



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

PŘENOS RADIOFREKVENČNÍHO SIGNÁLU OPTICKÝM VLÁKNEM

TRANSMISSION OF THE RADIOFREQUENCY SIGNAL OVER OPTICAL FIBER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Andrej Barč

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Peter Barčík, Ph.D.

BRNO 2021

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Bc. Andrej Barč

ID: 195267

Ročník: 2

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Přenos radiofrekvenčního signálu optickým vláknem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Podrobně se seznámte s problematikou přenosu radiofrekvenčního signálu přes optické vlákno (RoF, Radio over Fiber). Prostudujte dostupné typy modulátorů a detektorů. Navrhněte řetězec RoF systému. Diskutujte jeho výhody a nevýhody. Vytvořte experimentální pracoviště pro přenos RoF.

Otestujte vlastnosti navrženého systému v C pásmu. Změřte šířku spektrální čáry použitého laseru, jeho spektrum a relativní intenzitní šum (RIN). Změřte vložný útlum, extinction ratio a parametry S11 a S21 Mach-Zehnderova modulátoru. Analyzujte parametry modulátoru v závislosti na stavu polarizace vstupní optické vlny. Z měření vypracujte vzorový protokol. Diskutujte možné aplikace systému v kabelových i bezkabelových optických komunikacích.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] ZIN, A. M., M. S BONGSU, S. M. IDRUS a N. ZULKIFLI. An overview of radio-over-fiber network technology. In: International Conference On Photonics 2010 [online]. IEEE, 2010, 2010, s. 1-3 [cit. 2020-05-15]. DOI: 10.1109/ICP.2010.5604429. ISBN 978-1-4244-7186-7.

[2] ISLAM, S., KHAN, M. F., HOSSAN, M. Z. a AMIN, M. A. An Overview of Radio over Fiber (RoF) Technology. In: 2019 2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT) [online]. IEEE, 2019, 2019, s. 749-752 [cit. 2020-05-15]. DOI: 10.1109/ICICT46008.2019.8993233. ISBN 978-1-7281-0282-5.

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 20.5.2021

Vedoucí práce: Ing. Peter Barčík, Ph.D.

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda rady studijního programu

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

Táto práca pojednáva o prenose optického žiarenia modulovaného rádiofrekvenčným signálom cez optické vlákno. Popisuje priebeh komunikácie a spôsob pokrytia komunikačnej oblasti. Poukazuje na praktické použitie komponentov nachádzajúcich sa v komunikačnom reťazci tohto systému. Vysvetľuje funkcionality vlastností a delenie jednotlivých komponentov. Oboznamuje s benefitmi a obmedzeniami tohto systému. Ďalej popisuje vytvorenie topológie vhodnej pre laboratórne meranie technológie RoF. Poskytuje experimentálne meranie parametrov v pásme C. Poukazuje na možné použitie technológie RoF pomocou bezkáblového optického spoja. Súčasťou práce je taktiež vzorový laboratórny protokol.

Kľúčové slová

Prenos rádiofrekvenčného signálu, laser, Mach-Zehnderov modulátor, optické vlákno, fotodetektor, relatívny intenzitný šum, šírka spektrálnej čiary

Abstract

This work deals with the transmission of optical radiation modulated by a radio frequency signal through an optical fiber. Furthermore, it describes the principles of communication and area coverage. It points out the practical use of components located in the communication chain of this system. Explains the functionality of the properties and the division of individual components. It introduces the benefits and limitations of this system. It further describes the creation of a topology suitable for laboratory measurement of RoF technology. Provides experimental measurement of C-band parameters. Indicates the possible use of RoF technology using a wireless optical link. A part of the work is also a sample laboratory protocol.

Keywords

Radio frequency signal transmission, laser, Mach-Zehnder modulator, optical fiber, photodetector, relative intensity noise, spectral line width

Bibliografická citácia

BARČ, Andrej. *Přenos radiofrekvenčního signálu optickým vláknem*. Brno, 2021, 84 s., 10 s. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/133602>

Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Ing. Peter Barčík, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

| | |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------|
| Jméno a příjmení studenta: | Andrej Barč |
| VUT ID studenta: | 195267 |
| Typ práce: | Diplomová práce |
| Akademický rok: | 2020/21 |
| Téma závěrečné práce: | Přenos radiofrekvenčního signálu optickým vláknem |

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 13. května 2021

podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu diplomovej práce Ing. Petrovi Barčíkovi, Ph.D. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej diplomovej práce.

V Brně dne: 13. května 2021

podpis autora

Obsah

| | |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| ZOZNAM OBRÁZKOV | 9 |
| ZOZNAM TABULIEK | 11 |
| ÚVOD | 12 |
| 1. RÁDIOVÝ PRENOS OPTICKÝM VLÁKNOM | 13 |
| 1.1 KONCEPCIA ROF..... | 13 |
| 1.2 TYPY PRENOSOVÝCH SYSTÉMOV ROF..... | 15 |
| 1.3 METÓDY MODULÁCIÍ ROF..... | 16 |
| 2. TOPOLOGIA ROF | 19 |
| 2.1 ZDROJ OPTICKÉHO SIGNÁLU..... | 19 |
| 2.1.1 <i>Laserová dióda</i> | 19 |
| 2.2 MODULÁTOR..... | 24 |
| 2.2.1 <i>Funkcia MZM</i> | 26 |
| 2.3 OPTICKÉ VLÁKNO..... | 28 |
| 2.3.1 <i>Princíp šírenia svetelných impulzov v optickom vlákne</i> | 28 |
| 2.3.2 <i>Konštrukcia optického vlákna</i> | 31 |
| 2.3.3 <i>Typy vlákna</i> | 31 |
| 2.3.4 <i>Útlm optického vlákna</i> | 33 |
| 2.3.5 <i>Disperzia v optickom vlákne</i> | 35 |
| 2.4 FOTODETEKTOR..... | 36 |
| 2.4.1 <i>Fotodióda PIN</i> | 40 |
| 2.4.2 <i>Lavínová fotodióda</i> | 40 |
| 3. VÝHODY ROF | 42 |
| 3.1 VELKÁ ŠÍRKA PÁSMA..... | 42 |
| 3.2 NÍZKY ÚTLM..... | 42 |
| 3.3 VYSOKÁ ODOLNOSŤ..... | 43 |
| 3.4 BEZPEČNOSŤ PREVÁDZKY..... | 43 |
| 3.5 DYNAMICKÉ PRIDEĽOVANIE ZDROJOV..... | 44 |
| 3.6 V BUDÚCNOSTI POUŽITELNÉ..... | 44 |
| 4. OBMEDZENIA ROF | 45 |
| 5. MERANIE PARAMETROV | 46 |
| 5.1 MERANIE PARAMETROV RIN..... | 46 |
| 5.1.1 <i>Priebeh merania</i> | 46 |
| 5.1.2 <i>Výsledky merania</i> | 48 |
| 5.1.3 <i>Použité prístroje</i> | 51 |
| 5.2 MERANIE ŠÍRKY SPEKTRÁLNEJ ČIARY LASERA..... | 52 |
| 5.2.1 <i>Priebeh merania</i> | 53 |
| 5.2.2 <i>Výsledky merania</i> | 55 |
| 5.2.3 <i>Použité prístroje</i> | 58 |
| 5.3 MERANIE OPTICKÉHO SPEKTRA..... | 59 |
| 5.3.1 <i>Priebeh merania</i> | 59 |

| | | |
|-----------|---------------------------------------------------|-----------|
| 5.3.2 | <i>Výsledky merania</i> | 59 |
| 5.3.1 | <i>Použité prístroje</i> | 60 |
| 5.4 | MERANIE PARAMETROV S11 A S21 | 61 |
| 5.4.1 | <i>Priebeh merania</i> | 61 |
| 5.4.2 | <i>Výsledky merania</i> | 62 |
| 5.4.3 | <i>Použité prístroje</i> | 65 |
| 5.5 | MERANIE VLOŽNÉHO ÚTLMU | 66 |
| 5.5.1 | <i>Priebeh merania</i> | 66 |
| 5.5.2 | <i>Výsledky merania</i> | 69 |
| 5.5.3 | <i>Použité prístroje</i> | 71 |
| 5.6 | MERANIE OPTICKÉHO EXTINKČNÉHO POMERU | 72 |
| 5.6.1 | <i>Priebeh a výsledky merania</i> | 72 |
| 5.6.2 | <i>Použité prístroje</i> | 73 |
| 6. | BEZKÁBLOVÝ OPTICKÝ SPOJ | 74 |
| | ZÁVER | 77 |
| | LITERATÚRA | 78 |
| | ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK | 80 |
| | ZOZNAM PRÍLOH | 84 |

ZOZNAM OBRÁZKOV

| | | |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1 | Priebeh komunikácie medzi centrálnou stanicou a vzdialenou anténou jednotkou prevzaté a upravené z [1] | 14 |
| 1.2 | Koncepcia RoF systému prevzaté a upravené z [4]..... | 15 |
| 1.3 | Princíp EM-DD prevzaté a upravené z [4] | 17 |
| 2.1 | Topológia RoF systému prevzaté a upravené z [2] | 19 |
| 2.2 | Závislosť emitovaného optického výkonu na budiacom prúde prevzaté z [8] | 20 |
| 2.3 | Závislosť polomeru krivosti Gaussového zväzku na súradnici z prevzaté z [10]..... | 22 |
| 2.4 | Porovnanie šírky spektrálnej čiary LD a LED prevzaté z [8] | 23 |
| 2.5 | Spektrum AM signálu s vyznačením šírky pásma kanálu | 26 |
| 2.6 | Horný obrázok po a) zobrazuje obdĺžnikové usporiadanie Mach-Zehnderovho modulátora a spodný obrázok po b) zobrazuje charakteristickú krivku modulátora s významnými bodmi prevzaté a upravené z [15] | 27 |
| 2.7 | Grafické znázornenie zákonov odrazu a lomu prevzaté z [16] | 29 |
| 2.8 | Šírenie svetelného lúča v optickom vlákne prevzaté z [10] (n_0 – index lomu vzduchu, n_1 – index lomu jadra, n_2 – index lomu plášťa, θ – uhol dopadu svetla na rozhranie vzduch-jadro, θ' – uhol lomu svetla v jadre, α – uhol dopadu svetla na rozhranie jadro-plášťa, β – uhol lomu svetla v plášti)..... | 30 |
| 2.9 | Spôsob šírenia svetelných lúčov a tvary pulzov na vstupe a výstupe u jednotlivých typov optických vlákien prevzaté a upravené z [18]..... | 33 |
| 2.10 | Znázornenie energetických hladín P-N prechodu fotodiódy a vznik minoritných nosičov náboja (UD je vnútorné napätie potenciálovej bariery a EF je Fermiho hladina) prevzaté z [10] | 38 |
| 2.11 | V-A charakteristika fotodiódy prevzaté z [18]..... | 38 |
| 2.12 | Porovnanie závislostí citlivosti detekcie kremikovej fotodiódy a ideálnej fotodiódy k vlnovej dĺžke prevzaté z [18] | 40 |
| 2.13 | Princíp usporiadania fotodiódy PIN prevzaté z [20] | 40 |
| 2.14 | Princíp usporiadania fotodiódy APD prevzaté z [20]..... | 41 |
| 3.1 | Porovnanie útlmov koaxiálneho káblu a optického vlákna na frekvenciách prevzaté z [22]..... | 43 |
| 5.1 | Bloková schéma pre meranie RIN | 47 |
| 5.2 | Laboratórne pracovisko pre stanovenie parametru RIN | 48 |
| 5.3 | Graf závislosti RIN na frekvenciách pri zmenách IB pomocou prvej metódy | 49 |
| 5.4 | Graf závislosti RIN na frekvenciách pri zmenách IB pomocou druhej metódy | 50 |
| 5.5 | Závislosť optickej intenzity na vlnovej dĺžke pre stanovenie šírky spektrálnej čiary prevzaté z [22]..... | 52 |
| 5.6 | Princíp heterodynnej (vľavo) a homodynnej (vpravo) metódy s oneskorením prevzaté a upravené z [22] | 53 |
| 5.7 | Bloková schéma pre stanovenie šírky spektrálnej čiary lasera | 54 |
| 5.8 | Laboratórne pracovisko pre stanovenie šírky spektrálnej čiary lasera | 55 |
| 5.9 | Graf závislosti výkonu z optického prijímača $P_{RF_výstup}$ na frekvenciách pri zmenách budiaceho prúdu IB pre stanovenie FWHM | 56 |
| 5.10 | Graf závislosti výkonu z optického prijímača $P_{RF_výstup}$ na frekvenciách pri zmenách budiaceho prúdu IB pre stanovenie SMSR | 57 |
| 5.11 | Graf závislosti z optického prijímača $P_{RF_výstup}$ na frekvenciách pri hodnote budiaceho prúdu $IB = 150$ mA pre ukážku single-módového charakteru použitého laser..... | 58 |
| 5.12 | Bloková schéma pre meranie optického spektra laserového signálu..... | 59 |

| | | |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.13 | Graf závislosti výkonu z optického prijímača P_o na vlnovej dĺžke λ pri zmenách budiaceho prúdu I_B | 60 |
| 5.14 | Dvojbran s vyznačenými zdrojovými (a_i) a odrazenými (b_i) vlnami prevzaté z [24] | 61 |
| 5.15 | Bloková schéma pre stanovenie parametrov S_{11} a S_{21} | 62 |
| 5.16 | Graf závislosti modulu činiteľa prenosu S_{21} na frekvencií | 63 |
| 5.17 | Graf závislosti modulu činiteľa odrazu S_{11} na frekvencií | 63 |
| 5.18 | Graf závislosti modulu činiteľa prenosu S_{21} na frekvencií zmeraného bez použitia VNA | 65 |
| 5.19 | Bloková schéma pre meranie vložného útlmu a predpätia | 66 |
| 5.20 | Laboratórne pracovisko pre meranie vložného útlmu a predpätia | 68 |
| 5.21 | Graf závislosti výstupného optického výkonu z MZM na napätí privedeného na port attenuátora .. | 69 |
| 5.22 | Graf závislosti výkonu RF signálu na predpätí (Bias) | 70 |
| 6.1 | Ukážka priamej viditeľnosti hlavice H1 (vysielač) s hlavice H2 (prijímač), kde U je uhlová šírka zväzku prevzaté a upravené z [10] | 74 |
| 6.2 | Schéma optického bezkáblového spoja prevzaté a upravené z [10] | 75 |
| 6.3 | Zobrazenie funkcie FSO linky pre Hard a Soft prepínanie prevzaté z [10] | 76 |

ZOZNAM TABULIEK

| | | |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.1 | Tabuľka zmeraných a vypočítaných hodnôt DC zložky optického výkonu pri zmenách budiaceho prúdu lasera I_B | 47 |
| 5.2 | Tabuľka zmeraných a vypočítaných hodnôt P_o pri zmenách I_B | 48 |
| 5.3 | Tabuľka odčítaných hodnôt FWHM z grafu viz. Obrázok 5.9 | 56 |
| 5.4 | Tabuľka odčítaných hodnôt úrovni ľavých (L_{pp}) a pravých (R_{pp}) postranných pásiem a hodnoty SMSR z grafu viz. Obrázok 5.10..... | 57 |
| 5.5 | Tabuľka zmeraných hodnôt optických výkonov $P_{RF_výstup}$ pre jednotlivé frekvencie | 64 |
| 5.6 | Tabuľka zmeraných optických výkonov na vstupe a výstupe MZM..... | 67 |
| 5.7 | Tabuľka zmeraných výkonov RF signálov na výstupe MZM v závislosti od predpätia..... | 68 |
| 5.8 | Tabuľka hodnôt pre stanovenie optického extinkčného pomeru..... | 72 |

ÚVOD

Táto diplomová práca je zameraná na systém optickej komunikácie a spracovania optického signálu technológiou nazývanou RoF (Radio over Fiber). RoF predstavuje technológiu, ktorá využíva na prenos optickým vláknom svetelné signály modulované rádiovým signálom. Jej cieľom je zjednodušiť, zefektívniť a cenovo znížiť komunikačné systémy. Práca je rozdelená do siedmich kapitol.

