E	Extended	1360–1460
S	Short	1460–1530
C	Convetional	1530–1565
L	Long	1665–1625
U	Ultralong	1625–1675

Vlnová okna zobrazená na obr. 1.1.:

- **I. okno (850 nm)** patří do mnohavidového šíření, má klesající útlumovou charakteristiku.
- **II. okno (1280–1350 nm)** využívá se pro jednovidový přenos na velké vzdálenosti.
- **III. okno (1530–1565 nm)** okno, ve kterém se nachází minimum měrného útlumu (0,19–0,22 dB/km). Využívá se pro dálkové přenosy.
- **IV. okno (1565–1625 nm)** okno, ve kterém je absolutní minimum měrného útlumu (od okna III. se liší jen minimálně). Spojením okna III. a IV. lze přenosovou kapacitu téměř zdvojnásobit.
- **V. okno (1335–1530 nm)** je pro přenos dostupné teprve od konce 90. let. Spojením oken II. až V. se vytváří souvislý přenosový kanál o šířce pásma až 50 THz [1].

Pro tyto přenosy pak máme podle doporučení ITU-T (skupina G), tato jednovidová vlákna:

- **G.652** – Standardní jednovidové vlákno, které je někdy také označováno zkratkou USF (Unshifted Fiber).
- **G.652.C** – Vlákno, které lze na rozdíl od G.652 provozovat v celém rozsahu vlnových délek a přenosových pásem, včetně pásma E (1360–1460 nm), což dříve nebylo možné, protože klasická vlákna mají v tomto pásmu zvýšený vložný útlum způsobený rezonancí.
- **G.652.D** – Toto vlákno je kompatibilní se všemi vlákny G.652 (tzv. All Wave).
- **G.653** – U těchto vláken je potlačena chromatická disperze pro vlnovou délku 1550 nm. Označují se jako DSF (Dispersion Shifted Fiber). Využívají se pro vyšší přenosové rychlosti na větší vzdálenosti s jedinou vlnovou délkou.
- **G.654** – Jedná se o speciální variantu vlákna G.652. Tato vlákna mají posunutou mezní vlnovou délku a jsou optimalizována pro co nejnižší vložný útlum v pásmu 1550 nm.
- **G.655** – Vlákna s posunutou nenulovou disperzí (NZ-DSF, Non Zero-Dispersion Shifted Fiber). Tato vlákna jsou optimalizována pro přenosovou oblast v pásmu 1550 nm. Používají se v dálkových optických sítích.
- **G.656** – Jedná se také o vlákna NZ-DSF. Jsou optimalizována pro přenosovou oblast v pásmu 1460–1625 nm.
- **G.657.A** – Vlákna tohoto typu se používají pro vnitřní kabeláž a optické přístupové sítě.
- **G.657.C** – Jedná se o nový typ vlákna, které je odolné na mikroohyby do poloměru 5 mm [1].

2.1.1 Absorpce

Absorpci můžeme rozdělit do dvou skupin:

- Vlastní absorpce
- Nevlastní absorpce

Vlastní absorpce

Jedná se o absorpci v infračervené, ultrafialové oblasti a absorpci vlastním materiálem SiO_2. Velmi malé jsou absorpce skleněným materiálem. V ultrafialové oblasti je absorpce větší, je způsobena absorpcí valenčními elektrony. V oblasti infračervené je absorpce způsobena kmitáním celých molekulových útvarů.

Nevlastní absorpce

Nevlastní absorpce je způsobena nečistotami v optickém materiálu, které do něj pronikají během výroby. Největší vliv mají ionty kovů Fe, Cu, Cr a zejména ionty OH (vodní ionty). Ionty OH vytvářejí ve skle mikrotrhliny, díky nimž jsou skleněné materiály náchylné k praskání.

2.1.2 Rozptyl

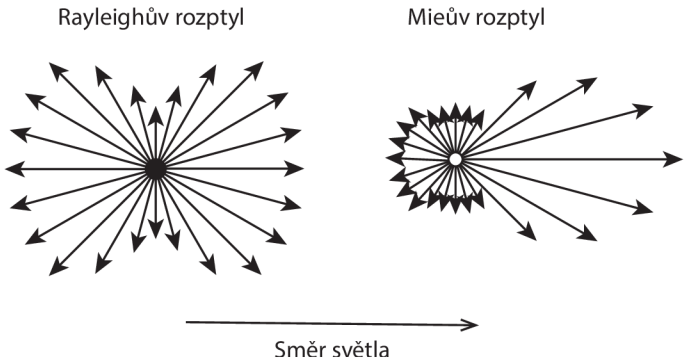
Ztráty rozptylem jsou způsobeny tím, že náhodně rozložené molekuly tvoří mikronehomogenity indexu lomu materiálu. Světelné paprsky se při dopadu na tyto nehomogenity roztříští do všech stran a tím dochází ke ztrátám. Existuje několik druhů rozptylů jako např.: Mieův, Comptonův, Rayleighův atd. [1].

Rayleighův rozptyl

Rayleighův rozptyl vzniká tehdy, jsou-li nehomogenity a drobné nečistoty rozměrově malé proti vlnové délce. Tento rozptyl nelze odstranit, můžeme ho pouze částečně eliminovat posunem pracovní frekvence do infračervené oblasti [5].

Mieův rozptyl

Mieův rozptyl vzniká kvůli mikroskopickým bublinkám ve vlákně, napětí ve vlákně a nedokonalé cylindrické struktuře světlovodu. Tento typ rozptylu je způsoben nedokonalostmi z výroby [5].



Obr. 2.2: Rayleighův a Mieův rozptyl [6].

2.1.3 Fresnelův odraz

Při průchodu světla v optickém vláknu se až 4 % světelného výkonu odráží zpátky ke zdroji světla. To je způsobeno rozdílnou hustotou materiálu (například vzduchu). Tyto náhlé změny se objevují na koncích vlákna, při přerušení vlákna a na spojovacích bodech. Množství odrazu závisí na velikosti změny hustoty (popsáno indexem lomu-větší index lomu=větší hustota) a na velikosti úhlu, pod kterým světlo narazí na rozhraní dvou materiálů. Fresnelův odraz využívá OTDR k přesnému určení polohy přerušení optického vlákna [7].

2.1.4 Ohybové ztráty

U ohybových ztrát dochází ke změně úhlu šíření ve vlákně a tím je porušena podmínka totálního odrazu. Díky tomu se paprsek láme do pláště, což zapříčiní to, že na výstup se dostane méně paprsků, než jich bylo na vstupu. K zamezení velkých ztrát je třeba vlákno ohýbat s co největším poloměrem a dbát na pokyny výrobce. Ohyby můžeme dělit na mikroohyby a makroohyby.

V případě mikroohybových ztrát se jedná o poruchy přímočarosti vlákna či malé chyby v geometrii vlákna. Vznikají během výroby nebo působením okolních elementů.

Makroohybové ztráty vznikají při práci s optickými vlákny. Při ohybu vlákna pod mez poloměru křivosti, může dojít k vyzařování energie z vlákna, čímž dochází k útlumu [5].

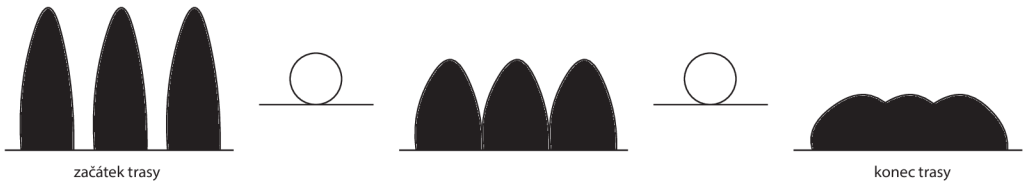
2.2 Disperze v optických vláknech

Disperze v optických vláknech je hlavní příčinou zkreslení přenášeného signálu. Je definována jako rozdíl šířky impulzu v polovině výšky, na konci a na začátku vlákna.

Disperze je jedním z nejdůležitějších parametrů optických vláken, protože určuje šířku přenášeného pásma a tím přenosovou rychlost [1].

2.2.1 Chromatická disperze

Chromatická disperze nejsilněji omezuje přenosovou rychlost v jednovidových optických vláknech. Chromatická disperze je dána tím, že se různé spektrální složky signálu (odlišných vlnových délek) šíří vláknem rozdílnou rychlostí. Vstupní impuls, který vždy obsahuje více spektrálních složek se bude časově roztahovat a to díky tomu, že některé spektrální složky se budou zpožďovat oproti jiným. Tímto zdeformovaný impuls bude zasahovat do vedlejších bitových mezer a dojde ke zkreslení přenášené informace. viz obr. 2.3.



Obr. 2.3: Chromatická disperze [8].

Velikost chromatické disperze optického vlákna charakterizuje tzv. koeficient chromatické disperze:

$$D(\lambda) = \frac{\mathrm{d}t_{\mathrm{g}}(\lambda)}{\mathrm{d}\lambda}, \tag{2.2}$$

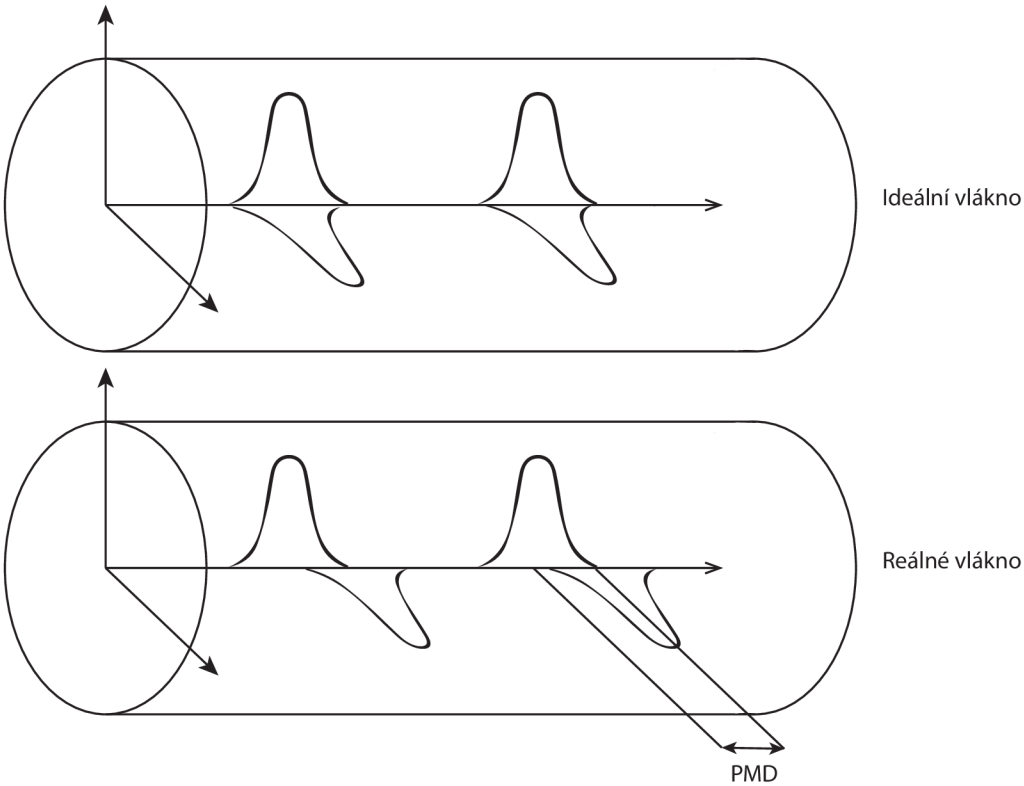
který udává změnu skupinového zpoždění signálu t_{g} při průchodu vláknem v závislosti na vlnové délce λ. Chromatická disperze je tvořena disperzí materiálovou a vlnovodovou.