Prvá kapitola predstavuje úvod do problematiky prenosu rádiového signálu optickým vláknom. Oboznamuje o tejto technológii a poukazuje na jej typy a možné prevedenia v reálnych aplikáciách.

Druhá kapitola je venovaná zostaveniu reťazca systému RoF, vhodného pre vykonávanie laboratórnych meraní. Komponenty reťazca RoF systému predstavujú zdroj optického signálu, modulátor, optické vlákno a fotodetektor. Taktiež popisuje funkciu, delenie a použitie jednotlivých komponentov.

Tretia a štvrtá kapitola poukazuje na výhody a obmedzenia tejto technológie.

Piata kapitola spočíva v meraní parametrov hlavných komponentov reťazca RoF v pásme C. Hlavnými komponentami sú laser (SFL1550P) a Mach-Zehnderov modulátor (MZM). Meranie zahŕňa parametre: relatívny intenzitný šum (RIN), šírka spektrálnej čiary (FWHM), spektrum optického signálu, parametre S_{11} a S_{21} , vplyv predpätia (Bias) a vloženého útlmu na výstupný optický výkon z MZM a optický extinkčný pomer. Každému parametru je venovaná samostatná podkapitola, v ktorej je uvedený priebeh merania, výsledky merania a použité prístroje potrebné pre meranie daného parametru.

Posledná šiesta kapitola oboznamuje o možnom využití bezkáblových optických spojov v technológii RoF.

V závere je uvedený stručný prierez celou prácou s poukázaním na dosiahnuté výsledky, možné kompenzácie nedostatkov a námety pre ďalšie pokračovanie.

1. RÁDIOVÝ PRENOS OPTICKÝM VLÁKNOM

Technológia umožňujúca prenos rádiového signálu cez optické vlákno, pri ktorej je svetelný (optický) signál modulovaný rádiovým signálom (RF) sa nazýva Radio over Fiber (RoF). Technológia RoF bola vyvinutá s cieľom zefektívnenia komunikačných technológií. Je ľahko aplikovateľná na všetky typy prenosových systémov. Najviac je však spájaná z analógovým prenosom. V oblasti rádiovkej komunikácie značne uľahčuje bezdrôtový prístup. Umožňuje vysielanie a príjem viacerých komunikačných systémov (Wifi, 5G a pod.) a to súčasne pomocou jednej antény. V bežných komunikačných systémoch musí byť každá anténa vybavená samostatným zariadením pre jednotlivé typy systémov. Týmto prevedením sa značne znižujú náklady na zariadenia a údržbu. Technológia RoF odstraňuje problémy v mobilných komunikáciách, kde neustále dochádza k nárastu požiadaviek účastníkov na hlasové, dátové a multimedialne služby. Využitím optického vlákna poskytuje RoF značnú rýchlosť prenosu, dostatočne veľkú šírku pásma a zvyšuje odolnosť voči vysokofrekvenčnému rušeniu. Systém RoF je mobilný, flexibilný a ľahko prístupný. Je veľmi pravdepodobné, že sa RoF stane kľúčovou technológiou v budúcej generácii mobilného komunikačného systému.

1.1 Koncepcia RoF

Rádiový prenos cez optické vlákno sa používa na rôzne účely ako napríklad v sieťach káblovej televízie (CATV) či v satelitných základňových staniciach. Systém RoF sa však používa prevažne pre bezdrôtový prístup [1].

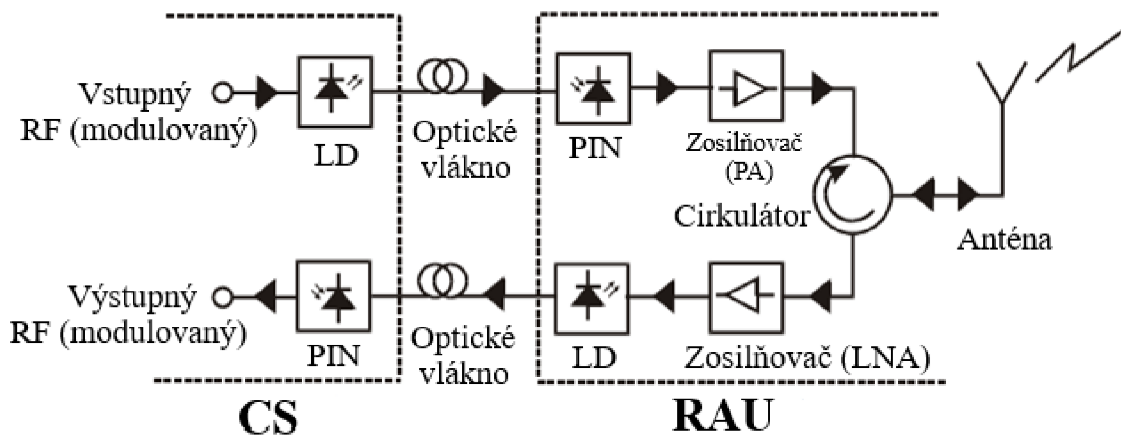
Bezdrôtové signály sú prenášané v optickej forme medzi centrálnou stanicou (CS – Central Station) a súborom základňových staníc (BS – Base Station) alebo do vzdialených anténnych jednotiek (RAU – Remote Antenna Unit). Prenosové médium predstavuje optické vlákno. Poskytuje bezpečné a rýchle spojenie na veľké vzdialenosti bez nutnosti použitia zosilňovačov a opakovačov. Tým značne znižuje náklady oproti použitiu mobilných bezdrôtových jednotiek (antén), prípadne iných prenosových typov káblov.

Väčšina procesov spracovania signálu (kódovanie, multiplexovanie, modulácia RF a pod.) je vykonávaná centrálnou stanicou (CS), čím znižuje nároky BS na spracovanie signálov a teda ju aj značne nákladovo zefektívňuje [2].

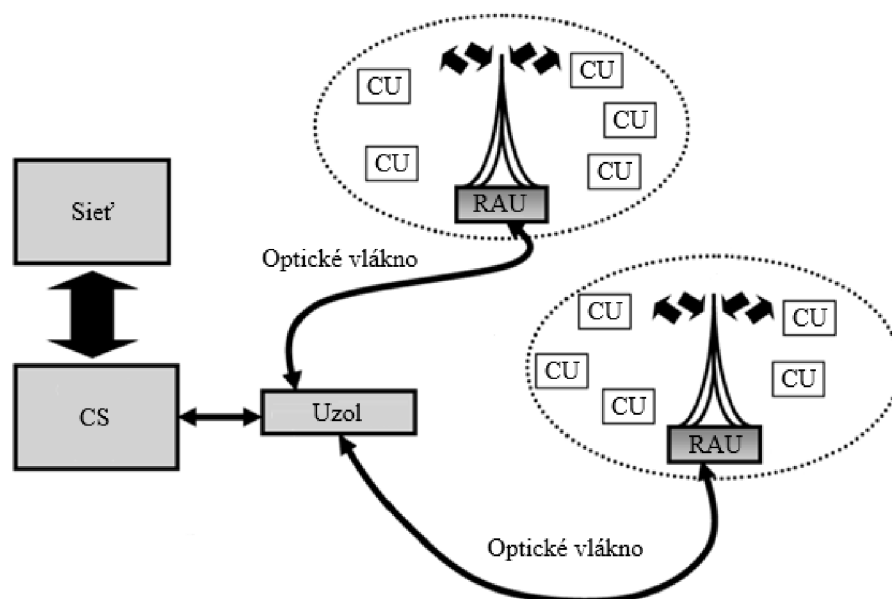
BS spracováva optický signál z CS. V jednotke základňovej stanice BS dochádza k prevodu optického signálu na elektrický a naopak. Súčasťou BS stanice je anténa umožňujúca duplexný prenos, tzn. prenos downlink a uplink RF signálu. Každá BS je prispôbená na komunikáciu prostredníctvom rádiového spojenia s najmenej jednou mobilnou stanicou používateľa umiestnenou v rádiovom dosahu uvedenej základňovej

stanice. V súčasnej a blízkej dobe poskytovania širokopásmových, interaktívnych a multimediálnych služieb prostredníctvom bezdrôtových médií v mobilných aj pevných bunkových sieťach je snaha o vytvorenie nákladovo efektívnej BS [2]. Efektívna BS by používala na prevádzku mikrovlny/milimetrové vlny frekvenčného pásma. Použitie mikrovln/milimetrových vln by zabráňovalo spektrálnemu preťaženiu v nižších frekvenčných pásmach [2]. Jednalo by sa o využitie nových prevádzkových pásiem, pretože nelicencované frekvenčné pásma sú už preťažené. Veľkosť BS by bola ideálne čo najmenšia, s čo najväčším počtom užívateľov. Zmenšovanie veľkosti buniek, tak aby bol počet užívateľov čo najväčší sa nazýva koncepcia mikro-buniek alebo piko-buniek. Tieto opatrenia riešia problém obmedzenia dátovej komunikácie pri neustále rastúcom počte užívateľov. Avšak dôsledkom zmenšenia veľkosti buniek je potrebné naopak zvýšiť počet základňových staníc (BS), kvôli dosiahnutiu pokrytia celej obslužnej oblasti.

Technológia RoF centralizuje funkciu spracovania RF signálu v jednom zdieľanom mieste (centrálne stanica) a s použitím optického vlákna distribuuje RF signál do RAU. Centralizácia funkcií spracovania RF signálu poskytuje zdieľanie zariadení, dynamické pridelovanie zdrojov, zjednodušenú prevádzku a údržbu systému [3]. Vďaka tomu sa RAU výrazne zjednodušuje. Jednoduchá štruktúra vzdialenej anténnej jednotky znamená nižšie náklady na infraštruktúru, nižšiu spotrebu energie zariadenia a ľahšiu údržbu. RAU na svoju funkciu potrebuje len zariadenie optoelektronickej konverzie, zosilňovač signálu a anténu. Na Obrázku 1.1 sú znázornené základné komponenty potrebné na obojsmernú komunikáciu medzi CS a RAU.



Obrázok 1.1 Priebeh komunikácie medzi centrálnou stanicou a vzdialenou anténou jednotkou prevzaté a upravené z [1]



Obrázok 1.2 Konceptia RoF systému prevzaté a upravené z [4]

Na Obrázku 1.2 je zachytená jednoduchá konceptia RoF systému s dvomi RAU. Priebek komunikácie spočíva vo využití centrálnej stanice, optického vlákna a vzdialených anténnych jednotiek. CO spracováva signály zo siete a zaisťuje distribúciu do RAU cez optické vlákno. RAU prevádza konverziu signálu z O/E a bezdrôtovým signálom o frekvencií niekoľko desiatok GHz, vysiela prijatý signál do koncovej stanice (CU – Customer Unit). CU predstavuje ako fixné tak aj mobilné zariadenie užívateľa. RAU zabezpečuje komunikáciu v jednej pico-bunke o veľkosti polomeru typicky do 200 metrov.

1.2 Typy prenosových systémov RoF

Systémy RoF určené na generovanie a prenos signálov v závislosti od frekvenčného rozsahu prenášaného rádiového signálu medzi CS a RAU, sú zvyčajne delené do troch hlavných kategórií [5]:

1. Modulácia RF-over-Fiber (RFoF)
2. Externá IF-over-Fiber (IFoF)
3. Baseband-over-Fiber (BBoF)

Architektúra RF-over-Fiber používa na prenos informácií rádiový signál s frekvenciou zvyčajne vyššou ako je 10 GHz, ktorý je prevedený na optický signál ešte pred transportovaním cez optické vlákno. Technika RFoF predstavuje skutočný prenos

RF signálu. Preto sú optické signály priamo distribuované do vzdialených anténnych jednotiek. V RAU sú rádiové signály prevádzané z optickej do elektrickej formy. Následne sú pred vyslaním zosilnené a vyžiarené anténou až do koncovej stanice (CU).

Architektúra IF-over-Fiber používa na moduláciu optického žiarenia pred transportom cez optické vlákno rádiový signál IF (stredná frekvencia). Jedná sa o frekvencie nižšie ako 10 GHz. Z toho dôvodu je potrebné zaistiť, aby bol signál na základnej stanici (BS) konvertovaný na RF signál ešte pred tým, ako dôjde k bezdrôtovému vyžiareniu signálu anténou.

V architektúre Baseband-over-Fiber je využívaný prenos signálu cez optické vlákno z CS do RAU v základnom pásme. Na RAU po fotodetekcii je signál prevedený na strednú frekvenciu a následne distribuovaný v bezdrôtovej podobe ku koncovým zariadeniam. Pri tomto type prenosu nie je potrebné použitie vysokofrekvenčných oscilátorov, čím šetrí náklady na prenosovú štruktúru.

1.3 Metódy modulácií RoF

Technika modulácie je najvýznamnejším procesom v systéme RoF. V technológiách RoF sú z hľadiska modulačného/demodulačného formátu používané tri typy modulácií [6]:

1. Modulácia intenzity s priamou detekciou (IM-DD – Intensity Modulation and Direct Detection)
2. Externá modulácia s priamou detekciou (EM-DD – External Modulation and Direct Detection)
3. Heterodyniová modulácia s priamou detekciou (HE-DD – Heterodyning with Direct Detection)

IM-DD je najjednoduchšia technika, ktorá spočíva v modulácii intenzity laserového zdroja pomocou rádiového (RF) signálu. V smere downstream je RF signál centrován na frekvenciu f_c a modulovaný priamo v intenzite (IM) počtom fotónov generovaných za sekundu laserovým zdrojom prostredníctvom dynamického riadenia predpätia tohto lasera [6]. Pre digitálny optický prenos spočívajúci v modulácii laserového zdroja dvoma odlišnými predpätiami platí odlišnosť dvoch stavov. V stave logickej „1“ dochádza ku generácii vysokého počtu fotónov a pri nízkom počte fotónov nastáva stav logickej „0“. V praxi je možné dynamicky modulovať predpätie laserového zdroja pomocou analógového signálu, ktorý indukuje kontinuálne zmeny predpätieho prúdu [6]. Optické žiarenie je priamo modulované RF signálom. V mieste prijmu umožňuje fotodetektor zostavenie modulovaného signálu pomocou jeho replík využitím priamej detekcie (DD). Pomocou filtrácie sady replík je možné vyfiltrovať pôvodný signál. Techniku IM-DD používa jednoduché lasery a fotodetektory na frekvenciách do 10 GHz. Pri frekvenciách nad 10 GHz spôsobuje chromatická disperzia vlákna

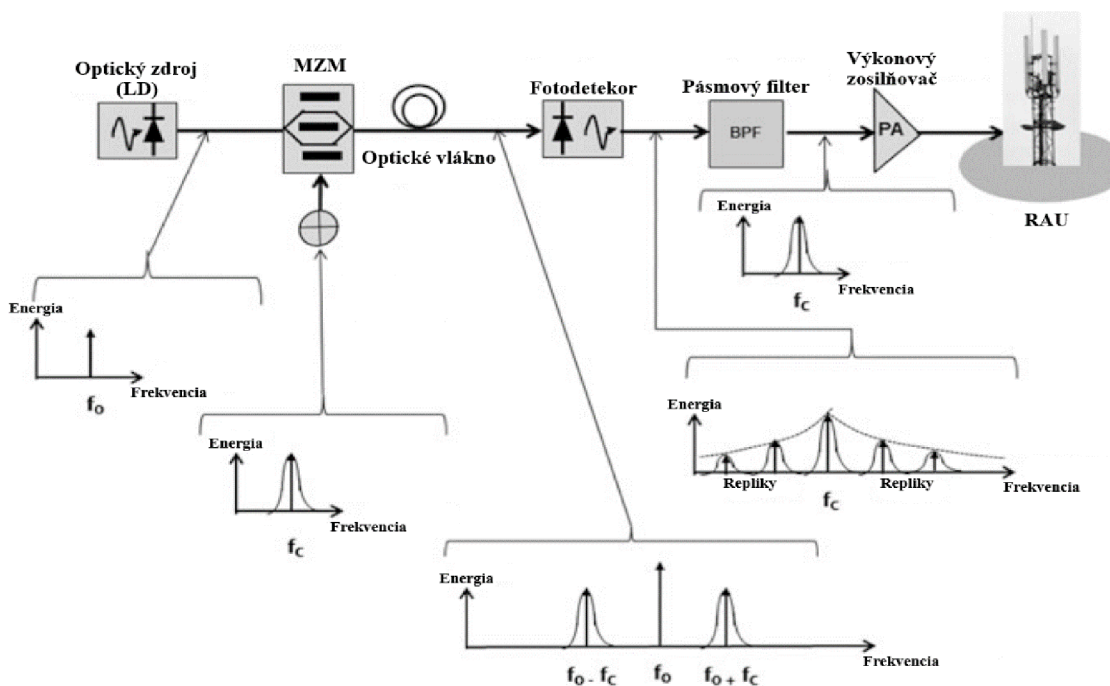
nežiadúce časové rozširovanie optických impulzov [6]. Časové rozširovanie optických impulzov, ktoré narastá úmerne so vzdialenosťou môže spôsobiť prekryvanie impulzov. Tento jav sa nazýva medzi-symbolová interferencia (ISI – Inter Symbol Interference). Jej účinok sa zvyšuje s narastajúcou vzdialenosťou a bitovou rýchlosťou. Z toho dôvodu je nevyhnutné pri vyšších frekvenciách (nad 10 GHz) použiť externú moduláciu lasera.

Pre frekvencie nad 10 GHz sa bitová chybovosť (BER – Bit Error Rate) pozorovaná v mieste spojenia IM-DD stáva neprijateľnou, pretože permanentný režim v laserovej dutine už nie je dynamicky dosiahnuteľný pre vstupný RF signál [4]. To spôsobuje jav nazývaný „chirp“, pri ktorom nosič optického signálu kolíše okolo svojej nominálnej hodnoty. Táto fluktuácia degraduje pomer signál k šumu (SNR – Signal to Noise Ratio) v koncovom bode prenosu. Parameter SNR predstavuje podiel výkonu priaznivého signálu k výkonu nepriaznivého signálu (šum), ktorý je definovaný vzťahom [7]:

$$SNR = \frac{P_s}{P_n}, \quad (1.1)$$

kde P_s je hodnota výkonu priaznivého signálu a P_n je hodnota výkonu šumovej zložky.

Z toho dôvodu je externá modulácia s priamou detekciou EM-DD výhodnejšia. Kontinuálny laserový zdroj (CW laser) je postmodulovaný pomocou Mach-Zehnderovho modulátora (MZM), ktorý zabraňuje javu tzv. „chirp“ [6]. V koncovej stanici sa po demodulácii fotodetektorom obnoví pôvodný signál v rádiovkej doméne pomocou jej replík viz. Obrázok 1.3. Rovnako ako u IM-DD aj pri EM-DD je použitý pásmový filter, ktorý umožňuje extrahovať požadovaný modulovaný RF signál, ktorý je nakoniec zosilnený a vyžiarený anténou.

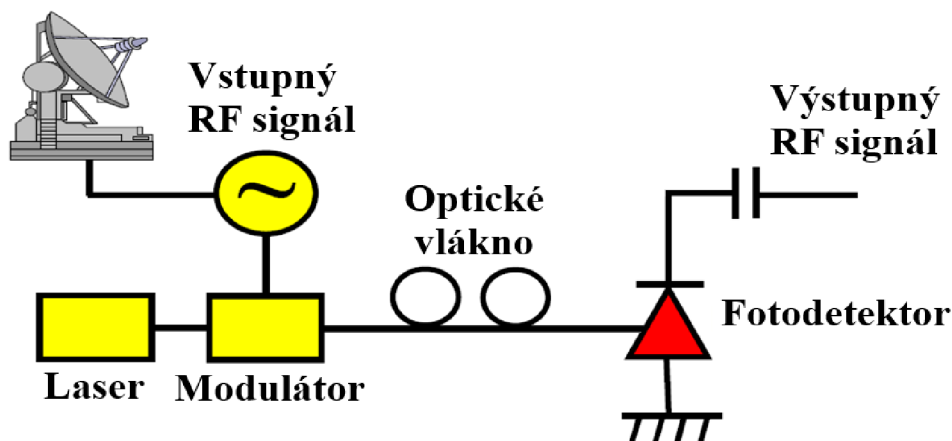


Obrázok 1.3 Princíp EM-DD prevzaté a upravené z [4]

Hlavné obmedzenia techník IM-DD a EM-DD je ich účinnosť len pre nízke RF a nutnosť zaistenia nízkej chromatickej disperzie optického vlákna pri prenose optického signálu medzi CS a RAU. Vzdialená detekcia heterodynňovania (RHD) je spôsob, ako zlepšiť vysokofrekvenčný rozsah systému RoF. Táto technika spočíva v superpozícii toho istého vlákna medzi CS a RAU na dve optické polia E_1 a E_2 s blízkymi uhlovými frekvenciami ω_1 a ω_2 . E_1 predstavuje modulované informácie, ktoré sa posielajú z CS do RAU a E_2 je spojité vlna výkonu. Fotodetektor v koncovej stanici vyhodnotí optickú energiu prijatého signálu, ktorý vznikne súčtom oboch polí $E_1 + E_2$ [6]. Základnou myšlienkou heterodynňového procesu je voľba uhlového kmitočtu, ktorý zodpovedá očakávanej rádiovkej frekvencii. Frekvenčné signály prenášané v dvoch vetvách sú si veľmi podobné, pretože rádiové frekvencie o hodnote f_c sú oveľa nižšie ako optická nosná f_0 . Vo vetvách sa nachádzajú pásmové filtre, kvôli odstráneniu replík. Po zlúčení signálov z jednotlivých vetví vzniká výsledný signál, ktorý predstavuje očakávaný modulovaný RF signál. Signál je následne prenesený cez optické vlákno do fotodetektoru. Po priamej detekcii je modulovaný RF signál zosilnený a vyžiarený anténou. Na rozdiel od IM-DD a EM-DD umožňuje heterodynňová modulačná metóda s priamou detekciou vytvorenie systému RoF schopného pracovať aj na frekvenciách vyšších ako 10 GHz. Okrem poskytnutia vyšších frekvencií je HE-DD málo citlivý na chromatickú disperziu optického vlákna.

2. TOPOLÓGIA ROF

Topológia RoF systému obsahuje vysielaciu a prijímaciu časť, ktoré sú vzájomne prepojené optickým vláknom. Vo vysielacom sa RF signál moduluje s optickým žiarením, ktorý je generovaný zdrojom (laser). Výsledný modulovaný signál je ďalej prenášaný pomocou optického vlákna až do prijímača. V prijímači dochádza k prevodu optického signálu na elektrický signál pomocou fotodetektora (fotodióda). Elektrický signál je následne priamo distribuovaný do koncových zariadení alebo zosilnený a vyžiarený anténou. Táto topológia je znázornená na Obrázku 2.1.



Obrázok 2.1 Topológia RoF systému prevzaté a upravené z [2]

2.1 Zdroj optického signálu

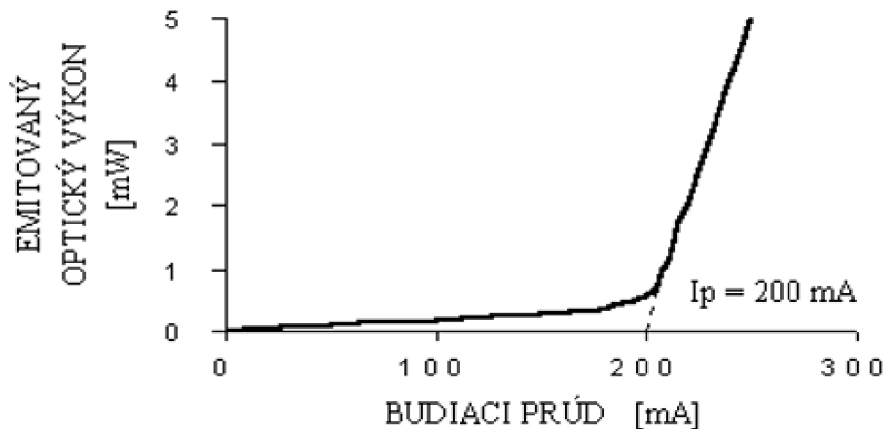
Jednou z hlavných zložiek optického spoja predstavuje práve zdroj optického signálu. Ako svetelný zdroj sa používajú nekoherentné zdroje akými sú napríklad luminiscenčné diódy (LED – Light-emitting Diode) alebo zdroje koherentné laser (Laser – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), prípadne laserová dióda (LD – Laser Diode). Tieto zdroje využívajú ku generácii optického žiarenia rekombináciu elektrónov a dier do oblasti polovodičového prechodu P-N. Voľné nosiče sú do oblasti prechodu injektované vplyvom priloženého napätia v priepustnom smere.

2.1.1 Laserová dióda

Funkcia laserovej diódy (LD) diódy rovnako ako aj u laserov je založená na princípe stimulovanej emisie. Stimulovaná emisia je proces vyvolaný dopadajúcim žiarením (tok fotónov) na aktívnu látku. Dopad fotónu (fotónov) o energii rovnajúcej rozdielu príslušných energetických hladín spôsobí uvoľnenie a pád elektrónu z vyššej do nižšej energetickej hladiny. To má za následok vznik ďalšieho fotónu s rovnakými vlastnosťami. Prostredím teda putujú dva fotóny v rovnakom smere, o rovnakej vlnovej dĺžke a fáze [8]. Týmto

spôsobom dochádza k zvyšovaniu počtu fotónov, narastá energia, ktorá je následne vyžiarená v podobe laserového lúča. Z toho dôvodu je LD považovaná za polovodičový laser. Disponuje lepšími koherenčnými vlastnosťami ako LED, ale horšími ako samotný laser. Preto v aplikáciách vyžadujúcich vysoký stupeň koherencie je uprednostňovaný laser.

Hranica spontánnej a stimulovanej emisie je znázornená na Obrázku 2.2. Prúdy o jednotkách mA prechádzajú LD, bez toho aby ju uviedli do stavu laserovania. Teda v oblasti pod hodnotou prahového prúdu dochádza len k spontánnej emisii tzn. generácia nekoherentného žiarenia. Dosiahnutím prahovej hodnoty prúdu I_p približne okolo hodnoty 200 mA dochádza k stimulovanej emisii a laserová dióda začína produkovať koherentné žiarenie. Nastáva exponenciálny nárast optického výkonu pri nepatrnom zvyšovaní prúdu. Vysoká hodnota optického výkonu spôsobuje teplotnú nestabilitu, ktorú je nutné kompenzovať chladením. Hodnota prahového prúdu narastá približne o 15 % na 1 °C [8].



Obrázok 2.2 Závislosť emitovaného optického výkonu na budiacom prúde prevzaté z [8]

Optický výkon (žiarivý tok) P daný vzťahom 2.1 sa generuje u LED diód spontánnou emisiou, ktorá umožňuje nezávislé generovanie fotónov v oblasti P-N prechodu [8].

$$P_o = \frac{E}{t}, \quad (2.1)$$

kde E je optická intenzita a t je časová jednotka.

U LD sa žiarivé prechody neuskutočňujú medzi diskretnými energetickými hladinami ako u laserov, ale vznikajú medzi energetickými pásmi. Podmienkou žiarivých prechodov u LD je nutnosť dostatočne veľkej energie fotónov na to aby, boli schopné prekonať šírku zakázaného pásu. Platí teda vzťah [8]:

$$E_g < h \cdot \nu, \quad (2.2)$$

kde E_g je šírka zakázaného pásu udávaná v jednotkách a súčin $h \cdot \nu$ predstavuje energiou fotónov schopných prekonať zakázaný pás.

Kvôli zosilneniu svetelného žiarenia obsahuje LD optický rezonátor. Rezonátor vzniká obrúsením čelných plôch kryštálu, tak aby vytvárali nepriepustné a polopriepustné zrkadlá, čím vytvárajú tzv. Fabry-Perotov rezonátor. Zrkadlá vymedzujú priestor aktívnej látky. Medzi zrkadlami dochádza k mnohonásobnému odrazu žiarenia. Neustále prechody žiarenia cez aktívnu látku spôsobujú zosilnenie žiarenia. Aby sa žiarenie bolo schopné medzi zrkadlami udržať musia byť splnené určité podmienky, ktoré súvisia s odrazivosťou a zakrivením zrkadiel. Vďaka týmto podmienkam dochádza k optickej rezonancii elektromagnetickej vlny o určitej frekvencii a fázy, čím vzniká stojaté vlnenie. Výstupné monochromatické, koherentné žiarenie je vyžarované z malej čelnej plochy laserovej diódy.

S rastúcim prúdom narastá aj počet generovaných fotónov (hustota fotónového toku), čo má za následok ďalšie rekombinácie. Zväčšujúci sa počet generovaných fotónov dosahuje maximálnej možnej energie a vedie k zúženiu spektrálnej čiary. Žiarenie vychádzajúce zo zdroja nemá nikdy lineárne rozloženie, ale má tvar Gaussovej funkcie viz. Obrázok 2.4. Obrázok zachytáva šírku spektrálnych čiar LED a LD, pričom ich vrcholy predstavujú hranice maximálneho výkonu nekoherentného (LED) a koherentného žiarenia (LD). Oproti LED vykazuje laserová dióda o niekoľko rádov vyššiu spektrálnu čistotu. LED zaberá omnoho širšie pásmo okolo danej vlnovej dĺžky (λ).

Gaussov zväzok je opísateľný dvoma hlavnými parametrami pološírkou zväzku a polomerom krivosti vlnoplochy. Pološírka Gaussovho zväzku znázorňuje vzdialenosť od osy zväzku k okraju zväzku. Pričom okraj zväzku je definovaný ako vzdialenosť od osy zväzku v mieste, kde optická intenzita poklesne na hodnotu $I = I_{\max} \cdot e^{-2}$. V závislosti na súradnici z je pološírka Gaussovho zväzku definovaná vzťahom [10]:

$$w(z) = w_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2}, \quad (2.3)$$

pričom

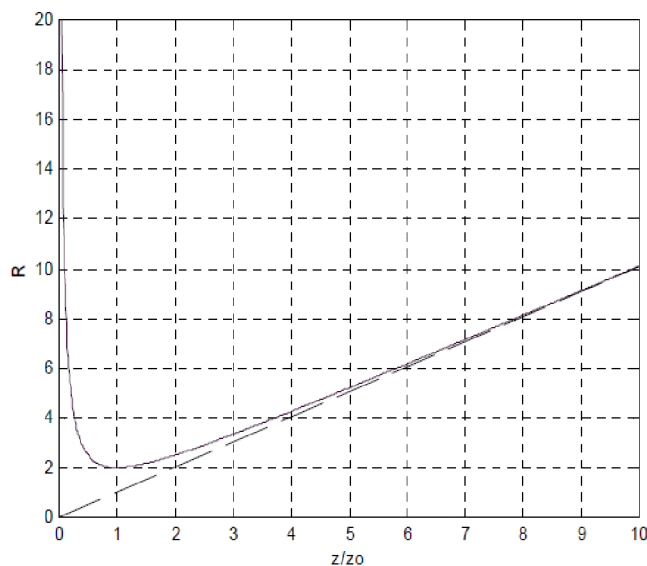
$$z_0 = \frac{k \cdot w_0^2}{2}, \quad (2.4)$$

kde z_0 predstavuje tzv. Rayleighovu vzdialenosť. Tá určuje hranicu blízkej a vzdialenej zóny žiarenia. Teda popisuje či má Gaussov zväzok Fresnelov alebo Fraunhoferov charakter. Taktiež určuje zakrivenie vlnoplochy. w_0 je pološírka zväzku v jeho najužšom bode (krčku), z je vzdialenosť na priestorovej súradnici od stredu zväzku a k je vlnové číslo.

Polomer krivosti popisujúci tvar vlnoplochy je daný vzťahom [10]:

$$R(z) = z \cdot \left[1 + \left(\frac{z}{z_0} \right)^2 \right], \quad (2.5)$$

Grafické znázornenie vzťahu 2.5 je na Obrázku 2.3. Najmenšie hodnoty polomeru krivosti vlnoplochy (R) nastávajú v situácií $z = z_0$ a platí $R(z) = 2 \cdot z_0$. V krčku zväzku ($z = 0$) prechádza vlnoplocha rovinou ($R \rightarrow \infty$) a pre narastajúce z nad všetky medze sa graf asymptoticky blíži k priamke ($R = z$) so smernicou $\pi/4$.