Materiálová disperze je způsobena závislostí indexu lomu materiálu vlákna na vlnové délce.

Vlnová disperze je způsobena geometrickými vlastnostmi optických vláken [1][8].

2.2.2 Polarizační vidová disperze

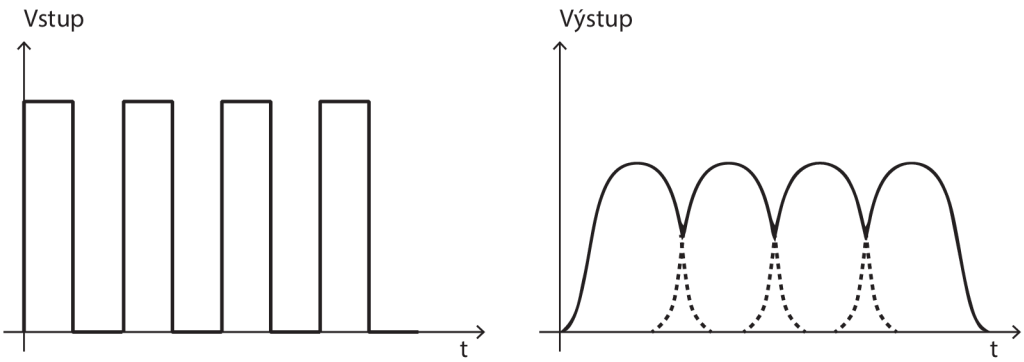
Polarizační vidová disperze se projevuje u jednovidových vláken. Vid se ve vlákně šíří ve dvou vzájemně kolmých polarizačních rovinách. Každá kruhová nesymetrie vlákna (z výroby, mikroohyby, špatné uložení kabelu) způsobí šíření obou polarizací jinou rychlostí a tím rozšíření impulzu a zkreslení signálu. Polarizační vidová disperze je menší než ostatní druhy disperze [9].



Obr. 2.4: Polarizační vidová disperze [9].

2.2.3 Vidová disperze

Vidová disperze se projevuje u mnohovidových vláken. Paprsky dorazí na konec vlákna v různých časových okamžicích a to kvůli rozdílnosti délek drah paprsků. Dochází ke zkreslení výstupního impulzu. Vidová disperze omezuje mezní šířku pásma, přenosovou rychlost nebo vzdálenost na kterou data přenášíme. Tato disperze lze zmenšit uspořádáním vlákna (použitím vlákna gradientního) [9].

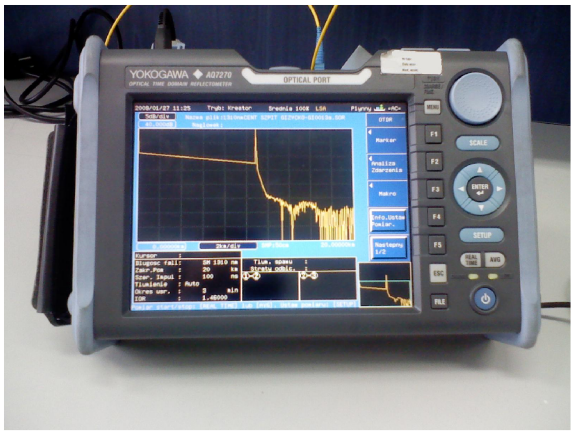


Obr. 2.5: Rozšíření výstupních impulzů vlivem vidové disperze [9].

3 Optical Time Domain Reflectometer

Optical Time Domain Reflectometer (OTDR) neboli optický reflektometr, je přístroj, který se používá k měření různých parametrů optických vláken. Díky OTDR můžeme lokalizovat poruchy na optické trase, měřit délku vlákna atd. [1].

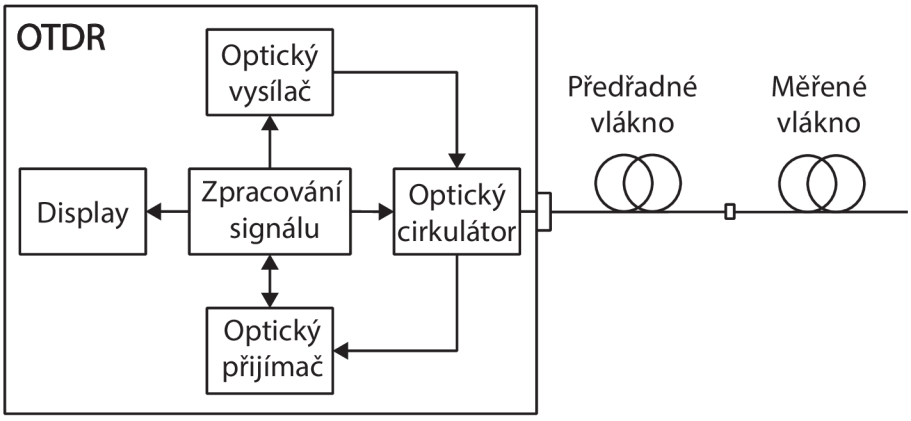
Nežádoucím jevem pro měření útlumu jsou Fresnelovy odrazy viz kapitola 2.1.3, naopak jsou vhodné pro lokalizaci poruch a měření délky. V současné době existuje velké množství různě dokonalých OTDR měřících přístrojů [10].



Obr. 3.1: Přístroj OTDR Yokogawa AQ7270 [11].

3.1 Složení přístroje OTDR

Přístroj OTDR se skládá z optického vysílače, optického cirkulátoru, optického přijímače, displeje a řídící jednotky.



Obr. 3.2: Princip měření pomocí OTDR [1].

3.1.1 Optický vysílač

Laserová dioda vysílá světelné impulzy. Důležité je nastavení šířky vysílaných impulzů. Šířka musí být zvolena v závislosti na celkové délce optické trasy (celkovému útlumu). Šířka impulzů určuje rozlišovací schopnost OTDR, což je dáno vztahem:

$$\Delta z = \frac{v \cdot T_p}{2}, \tag{3.1}$$

kde Δz je prostorové rozlišení, T_p je šířka pulzu a v je rychlost světla v optickém vlákně [1].

Některé přístroje OTDR obsahují dvě diody, což umožňuje měření na dvou různých vlnových délkách. V jeden moment je ovšem možné použít pouze jednu diodu. Mezi diodami lze snadno přepínat zmáčknutím tlačítka [7].

3.1.2 Optický přijímač

Jedná se o fotodetektor, který měří výkon světla, které se vrací z testovaného vlákna. Přeměňuje optický výkon na odpovídající elektrickou úroveň, čím větší je optický výkon, tím větší je elektrická úroveň. OTDR senzory jsou speciálně navržené pro měření velmi nízkých úrovní odraženého signálu. Přijímač dále obsahuje zesilovač, který umožňuje zvýšení elektrické úrovně [7].

3.1.3 Optický cirkulátor

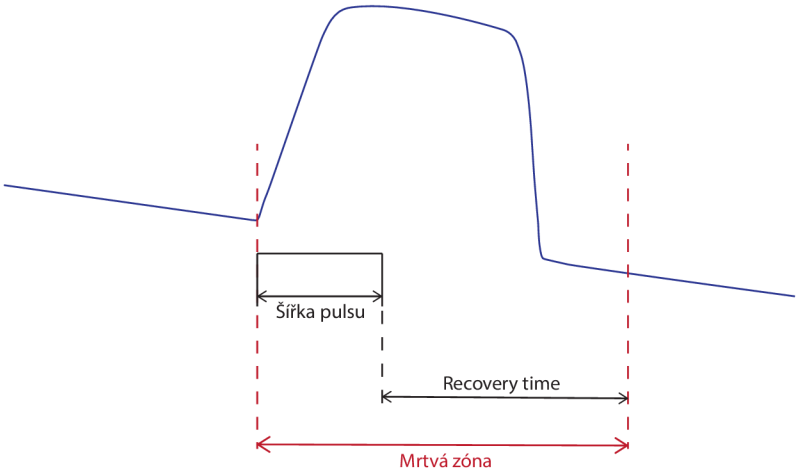
Optický cirkulátor umožňuje světlu cestovat pouze určitými směry, z optického vysílače do měřeného vlákna, z měřeného vlákna do optického přijímače. Světlo nemůže projít z vysílače rovnou do přijímače, nejprve musí projít testovaným vláknem a následně putuje zpětný odraz a Fresnelovy odrazy do přijímače [7].

3.1.4 Řídící jednotka

Řídící jednotka je mozkem celého zařízení OTDR. Určuje vysílači kdy má vyslat pulz, získává elektrické pulzy z optického přijímače, vypočítává vzdálenosti rozptylu a odrazu a posílá tato data displeji, který slouží ke zobrazení naměřených dat [7].

3.2 Mrtvá zóna

Mrtvá zóna je vzdálenost za výstupním konektorem zařízení OTDR, ve které nelze měřit. Vzhledem k tomu, že nelze zcela odstranit první Fresnelův odraz od prvního kontaktu, světlo odražené zpět způsobí saturaci detektoru. K obnovení ze saturovaného vztahu, potřebuje fotodioda čas na obnovení tzv. recovery time [1].



Obr. 3.3: Mrtvá zóna [1].

Velikost mrtvé zóny je závislá na šířce pulzu viz tabulka 3.1. Mrtvou zónu lze eliminovat použitím předřadného vlákna. Na předřadné vlákno se napojí vlákno měřené. Mrtvá zóna se projeví pouze ve vlákně předřadném [1].

Tab. 3.1: Závislost mrtvé zóny na šířce pulsů u OTDR [1].

Šířka pulsů	**Mrtvá zóna**
1 ns	0,15 m
10 ns	1,5 m
100 ns	15 m
1 μs	150 m
10 μs	1,5 km
100 μs	15 km

3.2.1 Event dead zone (EDZ)

Jedná se o minimální vzdálenost od Fresnelova odrazu před dalším Fresnelovým odrazem, který je možné detekovat. Udává, za jak dlouho po odrazu můžeme detekovat další odraz [7].

3.2.2 Attenuation dead zone (ADZ)

Útlumová mrtvá zóna udává minimální vzdálenost, za kterou můžeme po odrazu měřit neodrazivou událost, například svár [1]. Útlumová mrtvá zóna (ADZ) je vždy delší než „event dead zone“, protože detektor se potřebuje plně obnovit [7].

3.3 Dynamický rozsah

Dynamický rozsah určuje jak dlouhé vlákno můžeme měřit. Udává se v dB – čím vyšší hodnota dynamického rozsahu, tím delší vlákno můžeme měřit. Testovací pulz musí být dostatečně silný, aby se dostal až na konec vlákna. Senzor musí být dostatečně kvalitní, aby dokázal zachytit i ty nejslabší odražené signály, které se odráží z konce dlouhého vlákna. Síla testovacího pulzu a citlivost senzoru určuje dynamický rozsah [7].