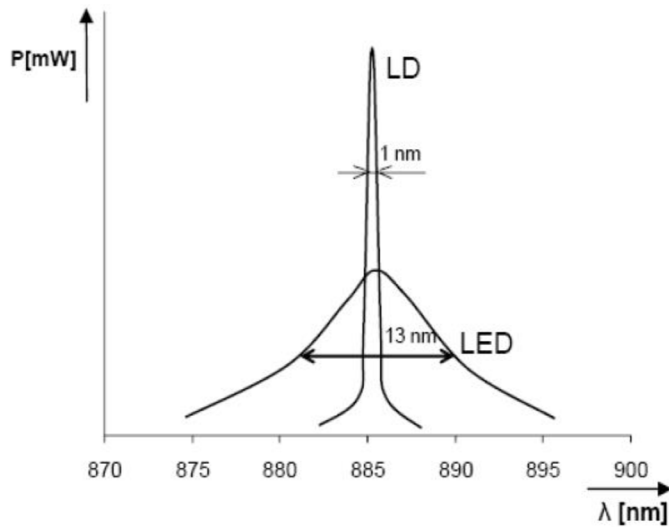


Obrázok 2.3 Závislosť polomeru krivosti Gaussového zväzku na súradnici z prevzaté z [10]

Divergencia zväzku predstavuje uhol θ_0 , ktorý zviera asymptota hyperboly s osou zväzku. Od Rayleighovej vzdialenosti tzn. ďaleko od stredu zväzku ($z \gg z_0$) narastá jeho polomer približne lineárne so zväčšujúcou sa hodnotou z , čím vytvára kužeľ s vrcholovým uhlom $2 \cdot \theta_0$. V tomto kuželi sa šíri väčšina celkového výkon až 86 %. Divergencia zväzku je definovaná matematickým predpisom [10]:

$$\theta_0 = \frac{w(z)}{z} = \frac{2}{k \cdot w_0} = \frac{\lambda}{\pi \cdot w_0}, \quad (2.6)$$

kde z_0 predstavuje Rayleighovu vzdialenosť, λ je vlnová dĺžka optického žiarenia.



Obrázok 2.4 Porovnanie šírky spektrálnej čiary LD a LED prevzaté z [8]

Kvôli fluktuáciám optického výkonu laserového žiarenia od nominálnej hodnoty je nutné u LD špecifikovať parameter nazývaný relatívny intenzitný šum (RIN). RIN predstavuje šum výkonu normalizovaný na priemernú úroveň výkonu. Pri prenose žiarenia sú výkyvy optického výkonu zapríčinené nežiadúcou prítomnosťou šumovej zložky o určitej intenzite. Za optický výkon lasera sa dá považovať výkon daný vzťahom[11]:

$$P(t) = \underline{P} + \delta P(t), \quad (2.7)$$

kde \underline{P} je priemerná hodnota a δP je nepravidelne meniaci sa (kolísavá) veličina s nulovou strednou hodnotou.

V takom prípade je možné hodnotu relatívnej intenzity šumu vypočítať ako podiel kolísavej veličiny a priemerného výkonu:

$$RIN = \frac{\delta P(t)}{\underline{P}}, \quad (2.8)$$

RIN potom možno štatisticky opísať pomocou výkonovej spektrálnej hustoty (PSD – Power Spectral Density), ktorá závisí od frekvencie šumu f_n . Výpočet je možný pomocou Fourierovej transformácie autokorelačnej funkcie normalizovaných fluktuácií výkonu [11]:

$$S_{RIN}(f) = \frac{2}{P^2} \int_{-\infty}^{+\infty} (\delta P(t) \cdot \delta P(t + \tau)) \cdot \exp(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot t \cdot \tau) d\tau, \quad (2.9)$$

Faktor 2 vo vyššie uvedenom vzorci 2.9 vedie k jednostrannej PSD. Okrem výpočtu je možné k hodnote RIN dôjsť aj meraním pomocou fotodiódy a elektronického spektrálneho analyzátoru. Ten využíva vzorkovanie výstupného prúdu fotodiódy v čase. Aplikáciou rýchlej Fourierovej transformácie je schopný previesť údaje do frekvenčnej oblasti. RIN je veličina vyjadrovaná v jednotkách Hz^{-1} alebo v logaritmickej miere dBc/Hz. V prípade integrovania v určitom intervale kmitočtov šumu $[f_1, f_2]$ na získanie

hodnoty koreňového priemeru (r.m.s.) šumu je relatívna intenzita vyjadrovaná v percentách. Toto vyjadrenie však nie je časté.

$$\frac{\delta P}{P} |_{rms} = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} S_{RIN}(f) df}, \quad (2.10)$$

Množstvo RIN laserového lúča nezostáva konštantné, ani pri vystavení lúča lineárnemu útlmu. RIN je obmedzená výstrelovým šumom. V takom prípade je RIN vypočítateľná vzťahom:

$$S_{RIN,sn}(f) = \frac{2 \cdot h \cdot \nu}{P}, \quad (2.11)$$

Kvantovo obmedzené merania RIN by mali byť vykonávané detekciou celého výkonu lasera napr. s fotodiódou, pričom sa minimalizuje vplyv nadmerného šumu (napr. tepelného šumu).

Dióda LED je využívaná v menej náročných optických prenosoch, prevažne na krátke vzdialenosti. V technológiách akou je napríklad RoF je potrebné, aby zdroj optického signálu disponoval úzkou spektrálnou čiarou, ktorá by umožnila veľkú smerovosť vyslaného žiarenia. Tieto vlastnosti spĺňa laserová dióda. Veľký dôraz na jej využitie v systéme RoF spočíva v jednoduchej a rýchlej modulácii budiacim prúdom do vyšších frekvencií (GHz). LD okrem toho ponúka aj veľmi dobrú väzbu na vlákno. Jej optický výstup puzdra je vybavený kúskom optického vlákna, do ktorého je zavedený výkon LD, tzv. pigtail [15]. Je schopná pracovať v impulznom aj kontinuálnom režime. Hodnota optického výkonu v kontinuálnom režime dosahuje hodnoty od 0,1 mW po 100 mW. Zatiaľ čo v impulznom prevedení je optický výkon rádovo vyšší až 100W. V komunikačných technológiách je LD využívaná aj vďaka rýchlej dobe nábehu menej ako 1 ns. V neposlednom rade disponuje malými rozmermi, čo predstavuje veľký benefit v praktickom prevedení.

2.2 Modulátor

Základné komponenty vysielača tvoria optický zdroj žiarenia (laser) a modulátor. Modulátor je zariadenie schopné vykonávať moduláciu signálu. Modulácia je proces, v ktorom modulačný signál o frekvencií f_0 (v základnom pásme) nesúci nejakú informáciu ovplyvňuje jeden alebo viac parametrov nosnej vlny. Modulačný signál je kombinovaný s nosným vysokofrekvenčným signálom o frekvencií f_c . V RoF systéme je ako nosný signál využívaný práve RF signál. Ich spojením vzniká modulovaný signál, ktorého vlastnosti odpovedajú nosnej vlne. Tým je možné modulovaný signál prenášať prenosovým médium napríklad optickým vláknom. Dôvodom vykonávania modulácie je zefektívnenie prenosu signálu. Jednou z veľkých výhod modulácie je prenos viacerých signálov v jednom frekvenčnom pásme, na rôznych vlnových frekvenciách, jedná

sa o tzv. multiplexovanie [12]. Najčastejšími aspektami signálu, ktoré sa používajú na moduláciu signálu sú amplitúda, frekvencia a fáza. Najobľúbenejším a najčastejšie používaným typom modulátora v optických komunikačných systémoch RoF je Mach-Zehnderov modulátor (MZM) lítium-niobát ($LiNbO_3$).

Mach-Zehnderov modulátor využíva na riadenie optickej vlny amplitúdovú moduláciu. Amplitúdová modulácia (AM) predstavuje jednoduchú spojitú moduláciu. Amplitúda nosného signálu sa mení v závislosti od zmien modulačného signálu. V AM modulácií dochádza len k zmenám amplitúdy nosného signálu. Frekvencie a fáza nosnej zostávajú konštantné. Na jednoduché matematické vyjadrenie modulovaného signálu s použitím AM je potrebné uvažovať modulačný a nosný signál s harmonickým priebehom. V takom prípade má aj výsledný modulovaný signál harmonický charakter. Definovaním tvarov $u_m = U_m \cdot \sin(\Omega \cdot t)$ pre modulačný signál, $u_n = U_n \cdot \sin(\omega \cdot t)$ pre nosný signál a $u_{m,n} = U_{m,n} \cdot \sin(\omega \cdot t)$ pre modulovaný signál s kmitočtom pôvodnej nosnej vlny ω s amplitúdou meniacou sa v závislosti od okamžitej amplitúdy modulačného signálu u_m . Po matematických úpravách je možné dospieť k výslednej rovnici, ktorá vyjadruje modulovanú nosnú vlnu [13].

$$u_{m,n} = U_n \cdot \sin(\omega \cdot t) + \frac{U_m}{2} \cdot \pi \cdot (f_c - f_0) \cdot t - \frac{U_m}{2} \cdot \pi \cdot (f_c + f_0) \cdot t, \quad (2.12)$$

kde prvá zložka predstavuje nosnú vlnu, druhá zložka dolné postranné pásmo a posledná zložka horné postranné pásmo.

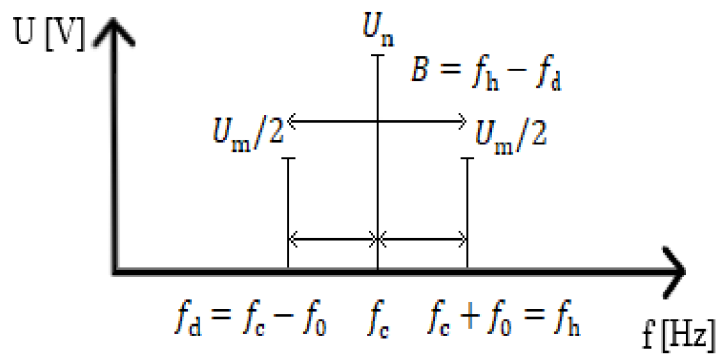
Spektrum amplitúdovo modulovaného signálu vzniká posunom f_0 do iného frekvenčného pásma k f_c po oboch stranách. Postranné zložky vytvárajú dolné postranné pásmo $f_d = f_c - f_0$ a horné postranné pásmo $f_h = f_c + f_0 = f_h$ viz. Obrázok 2.5. Súčet postranných pásiem predstavuje šírku pásma jedného vysielacieho kanálu, ktorý je možné vypočítať vzťahom [14]:

$$B = f_h - f_d = 2 \cdot f_0, \quad (2.13)$$

kde f_h je najvyššia frekvencia a f_d je najnižšia frekvencia prenášaného signálu.

V percentuálnom vyjadrení pre tento prípad by došlo k zmene vzorca [14] na tvar:

$$B [\%] = \frac{f_h - f_d}{f_c}, \quad (2.14)$$



Obrázok 2.5 Spektrum AM signálu s vyznačením šírky pásma kanálu

Miera premodulovania nosného signálu udáva parameter nazývaný ako hĺbka modulácie. Tento parameter je daný vzťahom [13].

$$m = \frac{U_m}{U_n}, \quad (2.15)$$

kde m je koeficient amplitúdovej modulácie, U_m je hodnota maximálnej amplitúdy modulačného signálu a U_n je maximálna amplitúda nosného signálu.

V percentuálnom vyjadrení pre tento prípad by došlo k zmene vzorca [13] na tvar:

$$m [\%] = \frac{U_m}{U_n} \cdot 100, \quad (2.16)$$

Pomocou parametru m je možné v časovej oblasti určiť maximálnu hodnotu obálky modulovaného signálu potrebnej k prenosu signálu. V spektrálnej oblasti sa zmena parametru m prejavuje zmenou výšky postranných spektrálnych čiar.

2.2.1 Funkcia MZM

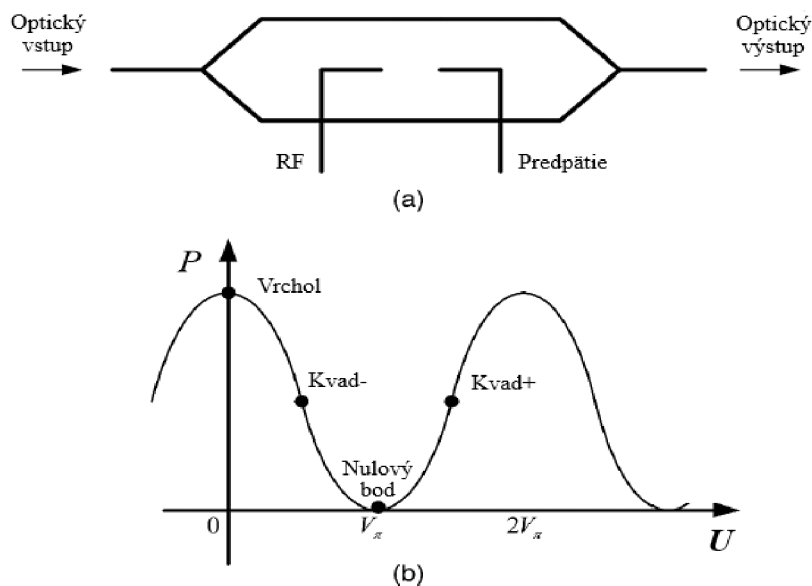
Zdroj optického žiarenia (laser) vybudí optickú vlnu, ktorá vstupuje do modulátoru. V modulátore sa optická vlna vplyvom svetelného deliča rovnomerne rozdelí do dvoch ramien interferometra. Okrem dvoch ramien obsahuje MZM aj dve elektródy. Jedna elektróda slúži na privedenie RF signálu. Podľa typu modulátora Single Drive MZM alebo Dual Drive MZM je rádiový signál privedený do jedného alebo do dvoch ramien. Pomocou druhej elektródy je možné nastavenie predpätia (pre oba typy modulátora) do oboch ramien interferometra viz. Obrázok 2.6. Zmenou veľkosti privedeného napätia na elektródu je možná regulácia optickej fázy v každom ramene. Predpätia sú potrebné na prevádzku MZM v špičkových, kvadrátorných a nulových prevádzkových režimoch viz. Obrázok 2.6. V závislosti od požadovaného prevádzkového bodu je nutné nastavenie potrebného predpätia. Okolie kvadrátorného bodu predstavuje najčastejší pracovný režim, kvôli stabilnej prevádzke MZM. Kvadrátorný bod sa nachádza v časti priebehu charakteristickej krivky s takmer lineárnym priebehom. Jedná sa teda o najstabilnejší pracovný úsek MZM. Okolie respektíve rozsah stabilnej

oblasti je možné vypočítať pomocou parametra nazývaného optický extinkčný pomer, ktorý je najčastejšie vyjadrovaný v percentách, je definovaný vzťahom [15]:

$$r_e = \frac{P_1 - P_0}{P_1 + P_0}, \quad (2.17)$$

kde P_1 je úroveň optického výkonu pri zapnutom svetelnom zdroji P_0 je naopak úroveň optického výkonu pri zdroji vypnutom.

Na výstupe MZM sa nachádza druhý svetelný delič. Pomocou neho dochádza k rekombinácii optického signálu prechádzajúceho cez obe ramená modulátora. V prípade stretnutia dvoch optických vln s rovnakou fázou dochádza k ich vzájomnému sčítaniu. Ak sa však optické vlny stretnú vo fázach opačných nastáva ich vzájomné odčítanie. Fázový rozdiel medzi dvoma vlnami sa prevedie na amplitúdovo modulovaný signál. Tento signál je ďalej prenášaný cez optické vlákno do vzdialenej anténnej jednotky (RAU), odkiaľ je bezdrôtovým prenosom vyžiarený až do CU.