3.4 Vlnová délka

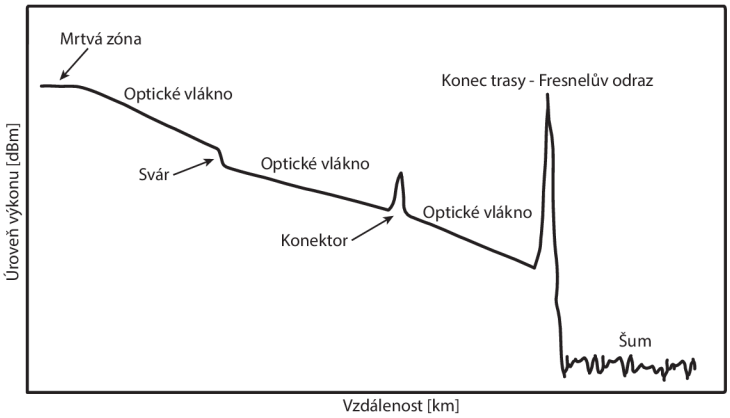
Optické vlákno je nejčastěji testováno na třech vlnových délkách: 850 nm, 1300 nm a 1550 nm. Mnohavidová vlákna se měří na vlnových délkách 850 nm a 1300 nm. Jednovidová vlákna na vlnových délkách 1300 nm a 1550 nm.

Měřící vlnová délka se udává jako centrální vlnová délka a šířka čáry. Šířka čáry jsou vlnové délky, které se šíří kolem centrální vlnové délky. Například pokud má laser centrální vlnovou délku 1300 nm a šířku čáry 20 nm, bude zahrnovat vlnové délky 1290 nm až 1310 nm.

Ztráty v optickém vlákně závisí na vlnové délce. Je důležité, aby optické vlákno bylo testováno na zhruba stejné vlnové délce, na které bude následně využíváno, Nejlépe můžeme tyto ztráty pozorovat při měření stejné trasy vlákna, ale při jiných vlnových délkách [7].

3.5 Zobrazení měřených dat

Přístroj OTDR dokáže identifikovat síťové prvky, sváry, konektory. Ostrý pokles výkonu symbolizuje optický svar. Konektor indikuje výkonová špička [12].



Obr. 3.4: Změřený průběh útlumu [12].

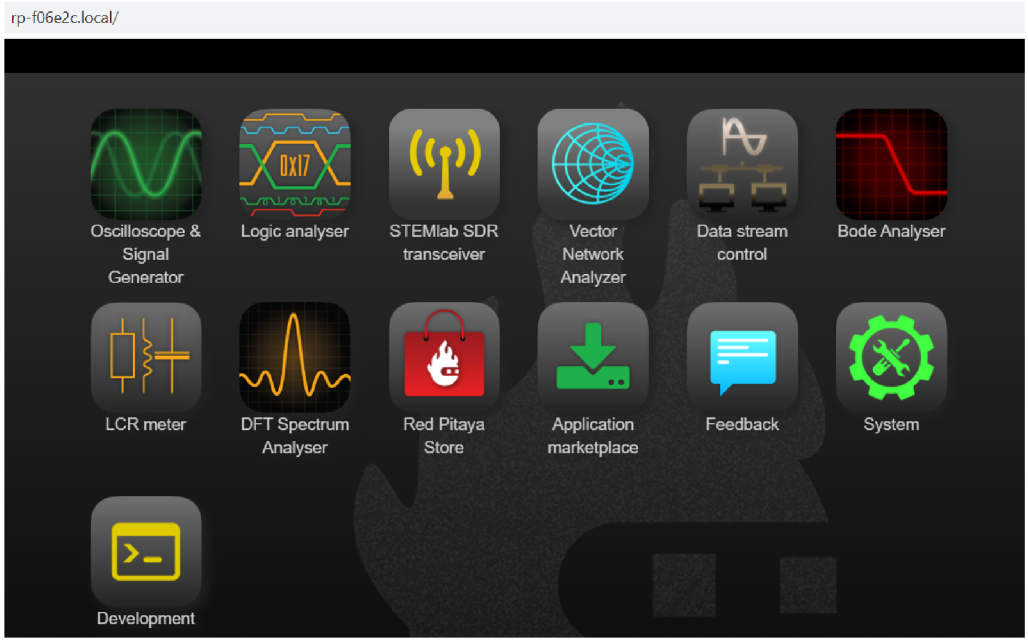
4 Návrh OTDR založen na platformě Red Pitaya

Návrh zařízení OTDR byl vytvořen za pomoci zařízení Red Pitaya, optického cirkulátoru a programu LabView.

4.1 Red Pitaya

Jedná se o open-source hardware, který je možné využít pro velké množství laboratorních úloh. V této úloze je konkrétně použit typ Red Pitaya STEMlab 125-14. Zařízení může být naprogramováno na velké množství funkcí. Základní webové rozhraní přímo od výrobce nabízí tyto aplikace: osciloskop a generátor signálu, logický analyzátor, bodový analyzátor, DFT spektrální analyzátor, LCR měřič atd. Další aplikace je možné získat z obchodu, tyto aplikace však již nevyvíjí přímo společnost Red Pitaya, nicméně aplikace alespoň testuje.

K zařízení se nejčastěji připojuje pomocí internetu. Zařízení se připojí k routeru pomocí síťového kabelu. Po připojení napájecího kabelu se ve webovém prohlížeči zadá URL adresa, která je napsána přímo na LAN konektoru zařízení. Po načtení se zobrazí hlavní strana uživatelského rozhraní viz obr.4.1.



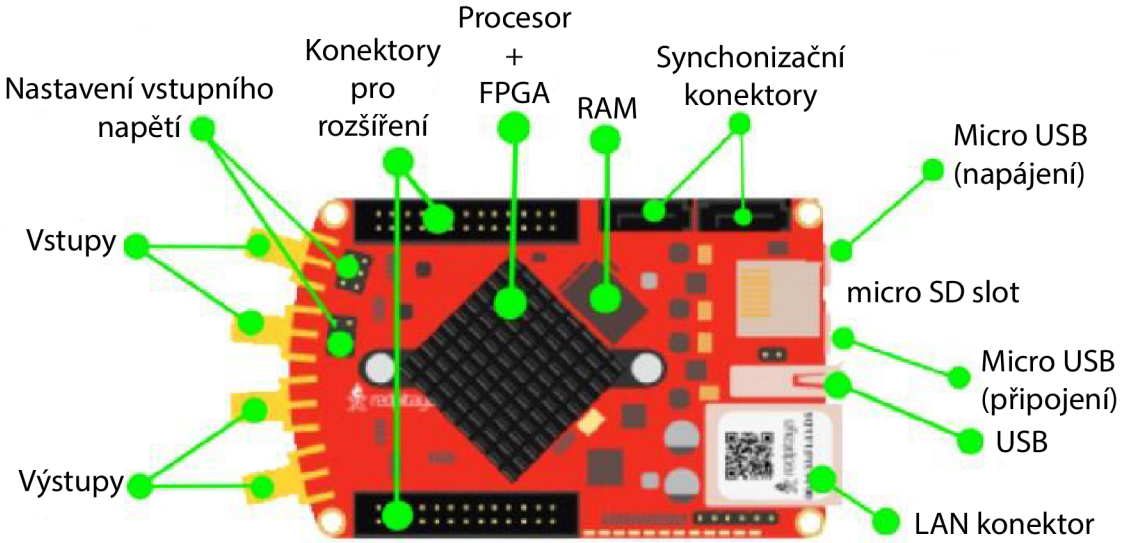
Obr. 4.1: Hlavní stránka uživatelského rozhraní Red Pitaya.

Ovládání zařízení pomocí jiných programů je zajištěno pomocí protokolu SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments). Zapnutí tohoto protokolu se

nachází v sekci Development a následným zvolením možnosti SCPI server. Zde už jen zvolíme RUN a zobrazí se IP adresa, která slouží k připojení zařízení k jiným programům (např. MATLAB, Python, LabView, SCILAB). Pokud je SCPI server zapnutý, není možné používat webové aplikace.

4.1.1 Popis zařízení

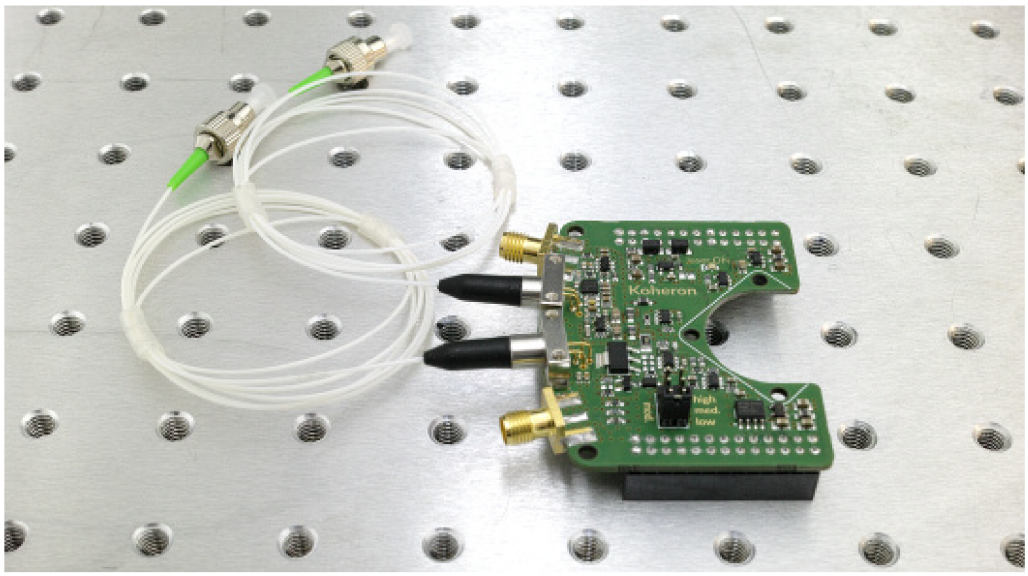
Na obr. 4.2 můžeme vidět popis zařízení Red Pitaya. Zařízení obsahuje dva micro USB porty, jeden pro napájení (5 V/2 A) a druhý pro připojení ke konzole. Vstupní napětí nastavíme zvolením vstupního konektoru, buď na vysokonapěťový (high voltage – 20 V) nebo na nízkonapěťový (low voltage – 1 V). LAN konektor slouží k připojení k internetu pomocí ethernetového kabelu. Na micro SD kartě, která je vložena do příslušného slotu je nahrán operační systém.



Obr. 4.2: Popis konektorů zařízení Red Pitaya [13].