Obrázok 2.6 Horný obrázok po a) zobrazuje obdĺžnikové usporiadanie Mach-Zehnderovho modulátora a spodný obrázok po b) zobrazuje charakteristickú krivku modulátora s významnými bodmi prevzaté a upravené z [15]

$LiNbO_3$ Mach-Zehnderov modulátor umožňuje stabilnú prevádzku vo veľkom teplotnom rozsahu. Poskytuje pracovné použitie v rozsahu vlnových dĺžok od 1300 nm do 1600 nm. Na rozdiel od iných typov interferometrov má MZM obrovskú výhodu. Najčastejšie sa u Mach-Zehnderovho modulátora používa obdĺžnikové usporiadanie. MZM je všeobecne označovaný ako elektricko/optický prevodník (E/O prevodník). Podľa najnovších výskumov je jeho využiteľnosť oveľa väčšia ako len E/O prevodník,

napríklad je ho možné použiť na dosiahnutie linearizácie alebo na kompenzáciu disperzie zavedenej do signálu pri prechode optickým vláknom. Špeciálne navrhnutý MZM je schopný riešiť oba problémy súčasne.

2.3 Optické vlákno

Optické vlákno je prenosové médium schopné prenášať informácie pomocou svetelných impulzov, ktoré predstavujú nosiče informácie až ku koncovému zariadeniu. Z hľadiska prenosu je možné sa na vlákno pozeriť ako na valcový dielektrický vlnovod, v ktorom sa šíria elektromagnetické vlny (primárne svetlo alebo infračervené žiarenie) v smere osi vlákna.

2.3.1 Princíp šírenia svetelných impulzov v optickom vlákne

Svetelné lúče sa v optickom vlákne šíria z jedného konca do druhého za pomoci odrazov. Pre popis takto sa šíriacich svetelných lúčov slúžia zákon odrazu a zákon lomu viz. Obrázok 2.7.

Zákon odrazu:

- veľkosť uhla odrazu α' sa rovná veľkosti uhla dopadu α , pričom odrazený lúč zostáva v rovine dopadu, tzn. v rovine danej dopadajúcim lúčom a kolmicou na rozhraní povrchu, teda $\alpha = \alpha'$ [16].

Zákon lomu (Snellov zákon):

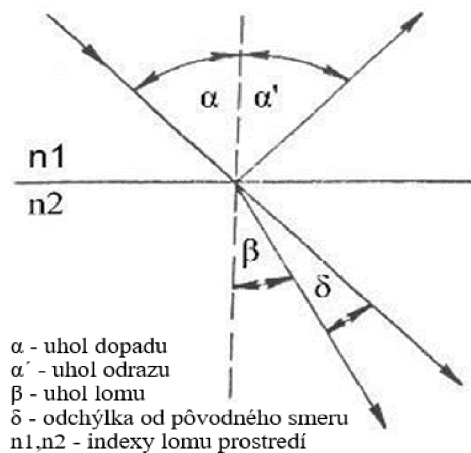
- podiel rýchlostí svetla v_1 (rýchlosť dopadajúceho lúča) a v_2 (rýchlosť lomeného lúča) je rovný podielu sínusov uhla dopadu (α) a uhla lomu (β). Index lomu vyjadruje zmenu rýchlosti šírenia svetla pri prechode medzi dvoma rôznymi prostrediami. Platí, že čím je hodnota indexu lomu väčšia, tým pomalšie sa svetlo pohybuje v danom prostredí. Pomocou indexov lomu je možné Snellov zákon vyjadriť v tvare [16]:

$$n_1 \cdot \sin(\alpha) = n_2 \cdot \sin(\beta), \quad (2.18)$$

kde n_1 a n_2 predstavujú rozdielne hodnoty indexov lomu dvoch prostredí. Hodnotu indexu lomu konkrétneho prostredia je možné určiť vzťahom [16]:

$$n = \frac{c}{v}, \quad (2.19)$$

kde c predstavuje hodnotu rýchlosti svetla vo vákuu s hodnotou $c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a v hodnotu rýchlosti svetla šíriacom sa v danom prostredí.



Obrázok 2.7 Grafické znázornenie zákonov odrazu a lomu prevzaté z [16]

Zo zákonov odrazu a lomu vyplýva, že je veľmi podstatné pod akým uhlom lúč dopadá na rozhranie dvoch prostredí a či sa lúč šíri z opticky hustejšieho prostredia do redšieho alebo naopak. V prípade, že sa svetelný lúč šíri z opticky hustejšieho do opticky redšieho prostredia, tak s rastúcim uhlom dopadu sa zväčšuje aj uhol lomu (nastáva lom od kolmice).

Môže nastať až stav, kde uhol lomu je rovný pravému uhlu, tzn. $\beta = \frac{\pi}{2}$, z toho vyplýva $\sin(\beta) = 1$ a zákon lomu sa zmení na tvar:

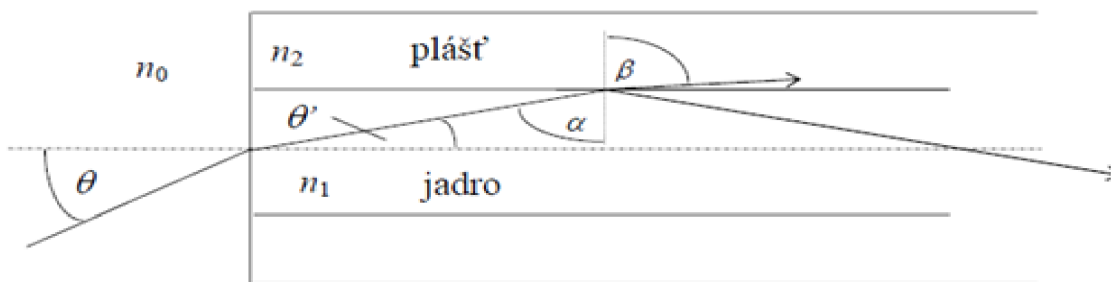
$$\sin(\alpha_m) = \sin(\alpha) = \frac{v_1}{v_2}, \quad (2.20)$$

kde α_m predstavuje hodnotu medzného (kritického) uhla. Hodnotu medzného uhla je možné určiť zo vzťahu [10]:

$$\alpha_m = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right), \quad (2.21)$$

Medzný uhol je najväčší možný uhol dopadu, pri ktorom ešte dochádza k lomu vlnenia.

V prípade prekročenia tejto hranice, teda ak $\alpha > \alpha_m$, dochádza k takzvanému totálnemu (úplnému) odrazu, pri ktorom sa vlnenie do druhého prostredia vôbec nedostane a odráža sa späť do pôvodného prostredia. Pre lepšie znázornenie šírenia lúča v optickom vlákne slúži Obrázok 2.8.



Obrázok 2.8 Šírenie svetelného lúča v optickom vlákne prevzaté z [10] (n_0 – index lomu vzduchu, n_1 – index lomu jadra, n_2 – index lomu plášťa, θ – uhol dopadu svetla na rozhranie vzduch-jadro, θ' – uhol lomu svetla v jadre, α – uhol dopadu svetla na rozhranie jadro-plášťa, β – uhol lomu svetla v plášti)

Pri dopadaní svetelného lúča do optického vlákna sa využíva princíp totálneho odrazu na rozhraní dvoch prostredí (jadro-plášť) s rôznymi indexmi lomu. Jadro predstavuje opticky hustejšie prostredie s indexom lomu materiálu n_1 a plášť opticky redšie prostredie s indexom lomu materiálu n_2 . Na to aby nedochádzalo k lomu vlnenia musí byť splnená podmienka $n_1 > n_2$. Typicky sa tieto hodnoty od seba odlišujú len o pár stotín. Bežné hodnoty indexu lomu jadra a plášťa sú $n_1 = 1,48$ a $n_2 = 1,46$. Vďaka tomu, svetelné lúče neprenikajú do plášťa ale zostávajú v jadre vlákna.

Pre šírenie svetelného lúča v optickom vlákne totálnym odrazom, musí lúč do vlákna vstupovať pod uhlom, ktorý je menší ako medzný uhol. Rozsah uhlov predstavuje akýsi „vstupný kužeľ“ vlákna, ktorý zaisťuje pri vstupe lúča do vlákna šírenie úplnými odrazmi sa nazýva numerická apertúra (NA). Veľkosť NA pre vlákno s homogénnym jadrom so skokovou zmenou indexu lomu je možné vyjadriť vzťahom [10]:

$$NA = \sin(\theta) = \frac{n_1}{n_0} \cdot \sqrt{1 - \theta'} = \frac{n_1}{n_0} \cdot \sqrt{1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}} = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}, \quad (2.22)$$

kde θ je maximálny uhol, pod ktorým sa vstupujúce lúče budú ešte šíriť od začiatku až po koniec vlákna, θ' je uhol lomu lúča v jadre (doplnek maximálneho uhla θ) a n_0 je index lomu vzduchu $n_0 \approx 1$.

Podmienkou pre vedenie optického žiarenia optickým vláknom je teda totálny odraz lúča na rozhraní jadro-plášť. Ak je hraničná veľkosť uhla lúča vzhľadom k osi vlákna prekročená (dopadajúci lúč prekročil hodnotu stanovenú vstupným kužeľom), dôjde na styku jadra s plášťom k jeho lomu. Lúč sa v takom prípade neodrazí (nezostáva v jadre), ale prechádza do plášťa, kde dochádza k jeho vystúpeniu von z vlákna.

2.3.2 Konštrukcia optického vlákna

Optické vlákno pozostáva z tenkého jadra, plášťa a obalu. Veľkosť jadra závisí od typu vlákna (single/multi-módové). Pri výrobe jadra sa používajú rôzne druhy skla, najčastejšie sa jedná o kremičité sklo (SiO_2), v niektorých prípadoch má jadro aj plastové prevedenie. Pováčšine je jadro vyrobené z legovaného skla (napríklad $\text{GeO}_2 + \text{SiO}_2$), zatiaľ čo plášť je konštruovaný z čistého skla (SiO_2) [17]. Pridávanie prímiesi kremičitého skla zaisťuje rozdielne indexy lomu jadra a plášťa. Týmto prevedením je zaistená podmienka pre šírenie svetelného lúča po optickom vlákne pomocou totálneho odrazu. Jadro je obalené plášťom. Existujú tri možné prevedenia:

- a) Ultra čisté sklo (Ultra Pure Glass)
- b) Sklenené jadro s plastovým obalom (Plastic Clad Silica)
- c) Plastové optické vlákno (Plastic Fiber Optic)

V prvom prípade sa jedná o použitie ultra čistého skla pre jadro a plášť zároveň. V bode b) ide o použitie skleneného jadra a plastového plášťa a v bode c) majú jadro a plášť plastové prevedenie. Typy b) a c) sú značne lacnejšie, ale vykazujú väčšiu hodnotu útlmu pri prenose ako celosklený typ vlákna a).

Pri oboch typoch vlákna je používaná rovnaká hrúbka plášťa a to 125 μm . Poslednú vrstvu tvorí obal. Obal je delený do dvoch častí na primárnu a sekundárnu ochranu, ktoré chránia optické vlákno pred mechanickým poškodením. Primárna ochrana zaisťuje dostatočnú pružnosť a sekundárna ochrana zvyšuje odolnosť optického vlákna.

2.3.3 Typy vlákna

Existujú dve kritéria, podľa ktorých je možné deliť optické vlákna do kategórií. Prvým z nich je delenie podľa počtu módov šíriacich sa vo vlákne:

- a) Single-módové (SM)
- b) Multi-módové (MM)

U single-módového alebo mono-módového vlákna sa lúč optického signálu šíri paralelne s osou jediného vlákna celým jeho prierezom. Nedochádza v ňom k takmer žiadnym odrazom a lomom pri šírení signálu. Malý priemer jadra má za následok veľký uhol odrazu vo vlákne, čo vedie k menšiemu predĺženiu dráhy lúča. Vďaka tomuto spôsobu šírenia vykazuje SM vlákno veľmi malý útlm signálu a umožňuje prenos dát na veľmi veľké vzdialenosti (mestá, štáty, kontinenty). Veľkosť prierezu jadra sa pohybuje v najbežnejších typoch SM v rozmedzí od 8 μm do 10 μm . Pre komplikovaný proces zmenšenia jadra vlákna je SM vlákno pomerne nákladné. Zvyčajne používané vlnové dĺžky pre tento typ vlákna sú 1310 nm a 1550 nm [17].

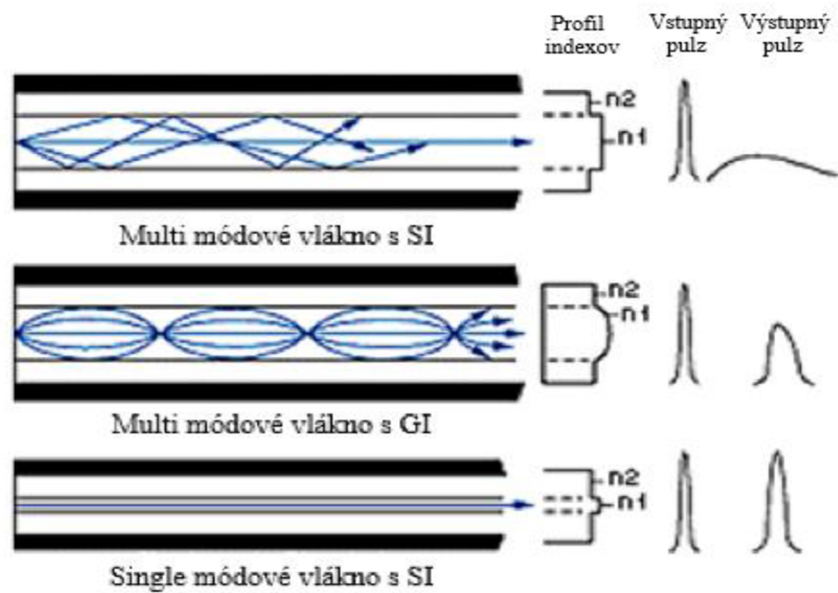
Multi-módové vlákno využíva na prenos signálu viacero vidov (lúče svetla s rovnakou vlnovou dĺžkou). Pri MM type je šírka jadra značne väčšia. Najčastejšie používané hodnoty sú 50 μm a 62,5 μm , v niektorých aplikáciách sa vyskytujú aj vyššie hodnoty šírky jadra. V tomto prevedení je optický signál rozptýlený do viacerých ciest s využitím metódy totálneho odrazu na rozhraní jadro-plášť. Tento režim je však nežiadúci pre diaľkové vysokorýchlostné spoje, keďže svetlo sa v jednotlivých vidoch (módoch) šíri pod rôznymi uhlami odrazu a s rozličnou rýchlosťou, čo spôsobuje predlžovanie (rozptyl) svetelných pulzov pri prechode vláknom. Z toho dôvodu sa najčastejšie používa pri komunikácií na krátke vzdialenosti, zvyčajne do 600 metrov (vnútro budovy, areály a pod.). Rýchlosť prenosu sa pohybuje v rozmedzí 10 Mbit/s až 10 Gbit/s. Využíva vlnové dĺžky 850 nm a 1310 nm [17].

Druhým kritériom je zmena indexu lomu medzi jadrom a plášťom optického vlákna. Táto zmena môže nastávať buď skokovo (rázna zmena hodnoty indexu lomu), alebo spojito (plynulo sa meniaci zmena indexu lomu) viz. Obrázok 2.9. V rámci tohoto kritéria existujú dva typy:

- a) Step index (SI)
- b) Gradient index (GI)

Skoková zmena indexu lomu SI je uplatnená v SM aj MM vláknach. V multi-módovom vlákne so skokovým profilom indexu lomu sú lúče svetla vedené pozdĺž jadra pomocou totálnej reflexie. Nevýhodou pri tomto prevedení je vznik vidovej disperzie, ktorá obmedzuje šírku prenášaného pásma.

U vlákien s plynulou zmenou indexu lomu GI sa hodnota indexu lomu znižuje so vzdialenosťou od stredu vlákna. GI prevedenie je možné len v multi-módových vláknach. Vlákno pozostáva z tisícov tenkých vrstiev, ktoré sa medzi sebou odlišujú hodnotou indexu lomu. Čím je lúč viac vzdialený od osi jadra, tým je index lomu menší. Lúč prechádza až do kolmice a následne sa vracia k ose vlákna. Optický signál putujúci cez MM vlákno teda opisuje sínusovú krivku. Vďaka tomu majú jednotlivé vidy šíriace sa MM vláknom približne rovnaké časové oneskorenie na výstupe vlákna a tým dochádza k eliminácii vidovej disperzie (nižšia hodnota skreslenia) [18].



Obrázok 2.9 Spôsob šírenia svetelných lúčov a tvary pulzov na vstupe a výstupe u jednotlivých typov optických vlákien prevzaté a upravené z [18]

Počet vybudených vidov (módov) M pre vlákna typu SI a GI, je možné vypočítať pomocou parametru vlákna V („normovaná frekvencia“), ktorý je daný vzťahom [10]:

$$V = 2 \cdot \pi \cdot \frac{a}{\lambda_0} \cdot (NA), \quad (2.23)$$

kde a je polomer jadra vlákna, λ_0 je vlnová dĺžka vo vákuu a NA je numerická apertúra.

V situácií, kedy je splnená podmienka $V \gg 1$ platí pre SI [2]:

$$M \approx \frac{V^2}{2}, \quad (2.24)$$

a pre GI platí [2]:

$$M \approx \frac{V^2}{4} \quad (2.25)$$

2.3.4 Útlm optického vlákna

Aj keď je dosiahnutý úplný odraz optického žiarenia pri prenose optickým vláknom, neprechádza svetelný lúč úplne bez strát. Tak ako v každom prenosovom médiu (napr. metalický kábel) aj v optických vláknach sa výkon prenášaného signálu s narastajúcou vzdialenosťou od zdroja postupne znižuje. Útlm je všeobecne vyjadriteľný ako logaritmická bezrozmerná veličina, ktorá udáva pomer medzi vstupnou a výstupnou hodnotou výkonu. Je udávaný v jednotkách [dB]. Útlm L je definovaný vzťahom [19]:

$$L = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{\text{IN}}}{P_{\text{OUT}}} \right), \quad (2.26)$$

kde P_1 je vstupný svetelný výkon a P_2 je výstupný svetelný výkon.

Merný útlm L_m predstavuje meradlo strát optickej energie vo vlákne pre danú vlnovú dĺžku λ na jednotku dĺžky vlákna. Je definovaný vzťahom [19]:

$$L_m = \frac{1}{l} \cdot 10 \cdot \log \left(\frac{P_{\text{IN}}}{P_{\text{OUT}}} \right), \quad (2.27)$$

kde P_1 je vstupný svetelný výkon a P_2 je výstupný svetelný výkon a l je hodnota dĺžky vlákna zväčša sa jedná o hodnotu 1 km. Merný útlm L_m je spektrálne závislý tzn. na rovnom vlákne so zvyšujúcou sa vlnovou dĺžkou svetla merný útlm klesá. V prípade výrazných ohyboch vlákna však so zvyšujúcou sa vlnovou dĺžkou svetla naopak stúpa.

Hlavnými príčinami vzniku útlmu pri prenose svetelného signálu optickým vláknom sú absorpcia a disperzia (rozptyl) svetelných lúčov. Straty prenášaného signálu vznikajú priamo vo vlákne, na rozhraní prostredí vlákna, pri spojovaní a ohýbaní vlákna. Straty spôsobujúce útlm prenášaného signálu vznikajú v dôsledku materiálových vlastností a vplyvom vonkajšieho pôsobenia. Na základe týchto strát rozlišujeme:

- a) Materiálová absorpcia
- b) Materiálový rozptyl
- c) Straty vplyvom ohybu

Materiálová absorpcia súvisí so stratami vznikajúcich v materiáli jadra vlákna. Predstavuje súčet vlastnej a nevlastnej absorpcie. Vlastná absorpcia spočíva v pohltení časti optického žiarenia molekulami materiálu vlákna, tzn. časť optického žiarenia sa mení na teplo. Výroba vlákna je veľmi zložitý proces súvisiaci s chemickými reakciami, v ktorých hrá významnú úlohu práve voda (H_2O). Kvôli nedokonalosti pri výrobe zostávajú v jadre vlákna ióny hydroxidu (OH^-), ióny kovov (Fe, Cu a pod.), ktoré zapríčiňujú absorpciu optického žiarenia na niektorých vlnových dĺžkach. Jedná sa o tzv. nevlastnú absorpciu.

Najvýznamnejšími materiálovými rozptylmi sú Rayleighov a Mieov rozptyl. Tieto typy rozptylov spôsobujú najväčšie straty. Rayleighov rozptyl vzniká vplyvom častíc oveľa menších ako je vlnová dĺžka svetla. Straty závisia od veľkosti vlnovej dĺžky. Čím je hodnota vlnovej dĺžky menšia, tým dochádza k väčšiemu rozptýleniu. Výpočet intenzity Rayleighovho rozptylu žiarenia je daný vzťahom [10]:

$$i_\lambda = K \cdot \frac{I_\lambda}{\lambda^4}, \quad (2.28)$$

kde i_λ predstavuje intenzitu rozptýleného žiarenia, K je koeficient priepustnosti o hodnote, I_λ je intenzita priameho slnečného žiarenia o danej vlnovej dĺžke a λ je konkrétna hodnota vlnovej dĺžky.

K Mieovmu rozptylu dochádza na nehomogenitách (častice), ktorých veľkosť je približne rovnaká ako veľkosť vlnovej dĺžky svetelného žiarenia šíriacim sa optickým vláknom. Súvisí s nedokonalosťami valcovej štruktúry vlákna, kolísaním priemeru vlákna a pod.

Straty ohybom sú spôsobené vonkajšími faktormi pri ich inštalácií. Podľa veľkosti ohybu môžu byť ohyby delené na mikroohyby a makroohyby. V týchto typoch ohyboch alebo pri nedokonalých spojoch nastáva nežiadúci jav tzv. „scattering“. Jedná sa o jav, kedy časť optického žiarenia opúšťa jadro optického vlákna. Na to aby komunikácia po vlákne prebiehala čo možno najefektívnejšie je dôležité tento jav eliminovať na maximálnu možnú mieru. Pôsobením vonkajšieho tlaku na vlákno, nedokonalostiam povrchu alebo geometrickým nedostatkom pri výrobe (bublínky a pod.) vznikajú mikroohyby. Tieto nedostatky zapríčiňujú stratu intenzity svetelného lúča. Makroohyby vznikajú nevhodným zakrivením optického vlákna pri inštalácií. V prípade príliš malého zakrivenia (ostrého) svetelný lúč dopadá na rozhranie jadro-plášť pod väčším uhlom ako je kritický uhol. Dochádza k refrakcií a časť lúča opúšťa jadro vlákna. Aby sa predišlo k stratám spôsobených makroohybmi je štandardne odporúčaný najmenší polomer ohybu vlákna rovný desaťnásobku celého priemeru vlákna [17].

Hodnotu celkového merného útlmu je tiež možné vyjadriť pomocou súčtu všetkých útlmov vznikajúcich v dôsledku nežiadúcich javov pri výrobe a inštalácií optického vlákna.

$$L_m = L_A + L_R + L_O , \quad (2.29)$$

kde L_A je útlm absorpciou, L_R je útlm materiálového rozptylu a L_O je útlm spôsobený makroohybom a mikroohybom.

2.3.5 Disperzia v optickom vlákne

Je jav, ktorý zapríčiňuje skreslenie prijímaného signálu. Dôsledkom disperzie (rozptylu) je deformácia tvaru impulzov, tzn. znižuje veľkosť amplitúdy a rozširuje priebeh impulzov (v čase) prechádzajúcich optickým vláknom. Už samotné optické vlákno je disperzné prostredie, teda vykazuje odlišné vlastnosti pre rôzne vlnové dĺžky a vidy optického žiarenia.

a) Vidová disperzia:

Je vlastnosť MM vlákien (nevyskytuje sa v SM vláknoch), ktorá spôsobuje, že každý vid šíriaci sa rôznou rýchlosťou po rôznych dráhach dorazí na koniec optického vlákna v inom čase. Nežiaduce vplyvy spôsobené vidovou disperziou majú niekoľko násobne väčšie následky ako pri chromatickej disperzií. Z toho dôvodu sa v telekomunikáciách rovnako aj v technológiách RoF využívajú SM vlákna, ktoré odstraňujú vplyv vidovej disperzie.

b) Chromatická disperzia:

Rôzne spektrálne zložky vidu majú odlišnú rýchlosť šírenia. Čím je vlnová dĺžka chromatickej zložky kratšia, tým sa šíri pomalšie. Z vlnovou dĺžkou sa mení aj index lomu. Chromatická disperzia je hlavným faktorom v SM vláknach, ktorý obmedzuje prenosovú rýchlosť.

c) Polarizovaná disperzia

V SM vláknach sa prejavuje jav nazývaný polarizačná módová disperzia (PMD). Vid putujúci po SM vlákne sa šíri v dvoch vzájomne kolmých polarizačných rovinách. Dôsledkom kruhovej nesymetrie vlákna dochádza k šíreniu polarizačných vidov rôznou rýchlosťou, to zapríčiňuje ich vzájomný posun, následkom čoho nastáva rozširovanie impulzov alebo skreslenie signálu. PMD závisí od viacerých faktorov ako sú výroba vlákna, spojovanie vlákien, ohyby pri montáži a pod. Tento parameter významne ovplyvňuje prenosové rýchlosti signálu optickým vláknom. Polarizačná disperzia je omnoho menšia ako ostatné typy disperzií. Jej vplyv je však nepotlačiteľný. Jedinou možnou elimináciou je použitie špeciálnych typov vlákien s priestorovou orientáciou.

Optické vlákno je disperzné médium, v ktorom sa fázová a skupinová rýchlosť líšia viac alebo menej v závislosti od použitého materiálu pre jadro a plášť optického vlákna. To znamená, že rôzne harmonické lúče laserového žiarenia sa nešíria rovnakou rýchlosťou. Dôvodom rôznej rýchlosti jednotlivých lúčov je fakt, že index lomu jadra sa mení s frekvenciou šíriaceho sa lúča. Z toho dôvodu je potrebné optické vlákno medzi CS a RAU charakterizovať nízkou chromatickou disperziou, aby sa zabránilo jeho rušivému účinku.

2.4 Fotodetektor

Na konci topológie RoF sa nachádza prijímacia časť, ktorá je tvorená demodulátorom a detektorom optického žiarenia. Detektor žiarenia je zariadenie schopné prevádzať dopadajúcu energiu vyžiarenú zdrojom na niektorú merateľnú elektrickú veličinu napr. prúd, napätie, odpor, vodivosť a pod. Po absorbovaní energie dochádza k zmene fyzikálnych vlastností detektoru. Jedná sa o zmeny špecifické daným druhom detektorov napr. zmena teploty pri tepelných detektoroch. Vzhľadom na funkcionality sú detektory delené do troch typov a to konkrétne tepelné, fotochemické a fotoelektrické [20].

Pre technológiu RoF sú najvýznamnejšie a najpoužívanejšie práve fotoelektrické detektory. Energia optického žiarenia je prevádzaná na energiu elektrickú. Ich funkcia môže byť založená na fotovodivostných zmenách, fotodielektrickom jave, na vnútornom alebo vonkajšom fotoelektrickom jave.

Vonkajší fotoelektrický jav popisuje interakciu emitovaného (vybudeného) fotónu zo zdroja optického žiarenia s elektrónom nachádzajúcim sa v atómovom obale. Výsledkom tejto interakcie je odovzdanie všetkej energie fotónu-elektrónu. Časť tejto energie je spotrebovaná na uvoľnenie elektrónu z atómových väzieb. Zvyšok energie

predstavuje kinetickú energiu E_k elektrónu, ktorý je schopný opustiť atóm. Elektrón, ktorý atóm opustil sa nazýva fotoelektrón. Tento fotoelektrón putuje látkou a ďalej ionizuje okolie [10]. Pri vnútornom fotoelektrickom jave nedochádza k úniku elektrónu z atómu. Všeobecne je fotoelektrický jav daný rovnicou [10]:

$$h \cdot f = W_v + E_k, \quad (2.30)$$

kde $h \cdot f$ predstavuje energiu dopadajúceho žiarenia, pričom parameter h predstavuje Plankovú konštantu o hodnote $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, f je hodnota frekvencie (značenie zaužívané z kvantovej teórie), W_v je výstupná práca nutná pre uvoľnenie elektrónu z atómových väzieb a E_k je kinetická energia elektrónu opusteného atómu.

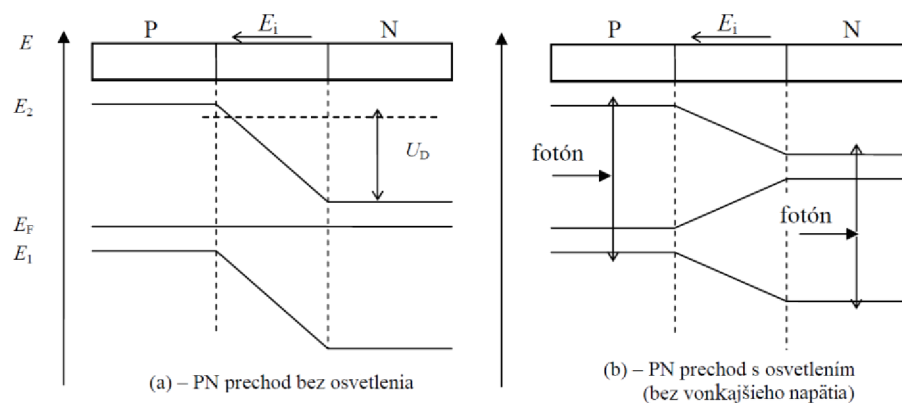
Existuje celá rada fotodetektorov využívajúcich vonkajší fotoelektrický jav pre konverziu svetelného signálu na elektrický napr. fotodiódy, fototranzistory, fotoodpory, fotoelektrické články a pod. Každý fotodetektor je využiteľný len pre určité vlnové dĺžky dopadajúceho žiarenia. Najviac používanými fotodetektormi sú dióda typu PIN a lavínová fotodióda (APD – Avalanche Photodiode). Fotodiódy sú polovodičové súčasti, ktoré obsahujú tri oblasti typu P, typu N a P-N prechod. Ak dopadá žiarenie do oblasti P-N prechodu, tak dochádza ku generácii minoritných nosičov. Minoritnými nosičmi v oblasti typu P sú elektróny a v oblasti typu N diery. Od intenzity osvetlenia závisí množstvo minoritných nosičov. Čím je intenzita osvetlenia vzorec 2.31 väčšia, tým je počet nosičov väčší, tzn. že platí priama úmera.

Intenzita osvetlenia alebo len osvetlenie E_v je fotometrická veličina, ktorá vyjadruje množstvo svetelného toku na jednotku plochy. Je definovaná vzťahom [10]:

$$E_v = \frac{d\theta}{dS_a}, \quad (2.31)$$

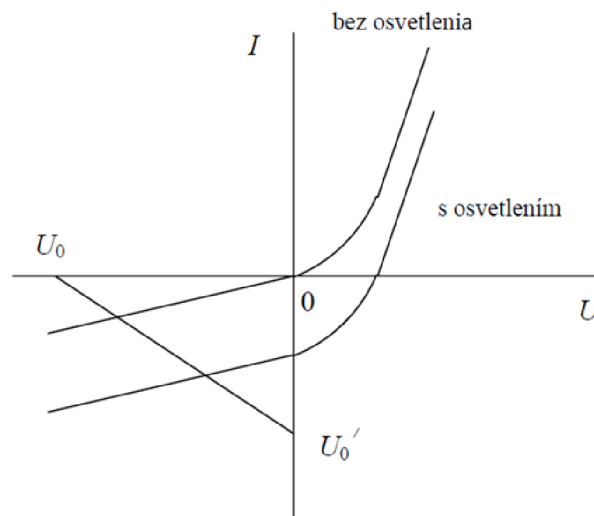
kde $d\theta$ predstavuje deriváciu svetelného toku na jednotku plochy S_a v kvadratickej miere.