4.2 Deska Koheron s laserem a fotodetektorem

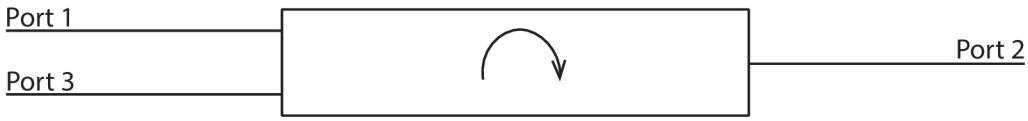
V této práci byla použita deska s laserem od společnosti Koheron. Byl využit typ desky, který je uzpůsoben přímo na zařízení RedPitaya a připojuje se přes konektory pro rozšíření viz obr. 4.2. Deska obsahuje laser s vlnovou délkou 1550 nm a fotodetektor s frekvencí 60 MHz [14].



Obr. 4.3: Deska Koheron s laserem a fotodetektorem [14].

4.3 Optický cirkulátor

Optický cirkulátor je pasivní součástka, která se vyznačuje nízkým útlumem při přenosu optického signálu. Slouží k obousměrnému přenosu signálu v optickém vlákně. Optický cirkulátor má tři porty, které bývají pro přehlednost barevně rozlišeny. Optický signál vstupuje do portu 1, ze kterého je přenesen na port 2. Odtud putuje optický signál do optického vlákna na jehož konci se odrazí a vrací se zpět, do portu 3 [15].



Obr. 4.4: Schéma cirkulátoru [16].

4.4 Konektory UPC a APC

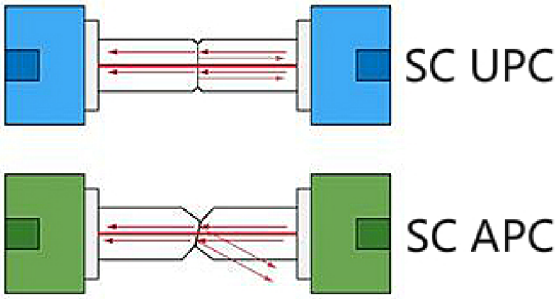
Jestliže se v optické trase nachází konektor dochází ke ztrátě, respektive ke zpětném odrazu zpět ke zdroji světla. Zpětné odrazy též narušují přenášený signál. Různé povrchové úpravy a leštění můžou velikost zpětného odrazu snížit [17].

Konektor UPC

Konektory UPC jsou leštěny bez úhlu, což znamená, že odražené světlo se vrací zpět přímo ke zdroji. Tyto konektory bývají označeny modrou barvou [17].

Konektor APC

Konektory APC jsou leštěny s úhlem 8°, což znamená, že odražené světlo se odráží do pláště, a ne přímo ke zdroji, jak tomu je u konektorů UPC. Tyto konektory bývají označeny zelenou barvou [17]



Obr. 4.5: Schéma cirkulátoru [18].

V rámci této práce byly využity konektory APC, nicméně vhodnější by byly konektory UPC, jelikož u měření pomocí OTDR je důležité zaznamenat právě odrazy od konektorů zpět ke zdroji.

4.5 LabView

Jedná se o vývojové prostředí, které je založeno na grafickém programovacím jazyce. Program vyvinula společnost National Instruments (NI) a uvedla na trh v roce 1986. Software se skládá ze dvou oken, blokového diagramu, ve kterém se sestavuje kód a předního panelu (front panel), ze kterého se program ovládá. Program LabView jsem si k bakalářské práci vybrala, protože se mi zdá vhodnější na práci se signály, než například program MATLAB. Grafické prostředí mi přijde přehlednější než klasické textové [19].

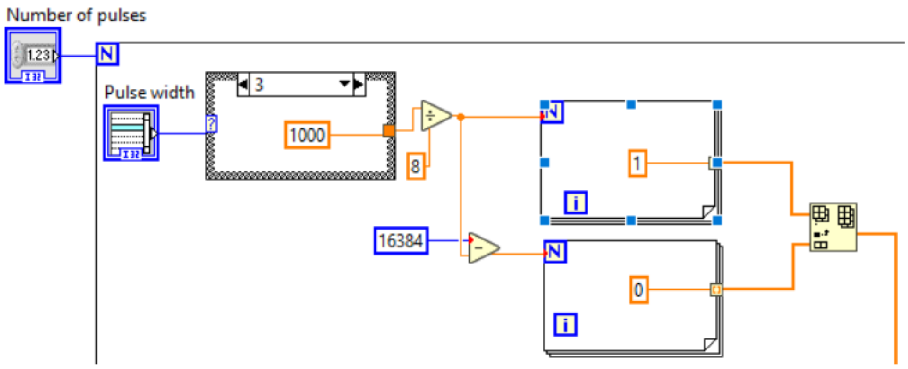
Pro práci s Red Pitayou je třeba do programu LabView naimportovat ovladače, které se následně zobrazí v paletě nástrojů v sekci Instrument I/O.

5 Programové řešení

Výsledný program se skládá ze dvou metod měření délky optických tras a to metody přímé a metody OTDR. Každá metoda má v předním panelu vlastní záložku pro ovládání a zobrazení naměřených dat.

5.1 Generování pulzu

Kód pro generování pulzu se skládá ze dvou cyklů for loop. Jeden cyklus generuje určitý počet jedniček, druhý určitý počet nul. Uživatel si vybere z nabídky Pulse width šířku jednoho pulzu, která je následně vydělena 8 a tím převedena na počet vzorků (samplů). Počet vzorků je následně pomocí prvního for loopu převeden na jedničky. Poté je od celkového množství vzorků (16384) odečten počet vzorků, které jsou převedeny na jedničku a tento počet vzorků je převeden pomocí druhého for loopu na nuly. Výstupy z obou for loopů dále vstupují do terminálu Insert into Array, ze kterého už signál putuje na terminál pro konfiguraci signálu.



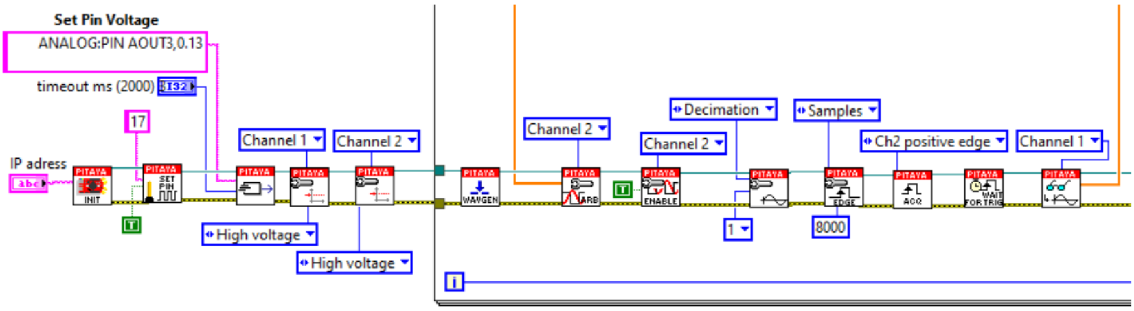
Obr. 5.1: Část grafického zdrojového kódu – generování pulzu.

5.2 Spojení s Red Pitayou a konfigurace signálu

K úspěšnému navázání spojení, konfiguraci signálu a zobrazení signálu slouží tyto terminály:

- **Initialize** – Slouží k založení komunikace s Red Pitayou. Získává IP adresu k připojení k SCPI serveru. Spojení je navázáno pouze jednou, proto je terminál umístěn mimo cyklus while loop.
- **Set DO Pin** – povoluje pin 17, přes který je připojen laser desky Koheron.
- **Set** – slouží k odesílání SCPI příkazů. V tomto případě nastavuje výstupní hodnotu napětí laseru (bias).

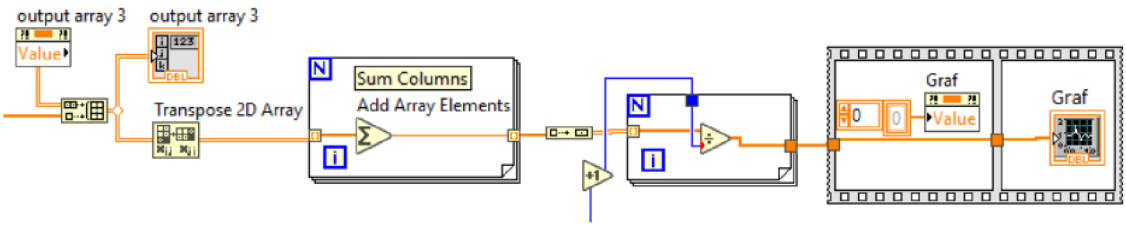
- **Set gain setting** – nastavení hodnoty napětí na high nebo low, odpovídá nastavení vstupního napětí zařízení Red Pitaya viz 4.2.
- **Reset Generator** – Tento terminál restartuje generátor pulzu do původního nastavení.
- **Configure Arbitary Waveform** – Odesílá vygenerovaný signál.
- **Enable Output** – Otevírá nebo uzavírá výstup pro signál pomocí konstanty true nebo false.
- **Configure Acquisition** – Nastavuje získaný signál. Zde je nastavena úroveň decimace na hodnotu 1.
- **Configure Edge Trigger** – Konfiguruje trigger pro náběžnou hranu. Zpoždění je nastaveno na 8000 vzorků.
- **Triggered Acquisition** – Nastavuje trigger a získaná data.
- **Wait for Trigger** – Čeká na trigger, v tomto případě tedy na náběžnou hranu.
- **Read Waveform** – Přijímá nastavený signál a posílá jej k zprůměrování a následnému zobrazení.
- **Close** – Ukončuje spojení Red Pitayi a programu LabView. Terminál je umístěn mimo cyklus while loop, aby nebylo spojení ukončeno po každém proběhnutí programu.



Obr. 5.2: Část grafického zdrojového kódu – spojení a konfigurace signálu.

5.3 Průměrování

Aby bylo měření co nejpřesnější, je třeba vygenerované signály zprůměrovat. O to se stará část kódu na obrázku 5.3. Vygenerované signály, které vystupují z terminálů po konfiguraci viz 5.2, jsou pod sebe ukládány do proměnné array, která je následně transponována a jednotlivé hodnoty proměnné jsou sečteny, tím je získán součet sloupců. Následně jsou tyto součty vyděleny počtem vygenerovaných pulzů, čímž získáváme průměr všech vygenerovaných pulzů, který je následně zobrazen v grafu. Z toho vyplývá, že čím vyšší počet pulzů bude zvolen, tím přesnější bude měření.

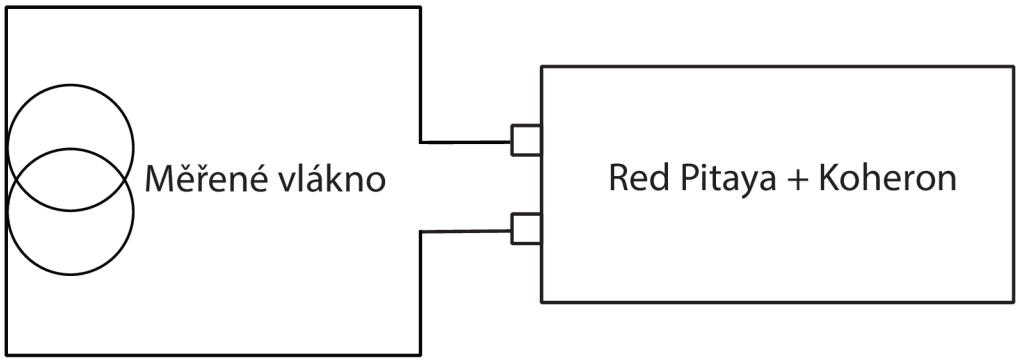


Obr. 5.3: Průměrování vygenerovaných signálů.