Intenzita osvetlenia má za následok dodanie množstva energie, potrebnej ku generovaniu párov elektrón-diera, pričom sa elektróny presúvajú do oblasti N a diery do oblasti P. Tým dochádza k čiastočnej neutralizácii rozloženia náboja v P-N prechode, čo má za následok zmenu úrovne Fermiho hladiny viz. Obrázok 2.10. Na P-N prechode vzniká rozdiel potenciálov, ktorý závisí na intenzite osvetlenia a od odporu vonkajšieho obvodu. Difúzia elektrónov prebieha v smere od P oblasti k N oblasti. Diery rovnako ako aj vnútorné elektrické pole sa šíria v smere opačnom, teda od oblasti N k P oblasti. Vzniká záverná vrstva medzi polovodičmi P a N, ktorá je citlivá na svetlo pri narastajúcom závernom prúde. Z toho dôvodu sú fotodiódy zapojované v nepriepustnom (závernom) smere [17].



Obrázok 2.10 Znáznornenie energetických hladín P-N prechodu fotodiódy a vznik minoritných nosičov náboja (U_D je vnútorné napätie potenciálovej bariery a E_F je Fermiho hladina) prevzaté z [10]

Pre popis chovania polovodičových súčiastok akým je aj fotodióda slúži Volt-ampérová charakteristika viz. Obrázok 2.11 Graf V-A charakteristiky zachytáva závislosť prúdu pretekajúcej fotodiódou a napätia na jej svorkách v osvetlenom stave a bez osvetlenia.



Obrázok 2.11 V-A charakteristika fotodiódy prevzaté z [18]

Okrem V-A charakteristiky sú vlastnosti chovania fotodetektorov vyjadriteľné za pomoci matematických vzťahov. Najdôležitejšími parametrami určujúcimi dostatočnosť a vhodnosť použitia fotodetektoru pre konkrétne aplikácie sú časová konštanta, elektrická kapacita, citlivosť a ekvivalentný šumový výkon. Matematické popisy daných parametrov sú definované nasledovne [10]:

$$\tau_f = \frac{w_p}{v_T}, \quad (2.32)$$

kde τ_f predstavuje časovú konštantu fotodiódy, w_p je šírka vrstvy medzi vrstvou typu P a typu N a v_T je rýchlosť nosičov náboja. Tento vzťah vyjadruje dobu presunu nosičov náboja potrebnú na prekonanie izolačnej vrstvy.

Ďalším dôležitým parametrom je elektrická kapacita fotodiódy respektíve P-N prechodu. Tento parameter je závislý na veľkosti aktívnej plochy. Čím je veľkosť aktívnej plochy väčšia, tým je fotodióda schopná väčšieho príjmu výkonu, ale na úkor zväčšenia časovej konštanty τ . Veľkosť aktívnej plochy býva typicky kruhového tvaru s priemerom od 0,1 mm do 3 mm. Elektrická kapacita fotodiódy je daná vzťahom [10]:

$$C = \varepsilon \cdot \frac{S_p}{w_p}, \quad (2.33)$$

kde ε predstavuje permitivitu daného prostredia a S je plocha prechodu.

Citlivosť fotodiódy je spektrálne závislá. Táto závislosť je pre určité vlnové dĺžky znázornená na Obrázku 2.12. Okrem určenia hodnoty citlivosti pomocou grafu, je možné prúdovú citlivosť vyjadriť matematickým vzťahom [10]:

$$S_I = \frac{dI}{dP}, \quad (2.34)$$

kde dI predstavuje deriváciu prúdu na výstupe fotodiódy a dP je derivácia optického výkonu, ktorý na fotodiódu dopadá. Podobným vyjadrením je možné vzťah 2.34 prepísať na definíciu napät'ovej citlivosti [10]:

$$S_U = \frac{dU}{dP}, \quad (2.35)$$

kde dU predstavuje deriváciu napätia na výstupe fotodiódy a dP je derivácia optického výkonu, ktorý na fotodiódu dopadá.

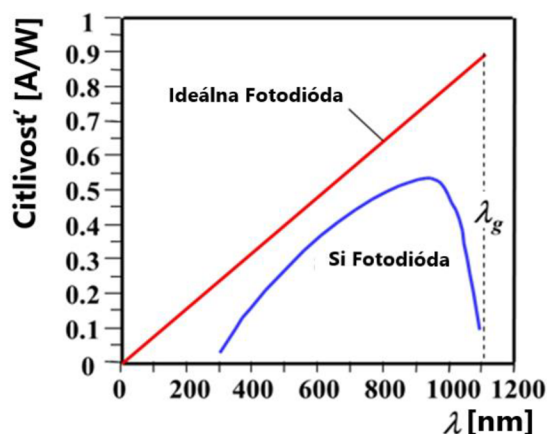
Ekvivalentného šumový výkon (NEP – Noise Equivalent Power) definuje šumové vlastnosti fotodiódy. NEP určuje stredný výkon harmonicky modulovaného optického výkonu, pri ktorom je stredná hodnota napätia na fotodióde rovná štandardnej odchýlke šumového napätia. Čím je hodnota ekvivalentného šumového výkonu nižšia, tým lepšie je príslušný detektor schopný rozoznať nízko úrovňové signály v prítomnosti šumu. Jeho matematické vyjadrenie je určené vzťahom [10]:

$$NEP = \frac{\sqrt{(\Delta u_n)^2}}{S_U}, \quad (2.36)$$

kde Δu_n predstavuje štandardnú odchýlku šumového napätia a S_U je napät'ová citlivosť na fotodióde derivácia optického.

Najčastejšie sa však NEP vzťahuje na jednotku šírky pásma prenosu B . Vyjadruje sa v jednotkách $[W \cdot \sqrt{Hz}]$. Keďže výkon šumu je priamo úmerný \sqrt{B} je prepis NEP pozmenený na tvar:

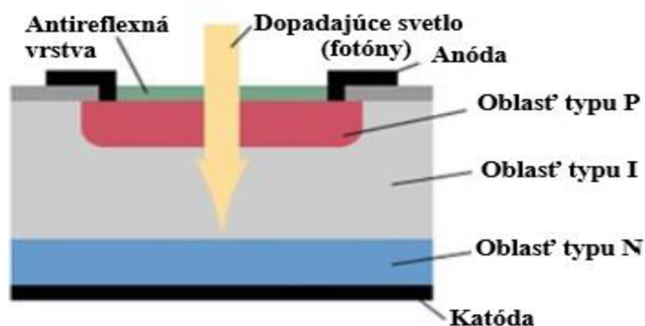
$$NEP_B = \frac{\sqrt{(\Delta u_n)^2}}{S_U \cdot \sqrt{B}}, \quad (2.37)$$



Obrázok 2.12 Porovnanie závislostí citlivosti detekcie kremikovej fotodiódy a ideálnej fotodiódy k vlnovej dĺžke prevzaté z [18]

2.4.1 Fotodióda PIN

V tomto type fotodiódy je medzi polovodičmi typu P a typu N vložená izolačná vrstva alebo tzv. intrinzická vrstva. Pre lepšie znázornenie slúži Obrázok 2.13. V izolačnej oblasti sa nachádza silne a rovnomerné rozložené elektrické pole, ktoré spôsobuje rýchli presun nosičov náboja tzv. drift. To prispieva k zlepšeniu dynamických vlastností fotodiódy. Nastávajú prechody P-I a I-N. Účelom izolačnej vrstvy je rozšírenie oblasti interakcie fotónov s látkou a dosiahnutie vyššej citlivosti. Z princípu usporiadania vrstiev je odvodený jej názov fotodióda PIN. Fotodiódy PIN sú schopné detekovať nízko úrovňové signály na malé vzdialenosti.

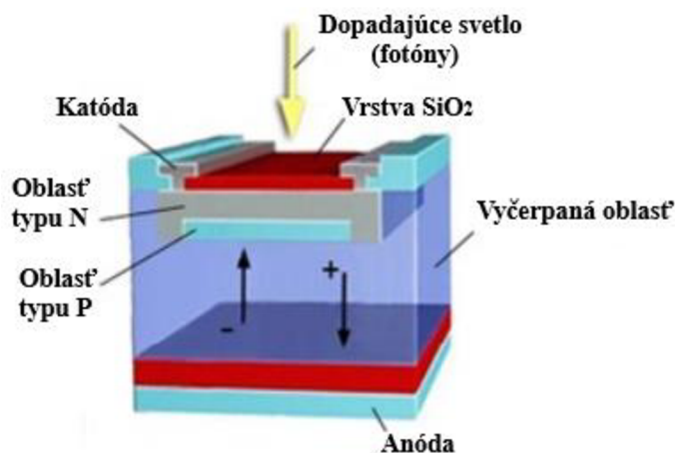


Obrázok 2.13 Princíp usporiadania fotodiódy PIN prevzaté z [20]

2.4.2 Lavínová fotodióda

Tento typ fotodiódy vznikol na základe potreby zvýšenia citlivosti, ktorá sa dosiahla rozšírením izolačnej vrstvy a zvýšením hodnoty priloženého napätia oproti fotodióde typu PIN. U fotodiódy APD viz. Obrázok 2.14 dochádza vplyvom silných elektrických polí, ktoré vznikli v dôsledku veľkého napätia pripojeného v závernom smere (10tky

až 100kV) k efektu, ktorý sa nazýva tzv. lavínový efekt. Lavínový efekt nastáva pri dosiahnutí požadovanej veľkosti elektrického poľa, ktoré zapríčiňuje urýchlenie voľných nosičov náboja (elektrónov) schopných opustiť atóm. Uvoľnené elektróny po interakciách s fotónmi sú opäť urýchľované. Dochádza k nárazom elektrónov do okolitých atómov v kryštálovej mriežke, čo umožňuje generovanie ďalších elektrónov, z ktorých vznikajú nové elektrón-dierové páry. Ich počet exponenciálne narastá. Maximálny nárast je často dosiahnutý v priebehu niekoľkých pikosekúnd. Vzniká takzvaná lavína elektrónov, ktorá spôsobuje prútok veľmi veľkých prúdov obmedzených len vonkajším elektrickým poľom [20]. V prípade nedostatočnej rýchlosti nosičov náboja tzn. slabé elektrické pole, by došlo k absorbovaniu nosičov atómom a teda k zastaveniu lavínového procesu.



Obrázok 2.14 Princíp usporiadania fotodiódy APD prevzaté z [20]

Použitie fotodiódy APD nachádza uplatnenie v aplikáciách vyžadujúcich vysokú citlivosť. Aplikácie tohto typu predstavujú napríklad komunikačné systémy využívajúce prenosy optického signálu na dlhé vzdialenosti. Takouto technológiou je práve systém RoF. Pri prenose na dlhé vzdialenosti dochádza k poklesu intenzity svetelného signálu prenášaného optickým vláknom. Fotodióda APD je najčastejšie využívaná s napätím tesne pod hranicou priernozného napätia. V tomto režime stačí nepatrná udalosť akou je napríklad dopad jediného fotónu, ktorý vyvolá lavínový efekt. Takýto režim je využívaný k zosilneniu nízko úrovňových signálov. Vplyvom veľkého zosilnenia, ktoré poskytuje fotodióda APD, nie je potrebné na konci prenosovej trasy inštalovať zosilňovače signálu. Znižuje tak počet zariadení potrebných k detekcii optického signálu, čím finančne zjednodušuje náklady prenosového systému. Pretože je lavínový efekt veľmi rýchly je možné lavínovú fotodiódu používať na detekciu stredných až vysokých frekvencií.

3. VÝHODY ROF

3.1 Veľká šírka pásma

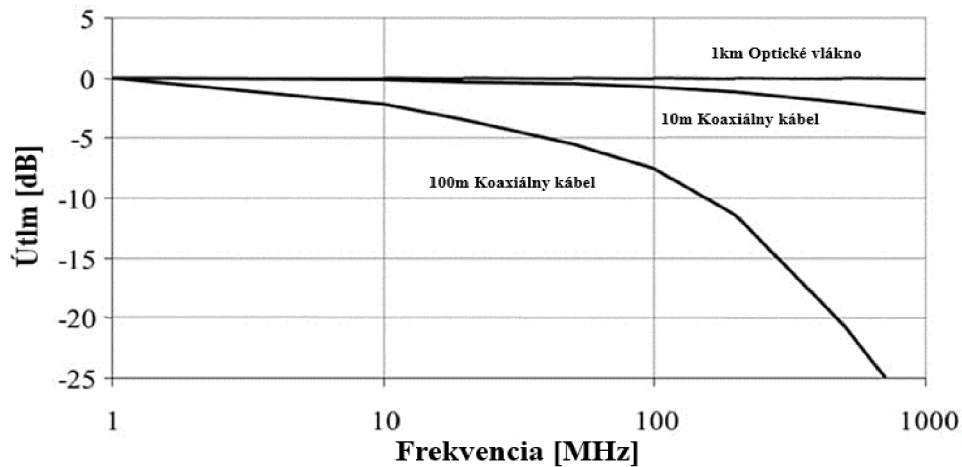
Vďaka použitiu optického vlákna pre prenos rádiového signálu dosahuje technológia RoF obrovskú šírku pásma, jednotky až desiatky THz. Vysoká optická šírka pásma umožňuje vysokorýchlostné spracovanie signálu, čo je v tradičných elektronických systémoch ťažko docieliteľné, alebo nemožné. Prostredníctvom jedného optického spojenia je možné preniesť veľké množstvo dátových formátov dáta, videá, telefónne služby atď. Čím je šírka pásma väčšia, tým je počet prenosových kanálov vyšší. To je využívané hlavne v telekomunikáciách.

3.2 Nízky útlm

Vo voľnom prostredí sa so zvyšujúcou frekvenciou vplyvom absorpcie a odrazov zvyšujú straty prenášaného signálu. V prenosovom vedení platí priama úmera, so zvyšujúcou sa frekvenciou dochádza k zvyšovaniu impedancie, čo má za následok veľmi vysoké straty. Takže na elektrickú distribúciu vysokofrekvenčných signálov na veľké vzdialenosti sú potrebné drahé regeneračné zariadenia. Optické vlákno v porovnaní s inými prenosovými médiami, najmä s bezdrôtovým médiom vykazuje omnoho nižšie hodnoty útlmu. Pri prenose signálu na veľké vzdialenosti je výkon signálu málo stratový, čo šetrí náklady na zosilňovačoch a opakovačoch. Porovnanie strát signálu pri prenose optickým vláknom a koaxiálnym káblom zachytáva graf viz. Obrázok 3.1. Pre prenos informácií pomocou optického vlákna sa využívajú vlnové dĺžky v rozsahu od 500 nm do 1600 nm.

Existujú tri hodnoty vlnových dĺžok, pri ktorých je hodnota útlmu minimálna a to konkrétne vlnové dĺžky: $\lambda = 850$ nm s útlmom 3 dB/km, $\lambda = 1310$ nm s útlmom 0,5 dB/km a najvýhodnejšou vlnovou dĺžkou z hľadiska útlmu je $\lambda = 1550$ nm s útlmom len 0,2 dB/km. Jedná sa o takzvané prenosové okná, ktoré sú dané technologickými možnosťami výroby.

Závislosť útlmu na frekvencii pre drôtové prenosové médiá



Obrázok 3.1 Porovnanie útlmov koaxiálneho káblu a optického vlákna na frekvenciách prevzaté z [21]

3.3 Vysoká odolnosť

Na rozdiel od metalických káblov, optické vlákno nevyžaruje žiadne elektromagnetické pole pri prenose signálu. Zabraňuje zachyteniu prenášaných informácií, a tým odstraňuje riziko možného odpočúvania. Okrem toho, je optické vlákno ako dielektrikum imunné proti elektromagnetickému rušeniu (EMI – Elektromagnetic Interference). Taktiež samo pri prenose signálu nevyžaruje elektromagnetické pole a teda nijako neovplyvňuje zariadenia nachádzajúce sa v jeho blízkom okolí.

Technológia RoF je odolná voči vysokofrekvenčnému rušeniu, pretože prenášaný signál má svetelnú podobu. Vďaka dobrým odolným vlastnostiam optického vlákna je zaistená vysoká ochrana súkromia a bezpečnosti v systéme RoF.

3.4 Bezpečnosť prevádzky

Optické vlákno je veľmi dobre odolné voči vlhkosti. Zaisťuje kvalitnú ochranu proti vonkajším vplyvom spôsobených počasím. Umožňuje umiestnenie na prenosové systavy vysokého napätia a kovových konštrukcií náchylných na úder blesku.