Výše popsané části kódů jsou stejné pro obě metody měření. Nyní bude popsáno jak se liší měření vlákna obou metod.

5.4 Přímá metoda

U měření pomocí přímé metody je měřené optické vlákno zapojeno přímo na vstup a výstup desky Koheron viz obr. 5.4



Obr. 5.4: Blokové schéma zapojení – přímá metoda.

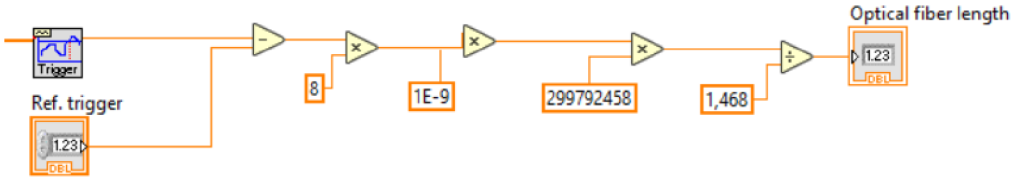
Výsledná délka vlákna je vypočtena z času, za který signál projde optickým vláknem. Výpočet se provádí podle vzorce:

$$l = \frac{c \cdot T}{n}, \tag{5.1}$$

kde l je délka vlákna, c je rychlost světla, T je čas, za který projde signál optickým vláknem a n je index lomu optického vlákna.

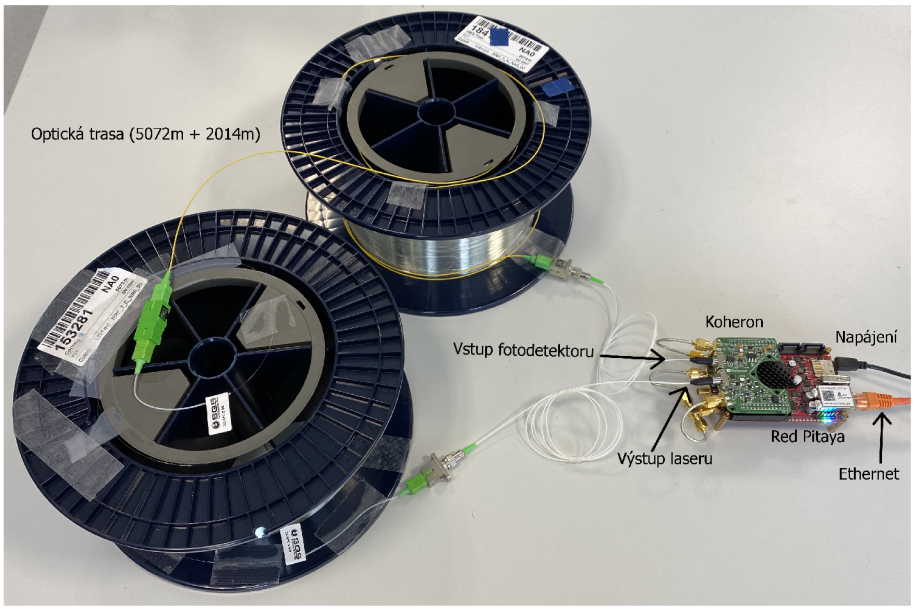
Zjištění času, za který projde signál optickým vláknem je provedeno pomocí detekce náběžné hrany, která se provádí terminálem Basic Level Trigger Detection, do kterého vstupuje zprůměrovaný signál a vystupuje hodnota samplu na kterém se nachází náběžná hrana. Od této hodnoty se odečte referenční hodnota triggeru, neboli délka přípojných optických vláken. Následně je tento počet samplů převeden na nanosekundy (1 sample = 8 nanosekund), ty jsou převedeny na sekundy a je

vypočtena délka optického vlákna viz vzorec 5.1. Část kódu, kde probíhá tento výpočet je na obr. 5.5.



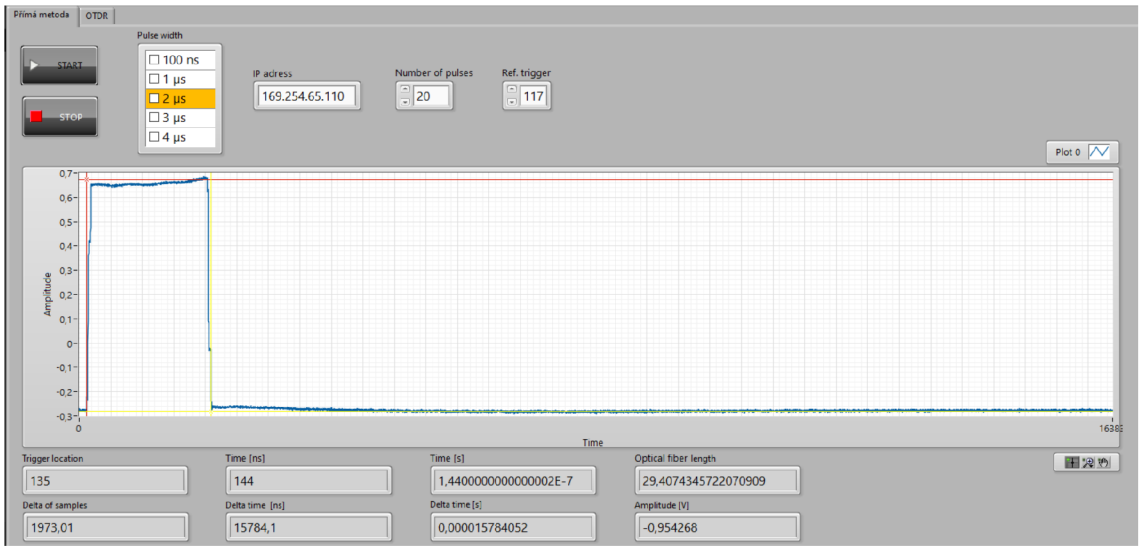
Obr. 5.5: Výpočet délky vlákna – přímá metoda.

Na obrázku 5.6 je vyfoceno zapojení pro přímou metodu s připojením 7 km optického vlákna. Při zapojení delších optických tras již terminál pro detekci náběžné hrany není schopen díky útlumu detekovat náběžnou hranu. Nicméně pozici náběžné hrany lze vyčíst i manuálně pomocí kurzoru a následně vypočítat délku optického vlákna podle vzorce 5.1.



Obr. 5.6: Ukázka zapojení pro přímou metodu.

Přední panel pro měření přímou metodou obsahuje pole pro nastavení generovaného signálu (šířka pulzu, počet pulzů, nastavení referenční hodnoty triggeru), graf a indikátory pro zobrazení naměřených hodnot. Na obrázku 5.7 je zobrazeno měření optického vlákna o délce 30 m.

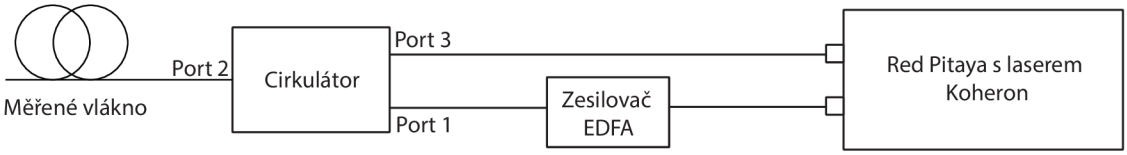


Obr. 5.7: Přední panel pro měření přímou metodou.

5.5 Metoda OTDR

Zapojení pro měření metodou OTDR je znázorněno na obrázku 5.8. Oproti přímé metodě je do zapojení přidán cirkulátor. Do zapojení musel být také přidán optický zesilovač EDFA o výkonu 30dB, jelikož výkon laseru na desce Koheron nebyl dostatečný na prosvícení celé optické trasy.

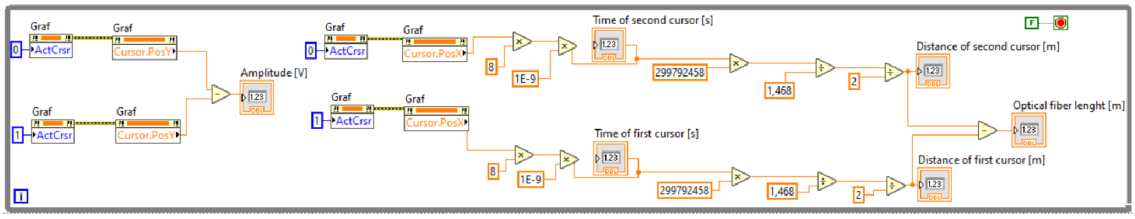
Signál po výstupu z laseru vstupuje do zesilovače, kde je zesílen o 30 dB, následně vstupuje do portu 1 optického cirkulátoru. Z portu 1 následuje do portu 2 a odtud do optického vlákna, na jehož konci se odrazí (Fresnelův odraz) a vrací se zpět do optického cirkulátoru, ze kterého vystupuje portem 3 a je přijímán vstupem fotodetektoru. Odrazy nenastávají pouze na konci optického vlákna, ale i na každé nehomogenitě vlákna (svár, konektor), které se následně zobrazí v grafu.



Obr. 5.8: Blokové schéma zapojení – metoda OTDR.

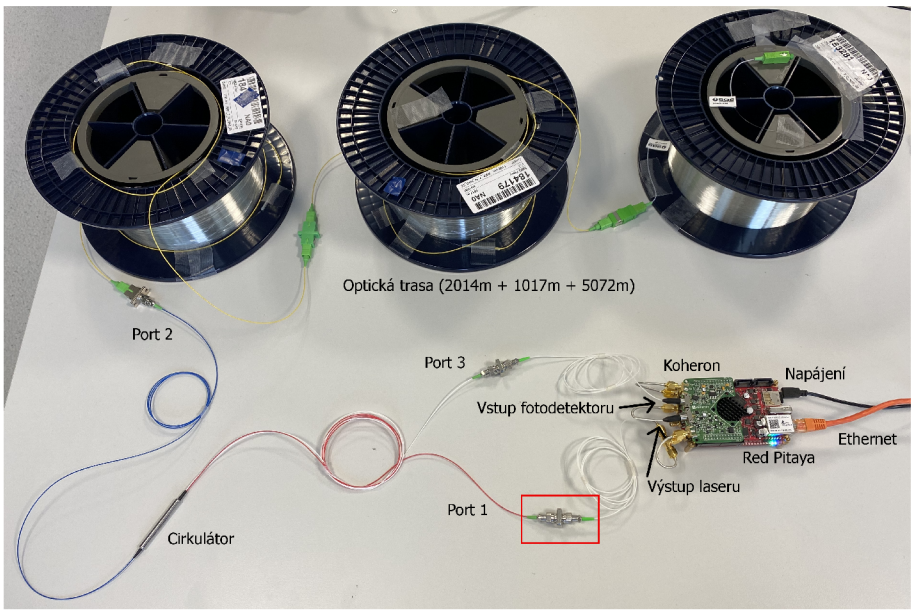
U metody OTDR se délka vlákna určuje pomocí kurzorů a to tak, že se první kurzor nastaví na náběžnou hranu a druhý kurzor na hranu sestupnou. Rozdíl těchto hodnot udává naměřenou délku vlákna.

Pozice obou x-ových kurzorů je přepočítána ze samplů na čas a poté podle vzorce 5.1 na vzdálenost. Rozdíl těchto vzdáleností udává délku měřeného optického vlákna. Na obr 5.9 je část kódu, která provádí přepočet ze samplů na vzdálenost.



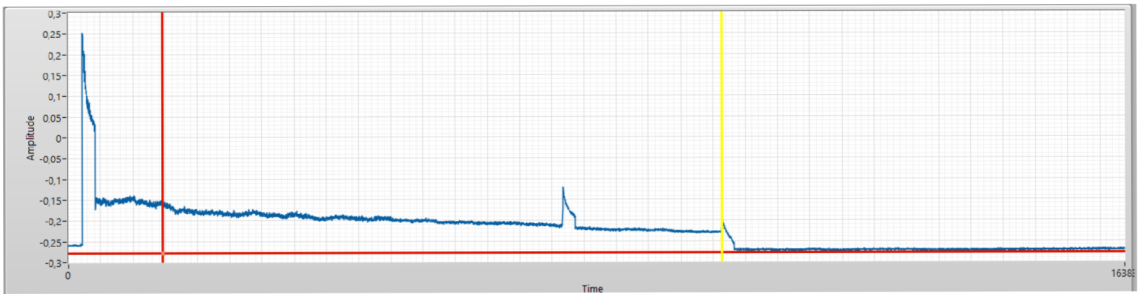
Obr. 5.9: Výpočet vzdálenosti kurzorů.

Na obrázku 5.10 je vyfoceno zapojení pro měření metodou OTDR. Oproti zapojení pro metodu přímou zde vidíme zapojený cirkulátor, v místě červeného čtverce je třeba připojit optický zesilovač o výkonu 30 dB.



Obr. 5.10: Ukázka zapojení pro metodu OTDR.

Přední panel pro metodu měření OTDR je téměř shodný s tím pro metodu přímou. Neobsahuje nastavení referenčního triggeru a obsahuje indikátor pozice kurzorů v metrech. Na obrázku 5.11 je zobrazen výsledný graf měření pro optickou trasu o délce 8 km. Jako předřadné bylo použito vlákno o délce 1 km. Následně je připojeno optické vlákno o délce 5 km, jeho konec je patrný díky výkonové špičce zobrazené v grafu. Konektor byl navíc pro účely měření znečištěn. Posledním připojeným vláknem je vlákno o délce 2 km, na jehož konci můžeme pozorovat Fresnelův odraz a poté již jen šum.



Obr. 5.11: Měření vlákna o délce 8 km metodou OTDR.

Měření může být provedeno i bez optického zesilovače a to tak, že na konec měřeného vlákna se připojí optické zrcátko. Výslednou délku je ale ještě nutné vydělit dvěma.

6 Laboratorní úloha

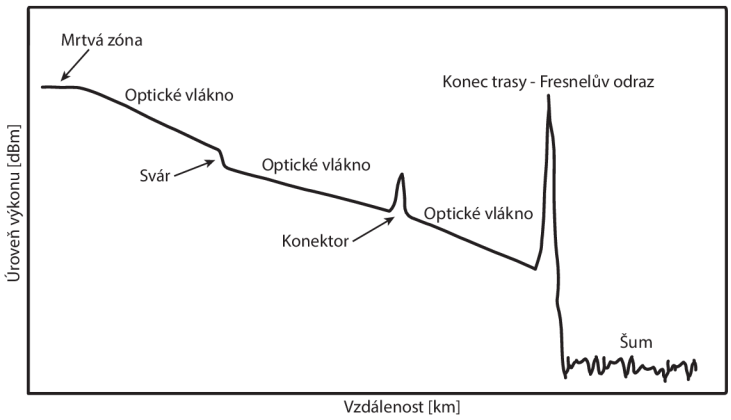
6.1 Cíl úlohy

Cílem této úlohy je změřit délky různých optických vláken, za pomocí zařízení Redpitaya, laseru Koheron a přiloženého programu a následně tyto délky porovnat s měřením klasického zařízení OTDR.

6.2 Teoretický úvod

OTDR – Optical Time Domain Reflectometry

Zařízení OTDR se používá k měření různých parametrů optických vláken. K měření délky optického vlákna využívá zpětného odrazu optických pulzů, které přístroj následně detekuje. Jedná se o Fresnelovy odrazy, ke kterým dochází při průchodu světla materiálem s rozdílnou hustotou, to znamená, že k těmto odrazům dochází v místě konektorů, svárů a na konci optického vlákna viz obr. 6.1. Množství těchto odrazů závisí na velikosti změny hustoty a na velikosti úhlu, pro kterým světlo narazí na rozhraní dvou materiálů.



Obr. 6.1: Příklad změřeného průběhu [2].

Optická vlákna bývají testována na těchto vlnových délkách: 850 nm, 1300 nm a 1550 nm. V rámci této laboratorní úlohy budou vlákna testována na vlnové délce 1550 nm.

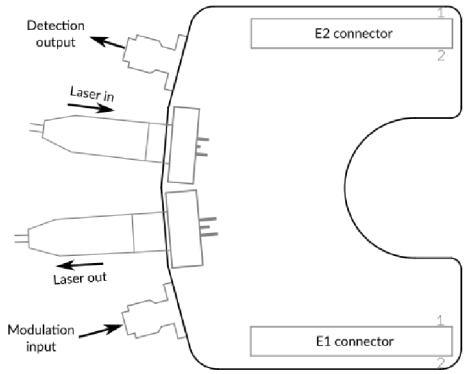
Red Pitaya

Red Pitaya je open-source zařízení, které může být naprogramováno na velké množství funkcí. Jeho základní webové rozhraní obsahuje již několik aplikací, jako napří-

klad osciloskop, generátor signálu, spektrální analyzátor a další. V rámci této úlohy bylo toto zařízení naprogramováno ve vývojovém prostředí LabView [3].

Koheron

Jedná se o desku s laserem a fotodektorem, která je připojena na zařízení Red Pitaya pomocí konektorů E1 a E2. Vlnová délka laseru je 1550 nm a frekvence fotodetektoru je 60 MHz.



Obr. 6.2: Popis desky Koheron [4].

Přímá metoda

Přímá metoda zjišťuje délku vlákna na základě času, za který vláknem projde pulz. Z tohoto času se podle vzorce 6.1 vypočítá délka optického vlákna.

$$l = \frac{c \cdot T}{n}, \tag{6.1}$$

kde l je délka vlákna, c je rychlost světla, T je čas, za který projde signál optickým vláknem a n je index lomu optického vlákna.

6.3 Pracovní postup

Zapojení

1. Připojte zařízení RedPitaya pomocí ethernetového kabelu k počítači či routeru a pomocí micro usb k napájení,
2. Na počítači otevřete internetový prohlížeč a do adresního řádku napište MAC adresu, která se nachází na ethernetovém konektoru přímo na zařízení RedPitaya například rp-f06e2c.local/.
3. Po načtení stránky se zobrazí webové rozhraní RedPitaya. V tomto rozhraní zvolíte možnost Development a následně SCPI server.

4. SCPI server zapnete pomocí tlačítka RUN a následně se zobrazí IP adresa, pomocí které probíhá připojení z programu.

Měření přímou metodou

1. Otevřete program OTDR.exe, který se nachází na ploše počítače.
2. Seznamte se s grafickým prostředím.
3. Do pole pro zadání IP adresy napište adresu, kterou jste zjistili po zapnutí SCPI serveru.
4. Nyní propojte výstup a vstup laseru Koheron. Nastavte počet pulzů, které chcete aby program generoval (čím vyšší počet pulzů zvolíte, tím přesnější bude měření). Stiskněte tlačítko START pro začátek měření.
5. Po proběhnutí programu se v poli Trigger location objeví hodnota, kterou si poznamenejte.
6. Nyní místo spojky připojte na výstup a vstup z Koheronu měřené vlákno. Do pole Reference value of trigger napište hodnotu triggeru, kterou jste zjistili v předchozím bodě a opět spusťte program tlačítkem start. Po doběhnutí programu se v poli Trigger location zobrazí naměřená délka vlákna. Po dokončení měření je třeba program vypnout pomocí tlačítka Abort Execution pod kontextovou nabídkou.
7. Měření opakujte pro různé délky vláken, hodnoty si zaznamenejte.

Měření metodou OTDR

1. Přepněte se do záložky OTDR.
2. Na výstup desky Koheron zapojte vstup zesilovače EDFA (30 dB). Výstup zesilovače připojte na port 1 cirkulátoru. Port 2 připojte na měřené vlákno a port 3 na vstup fotodetektoru.
3. Nastavte počet pulzů, které chcete aby program generoval (čím vyšší počet pulzů zvolíte, tím přesnější bude měření). Stiskněte tlačítko START pro začátek měření.
4. Po vygenerování signálu nastavte kurzor 1 (červený) na náběžnou hranu a kurzor 2 (žlutý) na hranu sestupnou, případně na výkonovou špičku signalizující konektor. V poli Lenght se zobrazí délka celé trasy, případně délka jednoho vlákna, podle toho jak nastavíte kurzory. Program po dobu nastavování kurzoru musíte nechat zapnutý. Po dokončení měření program vypněte tlačítkem Abort Execution pod kontextovou nabídkou.
5. Měření opakujte pro různé délky vláken, zaměňujte pořadí jednotlivých vláken v trase. Naměřené hodnoty si poznamenejte.

6.4 Seznam použitých přístrojů

- Red Pitaya STEMlab 125-14 board
- Deska s laserem Koheron
- Optický cirkulátor
- Optické zrcátko
- Počítač s programem OTDR.exe
- Optická vlákna různých délek
- Zesilovač o výkonu 30 dB

6.5 Závěr

Porovnejte a stručně zhodnoťte obě metody měření. Délky vláken naměřené pomocí zařízení Red Pitaya porovnejte s hodnotami naměřenými pomocí zařízení OTDR.

6.6 Literatura

[1] *Understanding OTDRs.* [online] Anritsu, 2011 [cit. 2020-11-15]. Dostupné z URL: <`https://rossfibersolutions.com/fiber-optic-pdfs/Anritsu-understanding-otdrs.pdf`>

[2] LUCKI, Michal. *Optické systémy a sítě* [online]. Praha, 2017 [cit. 2020-11-29]. Dostupné z URL: <`http://techpedia.fel.cvut.cz/download/?fileId=811&objectId=83` Skripta. České vysoké učení technické v Praze.

[3] *Red Pitaya STEMLab 125-14.* In: Red Pitaya [online]. Slovenia: Red Pitaya, 2013 [cit. 2020-12-09]. Dostupné z URL: <`https://www.redpitaya.com/194/Red%20Pitaya%20STEMlab%20board//%20125-14`.

[4] *Laser Board for the Red Pitaya.* Koheron [online]. France, 2015 [cit. 2021-5-28]. Dostupné z URL: <`https://www.koheron.com/photonics/lbrp-laser-board-red-pitaya`>

Závěr

Cílem bakalářské práce bylo vytvoření zařízení OTDR na platformě RedPitaya. V teoretické části byla rozebrána optická vlákna a jejich typy, přenosové vlastnosti a zařízení OTDR. U přenosových vlastností optického vlákna byl kladen důraz zejména na rozptyl a odrazy v optických vláknech. U zařízení OTDR jsou rozebrány všechny jeho části a parametry důležité k porozumění této metodě měření.

Výsledný program byl vytvořen v grafickém programovacím prostředí LabView, které je v práci stručně popsáno. Návrh zařízení OTDR byl navržen na platformě RedPitaya, s připojením desky s laserem a fotodetektorem od společnosti Koheron a připojením optického cirkulátoru. Všechny součásti návrhu jsou v práci teoreticky rozebrány.

Při vytváření programu došlo k několika problémům. Prvním problémem byla komunikace vývojového prostředí LabView s platformou RedPitaya. Oficiální ovladače od platformy Red Pitaya ne vždy fungují správně, proto bylo občas přistoupeno k řešení pomocí SCPI příkazů. Dalším problémem byla komunikace s přídavnou deskou Koheron, která se zpočátku nedařila zprovoznit a nastavení výstupního napětí laseru. Tento problém byl vyřešen již zmíněnými SCPI příkazy. Posledním problémem byl malý výkon laseru, který při měření metodou OTDR nedokázal dostatečně prosvítit optickou trasu. Proto musel být přidán do zapojení optický zesilovač EDFA o výkonu 30 dB, který tento problém vyřešil.

Do vytvořeného programu byly implementovány dvě metody měření délky vláken. Jedná se o přímou metodu a metodu OTDR. Obě metody jsou v práci popsány, včetně zapojení a zkušebního měření.

Dále byla v rámci bakalářské práce navrhnuta laboratorní úloha, která obsahuje krátký teoretický úvod a návod k měření. Laboratorní úloha slouží k pochopení problematiky a vyzkoušení měření délky optických tras.

Práce by v budoucnu mohla být rozšířena například o měření útlumu v optickém vlákně nebo nastavení výkonu laseru.

Literatura

[1] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. Druhé, rozšířené vydání.* Brno: Prof. Ing. Miloslav Filka, CSc. a kol., 2017. ISBN 978-80-86785-14-1.

[2] FILKA, Miloslav. *Optické sítě - přednášky.* [online] Brno, 2017 [cit. 2020-11-14]. Skripta. VUT FEKT. Dostupné z URL:<https://optolab.utko.feec.vutbr.cz/wp-content/uploads/Opticke_site_prednasky_P.pdf>.

[3] FILKA, Miloslav. *Přenosová média.* [online] Brno, 2011 [cit. 2020-11-14]. Skripta. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z URL:<https://optolab.utko.feec.vutbr.cz/wp-content/uploads/BPRM.pdf>.

[4] CHLEBOUN, Jiří. *Spektrální charakteristiky ve vláknové optice.* [online] Brno, 2011 [cit. 2020-11-16]. Bakalářská práce. VUT FEKT. Vedoucí práce Ing. JAN ŠPORIK. Dostupné z URL: <https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=42546>.

[5] MARŠÁLEK, Leoš. *Optická vlákna.* [online] Ostrava, 2006 [cit. 2020-11-14]. VŠB – Technická univerzita Ostrava. Dostupné z URL:<http://goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>.

[6] *Mie Scattering. HyperPhysics.* [online] Atlanta, Georgia: Georgia State University, 2016 [cit. 2020-11-16]. Dostupné z URL:<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/atmos/blusky.html#c3>.

[7] *Understanding OTDRs.* [online] Anritsu, 2011 [cit. 2020-11-15]. Dostupné z URL:<https://rossfibersolutions.com/fiber-optic-pdfs/Anritsu-understanding-otdrs.pdf>.

[8] HÁJEK, Martin a Petr HOLOMEČEK. *Měření chromatické a polarizační vidové disperze jednovidových optických tras.* [online] MIKROKOM s.r.o., 2007 [cit. 2020-11-16]. Dostupné z URL:<https://docplayer.cz/12849478-Mereni-chromaticke-a-polarizacni-vidove-\disperze-jednovidovych-optickych-tras-martin-hajek-petr-holomecek.html>.

[9] BUBNÍK, Lukáš, Jiří KLAJBL a Petr MAZUCH. *Optoelektrotechnika.* [online] Brno: Code Creator, 2014 [cit. 2020-11-14]. ISBN 978-80-88058-20-5. Dostupné z URL:<https://publi.cz/eknihy/?book=185-optoelektrotechnika>.

[10] SCHINDLER, Vladimír. *Monitorování optických tras Akademické počítačové sítě v Brně.* Elektrorevue [online]. 2009, 30. 9. 2009, 2009(49), 5 [cit. 2020-11-26]. ISSN 1213-1539. Dostupné z URL: <http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/komunikacni-technologie/0/monitorovani-optickych-tras-akademicke-pocitacove-site-v-brne/>.

[11] *OTDR.* In: Wikipedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-11-28]. Dostupné z URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_time-domain_reflectometer#/media/File:OTDR_-_Yokogawa_AQ7270_-_1.jpg

[12] LUCKI, Michal. *Optické systémy a sítě* [online]. Praha, 2017 [cit. 2020-11-29]. Dostupné z URL: <http://techpedia.fel.cvut.cz/download/?fileId=811&objectId=83 Skripta. České vysoké učení technické v Praze.

[13] *Red Pitaya STEMLab 125-14.* In: Red Pitaya [online]. Slovenia: Red Pitaya, 2013 [cit. 2020-12-09]. Dostupné z URL: <https://www.redpitaya.com/194/Red%20Pitaya%20STEMlab%20board%20125-14.

[14] *Laser Board for the Red Pitaya.* Koheron [online]. France, 2015 [cit. 2021-5-28]. Dostupné z URL: <https://www.koheron.com/photonics/lbrp-laser-board-red-pitaya

[15] BOHÁČ, Leoš. *Tajemné optické vlákno nejen pro přenos informace.* Inovace VOV [online]. Praha, 2019 [cit. 2021-5-28]. Dostupné z URL: <https://www.vovcr.cz/odz/tech/508/page01.html>.

[16] *Opneti* [online]. China: Opneti, 1999 [cit. 2021-5-28]. Dostupné z URL: <http://www.opneti.com/ProductList.asp?SortID=2

[17] *Jaký je rozdíl mezi konektorem UPC a APC?* FOCC Fiber Optic CO [online]. Čína: FOCC, 2005, 2019 [cit. 2021-5-29]. Dostupné z URL: <http://cz.opticalpatchcable.com/news/what-s-the-difference-between-upc-and-apc-conn-25321561.html

[18] *Zakončení optických konektorů.* Fangfactory.net [online]. Praha, 2018, 16. 12. 2018 [cit. 2021-5-29]. Dostupné z URL: <https://www.fangfactory.net/2018/12/16/zakonceni-optickych-konektoru/

[19] *NI.* [online]. USA: National Instruments, 1991 [cit. 2021-5-30]. Dostupné z URL: <https://www.ni.com/cs-cz.html

Seznam symbolů, veličin a zkratek

Seznam zkratek

ADZ	Attenuation Dead Zone
DFT	Discrete Fourier Transform – Diskrétní Fourierova transformace
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
EDZ	Event dead zone
IP	Internet Protocol
LAN	Local Area Network
LCR	Inductance (L), Capacitance (C), Resistance (R)
NI	National Instruments
OTDR	Optical Time Domain Reflectometer
SCPI	Standard Commands for Programmable Instruments
SD	Secure Digital
URL	Uniform Resource Locator
USB	Universal Serial Bus
USF	Unshifted Fiber

Seznam symbolů a veličin

A	útlum optického vlákna
c	rychlost světla
$D(\lambda)$	koeficient chromatické disperze
D_j	průměr jádra
D_p	průměr pláště
l	délka vlákna

P	výkon
n	index lomu
T	čas
$t_{\mathrm{g}}(\lambda)$	zpoždění signálu
λ	vlnová délka

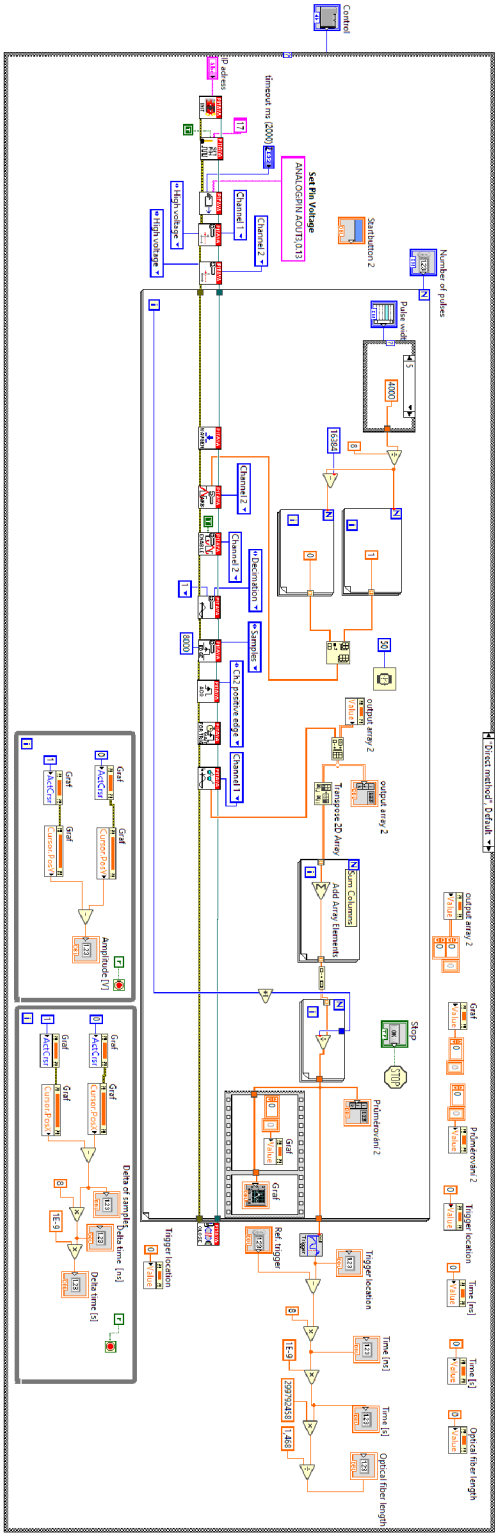
Seznam příloh

A Přímá metoda **45**

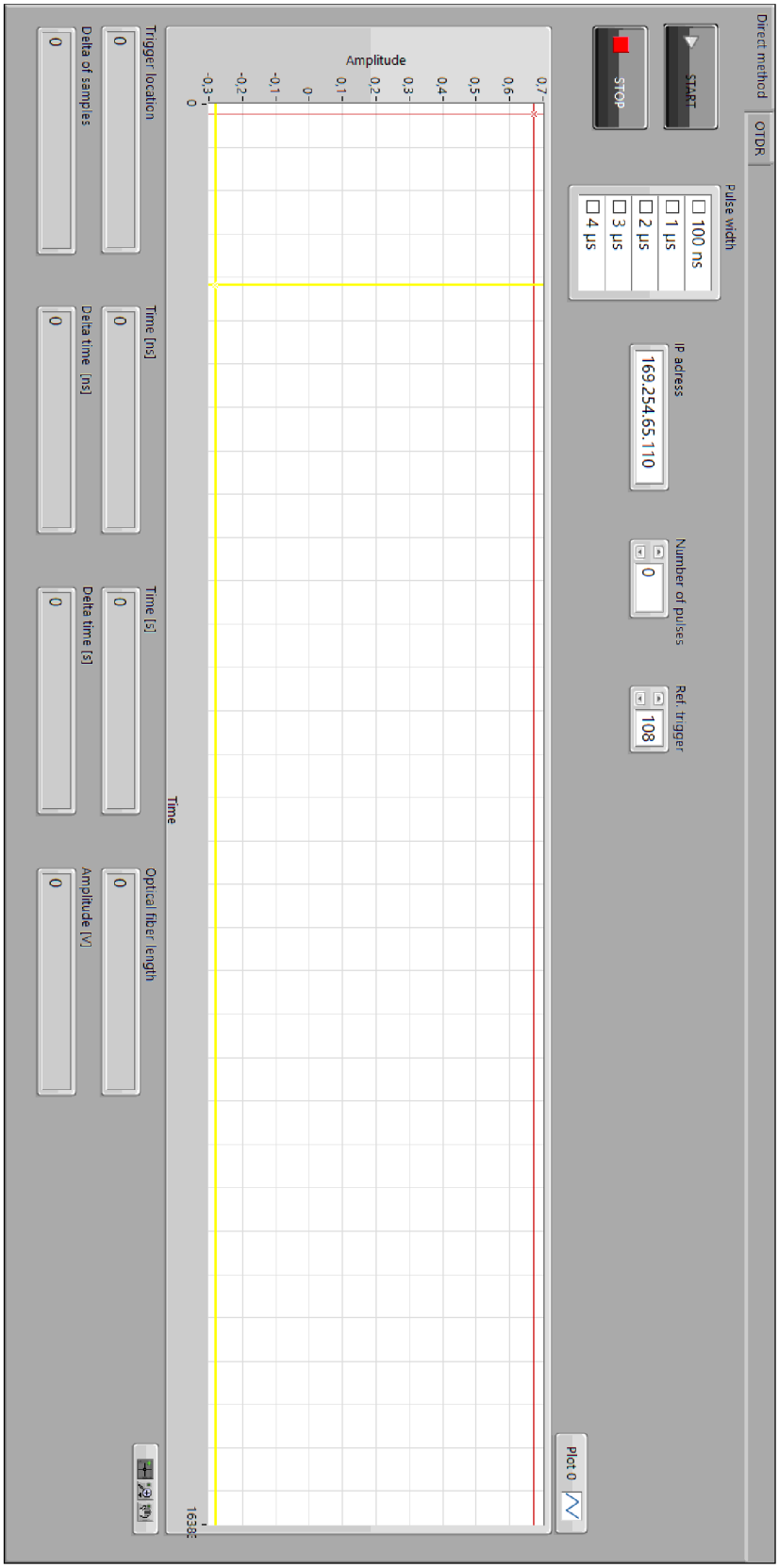
B Metoda OTDR **47**

C Obsah elektronické přílohy **49**

A Přímá metoda

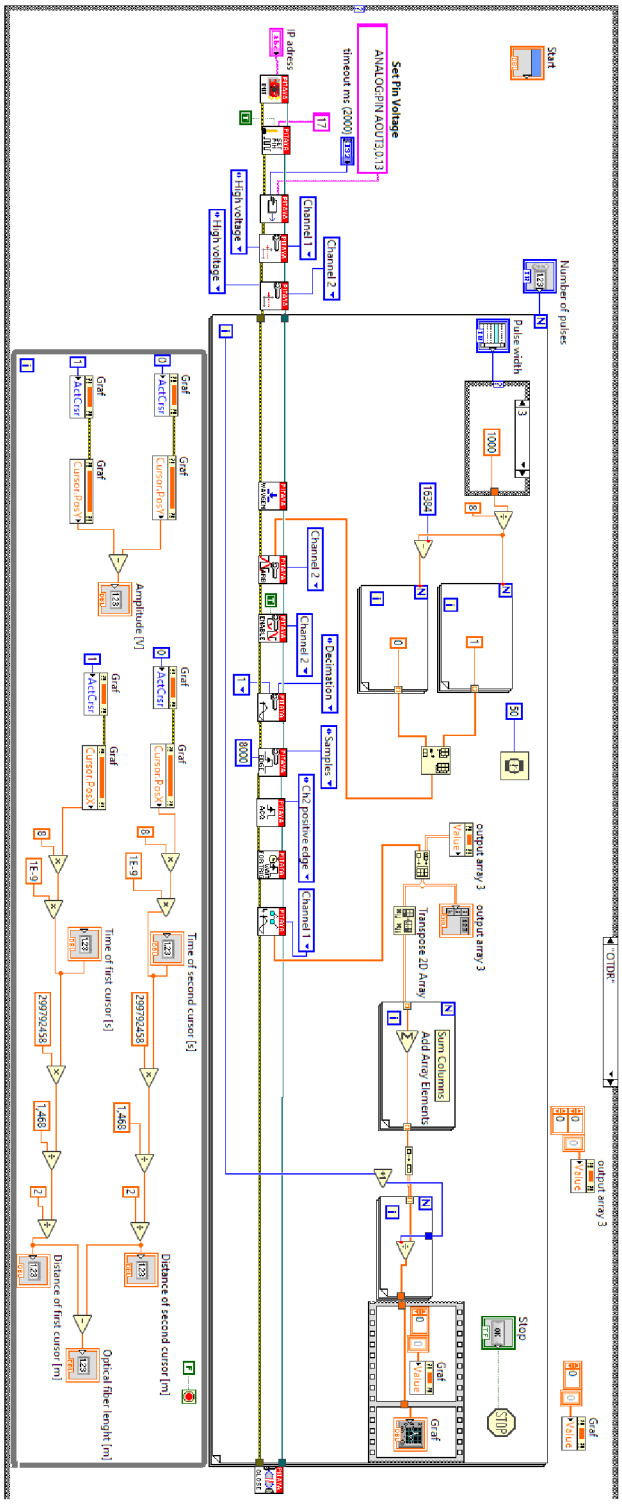


Obr. A.1: Blokové diagram přímé metody.

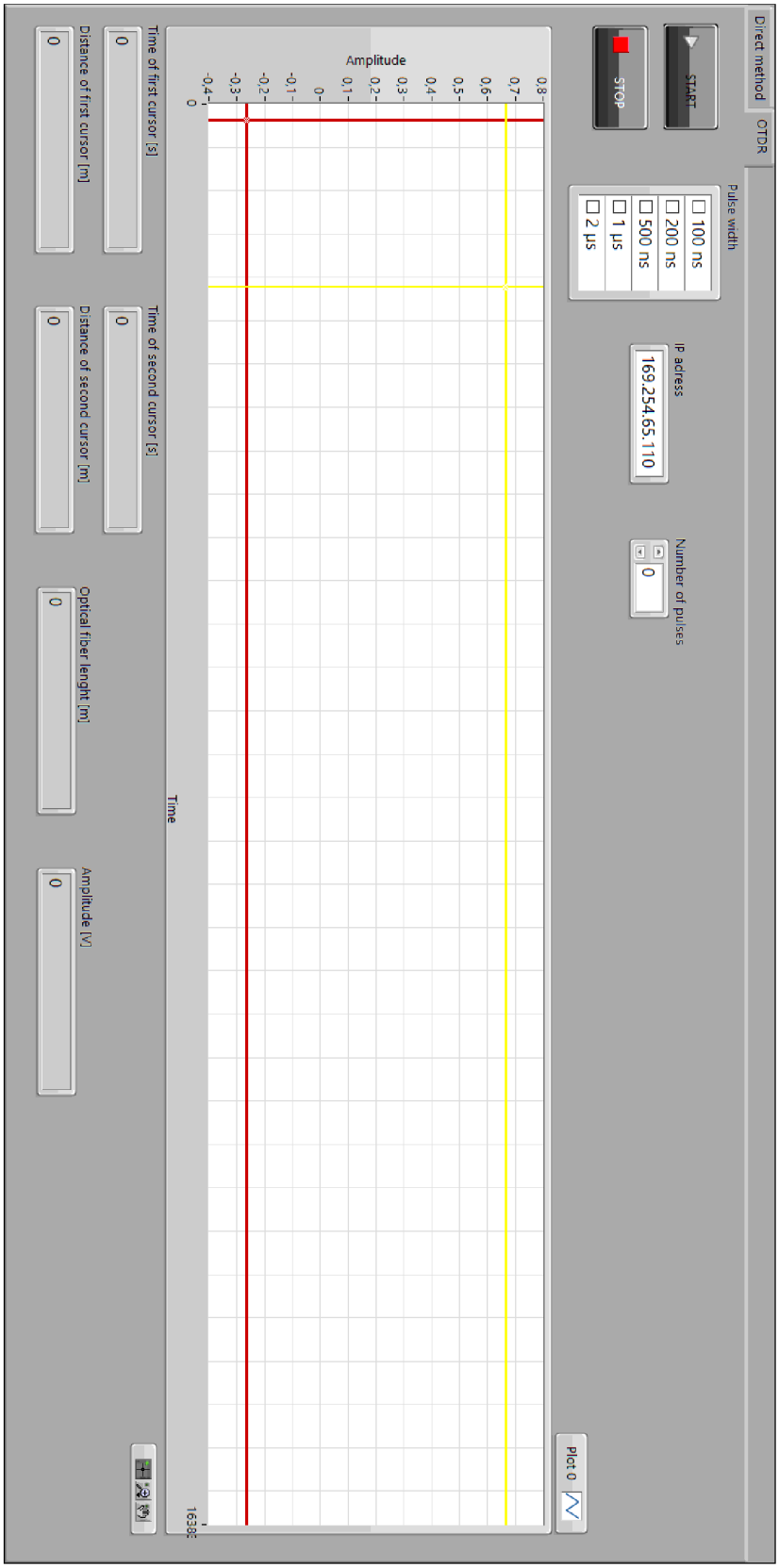


Obr. A.2: Přední panel přímé metody.

B Metoda OTDR



Obr. B.1: Blokové diagram metody OTDR.



Obr. B.2: Přední panel metody OTDR.

C Obsah elektronické přílohy

Příloha obsahuje výsledný program ve verzi .vi a spustitelného souboru .exe. Kód byl testován ve verzi programu LabView 2020.

```
/ ..................................................... kořenový adresář přílohy
└── Program OTDR.zip ............................ soubory výsledného programu
    ├── Program OTDR exe ....................... složka s programem ve verzi exe
    │   ├── OTDR.aliases
    │   ├── OTDR.exe
    │   └── OTDR.ini
    ├── Startbutton ............ složka obsahující soubory vytvořeného tlačítka start
    │   ├── Data 1.ctl
    │   ├── Facade 1.vi
    │   ├── Init 1.vi
    │   ├── Startbutton.xctl
    │   └── State 1.ctl
    └── OTDR.vi ........................ program ve vývojovém prostředí LabView
```