Jednou z výhod, optického vlákna je jeho nehorľavé prevedenie. V prípade poruchy, pretrhnutiu vlákna a pod. situácií nedochádza k stratám tepla, po roztavení izolácie nevzniká skrat a nespôsobuje vznik iskier, ktoré by mohli zapríčiniť katastrofálne následky. To umožňuje použitie technológie RoF aj v miestach nebezpečným výbuchom alebo požiarom.

3.5 Dynamické pridelovanie zdrojov

Pri implementácii hardvéru sa v CS uchovávajú zložité a drahé zariadenia. Jednoduchšie a lacnejšie zariadenia sa nachádzajú vo vzdialených anténnych jednotkách. Prispieva to k ľahkej inštalácii a údržbe. Menej zložité úlohy znižujú systémové náklady. Na úrovni riadenia je možná centralizovaná kontrola zdrojov. Dynamické pridelovanie kapacity odstraňuje požiadavku na pridelenie stálej kapacity, čo by bolo plytvaním zdrojov. Preto sú zdroje schopné dynamicky alokovať potrebnú šírku pásma v závislosti od požiadaviek a priorít.

3.6 V budúcnosti použiteľné

Optické vlákna sú navrhnuté tak, aby zvládli rýchlosť gigabitov, čo znamená, že budú schopné zvládnuť rýchlosti ponúkané budúcimi generáciami sietí pre nadchádzajúce roky. Technológia RoF je tiež transparentná pre protokol a bitovú rýchlosť, a preto je ju možné aplikovať na akékoľvek súčasné aj budúce technológie.

Jej použitie by mohlo hrať dôležitú úlohu v bezpečnostných a sofistikovaných vojenských aplikáciách, vo video monitorovacích systémoch vyžadujúcich mechanizmus rýchleho prenosu (vysokorýchlostné vlaky, lietadlá), v moderných pripravovaných projektoch inteligentného dopravného systému alebo IoT (Internet of Things), ktoré vyžadujú spoľahlivé, neustále a neprerušované komunikačné pokrytie a pod.

4. OBMEDZENIA ROF

Tak ako každá technológia má určité výhody, ale aj nevýhody. Technológia RoF nie je výnimkou. Pretože RoF je v zásade analógový prenos, môžu sa pri prenose signálu vyskytnúť určité obmedzenia spôsobené šumom a skreslením. Tieto obmedzenia vyplývajú z nelineárneho stavu zariadení použitých v spoji, jedná sa napríklad o laser. Dôležité parametre rádiového prenosu, ktoré sú ovplyvňované práve touto nelinearitou sú dynamický rozsah (DR) a šumové číslo (NF). DR predstavuje pomer medzi najväčšou a najmenšou hodnotou, ktorý môže určitá veličina predpokladať. Hodnotu DR je možné vypočítať pomocou vzťahu [20].

$$DR = \log S_{\max} - \log S_{\min} , \quad (4.1)$$

kde S_{\min} predstavuje najmenšiu predpokladanú hodnotu signálu a S_{\max} naopak najväčšiu predpokladanú hodnotu signálu.

Šumové číslo je rozdiel v decibeloch medzi výstupom šumu skutočného príjmu a výstupom šumu „ideálneho“ prijímača s rovnakým celkovým ziskom a šírkou pásma, keď sú prijímače pripojené k zhodným zdrojom pri štandardnej teplote šumu T_0 [7]:

$$NF = 10 \cdot (F) = 10 \cdot \left(\frac{SNR_i}{SNR_o} \right) = SNR_{i,dB} - SNR_{o,dB} , \quad (4.2)$$

kde F predstavuje faktor šumu, SNR_i a SNR_o sú pomery vstupného a výstupného signálu od šumu [7]:

$$F = \frac{SNR_i}{SNR_o} = \frac{\frac{S_i}{N_i}}{\frac{S_o}{N_o}} , \quad (4.3)$$

kde, S_i a S_o predstavujú výkony signálov (bez šumu) na vstupe a výstupe a N_i a N_o sú hodnoty výkonov šumu na vstupe a výstupe prenosového zariadenia [7]:

$$F = 1 + \frac{T_e}{T_0} , \quad (4.4)$$

kde T_0 je štandardná teplota šumu $T_0 = 290 \text{ K}$ a T_e je teplota šumu prenosového zariadenia.

Z toho dôvodu, musí byť metóda na potlačenie šumu a skreslenia dostatočná a správne použitá, aby sa dosiahli lepšie hodnoty NF a DR. Hoci samotný prenosový systém je analógový, distribuovaný rádiový systém nemusí byť nutne tiež analógový, ale môže mať aj digitálnu formu (napr. WLAN a UMTS), ktorý využíva komplexné viacúrovňové formáty signálovej modulácie, ako je kvadrátúrna amplitúdová modulácia (QAM) alebo ortogonálne multiplexovanie s frekvenčným delením (OFDM).

Benefity RoF však niekoľkonásobne prevyšujú jeho nedostatky. Táto technológia je veľmi efektívna a v telekomunikačných technológiách často využívaná.

5. MERANIE PARAMETROV

5.1 Meranie parametrov RIN

Hodnota relatívneho intenzitného šumu (RIN) je hodnota, ktorá poukazuje na nestabilitu úrovne optickej intenzity lasera. Výkyvy optickej intenzity sú zapríčinené nežiadúcimi javmi ako: vibrácie v laserovej dutine, kolísanie laserového zisku, prenos šumu zo zdroja a podobne. Okrem samotného lasera je parameter RIN ovplyvňovaný šumami spôsobenými ďalšími pripojenými prístrojmi do prenosového reťazca. V laboratórnom meraní sa jedná o tri prvky, ktoré zapríčiňujú zvyšovanie šumových zložiek do výsledkov merania a to fotodetektor, predzosilňovač a spektrálny analyzátor. Typy šumov ovplyvňujúce výsledky merania sú:

$$N_q = 2 \cdot q \cdot I_{DC} \cdot R_L, \quad (5.1)$$

kde N_q predstavuje hodnotu výstrelového šumu, q je konštantná hodnota náboja elektrónu $q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, I_{DC} je jednosmerný prúd a R_L je pridaná záťaž o hodnote $50 \text{ } \Omega$.

$$N_{th} = k_B \cdot T_i \cdot (F_A \cdot G_A + F_{SA} - 1) / G_A, \quad (5.2)$$

kde N_{th} predstavuje hodnotu tepelného šumu, k_B je Boltzmanova konštanta o hodnote $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$, T_i je izbová teplota v Kelvinoch, G_A je hodnota zosilnenia predzosilňovača $G_A = 30 \text{ dB}$, F_A je šum spôsobený vplyvom predzosilňovača $F_A = 2 \text{ dB}$ a F_{SA} je šum zapríčinený samotným spektrálnym analyzátorom $F_{SA} = 3 \text{ dB}$.

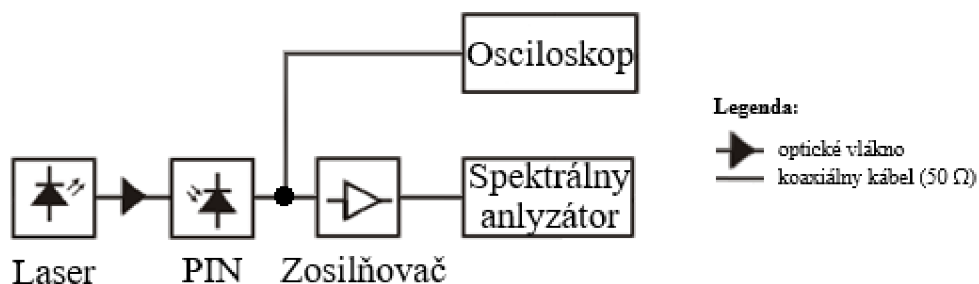
$$N_{dk} = 2 \cdot q \cdot I_{DC}, \quad (5.3)$$

kde N_{dk} predstavuje hodnotu "dark current" šumu, q je konštantná hodnota náboja elektrónu $q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ a I_{DC} je jednosmerný prúd.

Z toho vyplýva, že pre stanovenie parametru RIN je potrebné z výsledných hodnôt merania odpočítať vyššie uvedené šумы, čím je možné dosiahnuť hodnoty samotného šumu použitého lasera.

5.1.1 Priebeh merania

Pracovisko pre stanovenie parametru RIN je znázornené na Obrázku 5.1. Tento obrázok znázorňuje štruktúru meracieho reťazca s použitými prístrojmi a komponentami.



Obrázok 5.1 Bloková schéma pre meranie RIN

Meranie prebiehalo v dvoch krokoch. V prvom kroku bolo potrebné stanoviť výkon jednosmernej zložky optického signálu P_e pomocou osciloskopu so záťažou $R_L = 50 \Omega$. Výpočet I_{DC} bol prevedený jednoduchým aplikovaním Ohmovho zákona $I_{DC} = \frac{U_{DC}}{R_L}$. Po znalosti U_{DC} a I_{DC} bolo možné stanoviť elektrický výkon $P_e = U_{DC} \cdot I_{DC}$ viz. Tabuľka 5.1. V tabuľke sa ďalej nachádzajú zlogaritmované hodnoty elektrického výkonu P_e , hodnota zisku predzosilňovača $G = 30$ dB a výsledná hodnota optického výkonu $P_{e_vysledné}$ po pričítaní hodnoty zisku.

Tabuľka 5.1 Tabuľka zmeraných a vypočítaných hodnôt DC zložky optického výkonu pri zmenách budiaceho prúdu lasera I_B

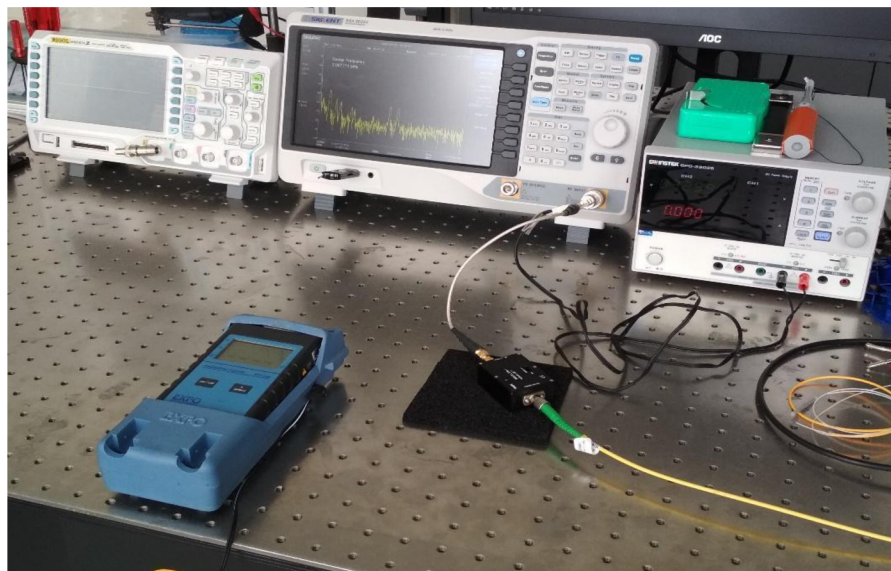
| Poč. mer. | I_B [A] | R_L [Ω] | U_{DC} [V] | I_{DC} [A] | P_e [W] | P_e [dBm] | G [dB] | $P_{e_vysledné}$ [dBm] |
|-----------|-----------|--------------------|--------------|----------------------|----------------------|-------------|----------|-------------------------|
| 1 | 0,06 | 50 | 0,02 | $0,40 \cdot 10^{-3}$ | $8,00 \cdot 10^{-6}$ | -20,97 | 30 | 9,03 |
| 2 | 0,07 | 50 | 0,06 | $1,20 \cdot 10^{-3}$ | $76,8 \cdot 10^{-6}$ | -11,14 | 30 | 18,86 |
| 3 | 0,08 | 50 | 0,10 | $2,00 \cdot 10^{-3}$ | $0,20 \cdot 10^{-3}$ | -6,99 | 30 | 23,01 |
| 4 | 0,09 | 50 | 0,14 | $2,70 \cdot 10^{-3}$ | $0,36 \cdot 10^{-3}$ | -4,38 | 30 | 25,62 |
| 5 | 0,10 | 50 | 0,18 | $3,60 \cdot 10^{-3}$ | $0,65 \cdot 10^{-3}$ | -1,88 | 30 | 28,12 |

V druhom kroku bolo pre stanovenie optického výkonu P_o potrebné použiť tester optických vlákien. Na vstup testera bol pridaný útlmový článok, kvôli zníženiu výkonu lasera a kvôli zaisteniu, aby sa tester nedostal do oblasti saturácie. Hodnotu optického výkonu bolo možné stanoviť aj pomocou výpočtu $P_o = I_{DC}/0,95$. Kde konštanta 0,95 A/W predstavuje parameter špičkovej odozvy (Peak Response), ktorý bol odčítaný z datasheetu fotodetektora. Tabuľka 5.2 porovnáva výsledky hodnôt zmeraného a vypočítaného optického výkonu.

Tabuľka 5.2 Tabuľka zmeraných a vypočítaných hodnôt P_o pri zmenách I_B

| Poč. mer. | I_B [A] | L [dB] | P_{o_mer} [dBm] | P_{o_mer+L} [dBm] | P_{o_vyp} [W] | P_{o_vyp} [dBm] |
|-----------|-----------|----------|--------------------|----------------------|----------------------|--------------------|
| 1 | 0,06 | 20 | -20,85 | -0,85 | $0,42 \cdot 10^{-3}$ | -3,76 |
| 2 | 0,07 | 20 | -15,30 | 4,70 | $1,31 \cdot 10^{-3}$ | 1,16 |
| 3 | 0,08 | 20 | -13,15 | 6,85 | $2,11 \cdot 10^{-3}$ | 3,23 |
| 4 | 0,09 | 20 | -11,80 | 8,20 | $2,84 \cdot 10^{-3}$ | 4,54 |
| 5 | 0,10 | 20 | -10,80 | 9,20 | $3,79 \cdot 10^{-3}$ | 5,79 |

Pri oboch krokoch merania vykonávaných na pracovisku viz. Obrázok 5.2 boli prevádzané zmeny budiaceho prúdu lasera I_B v rozmedzí od 60 mA do 100 mA. Merania prebiehali pre pevne stanovenú šírku pásma o hodnote $B = 4$ MHz. Pomocou spektrálneho analyzátora boli pre jednotlivé hodnoty I_B zobrazené kmitočtové priebehy. Taktiež bolo prevedené jedno meranie pri vypnutom lasery tzn. $I_B = 0$ mA.



Obrázok 5.2 Laboratórne pracovisko pre stanovenie parametru RIN

5.1.2 Výsledky merania

Pomocou uložených údajov zo spektrálneho analyzátora bolo následne možné stanoviť parameter RIN. Pre lepšiu názornosť určenia tohto parametru boli prevedené dve výpočtové metódy. Parameter RIN sa vzťahuje na určitú šírku pásma. Z tohto dôvodu bolo pri obidvoch metódach potrebné podeliť všetky hodnoty nameraných údajov na jednotlivých frekvenciách celkovou šírkou meraného pásma $B = 4$ MHz.

Prvá metóda neberie do úvahy šumu iných komponentov nachádzajúcich sa v sústave pre meranie parametru RIN. Jednoducho pripisuje všetok nameraný šum lasera. Využíva odčítanie frekvenčného spektra nameraného pri konkrétnej hodnote budiaceho prúdu

lasera I_B od priebehu pri vypnutom laseri $I_B = 0$ mA. Vzorec pre výpočet parametru RIN [dB/Hz] je definovaný vzťahom:

$$RIN = 10 \cdot \log \left(\frac{(S+N)-N}{(I_{DC})^2 \cdot R_L} \right), \quad (5.4)$$

kde $S+N$ je hodnota signálu so šumom na danej frekvencii, N je hodnota šumu na danej frekvencii pri $I_B = 0$ mA, B je šírka pásma, I_{DC} je hodnota jednosmerného fotoprúdu a R_L je pridaná záťaž o hodnote 50Ω

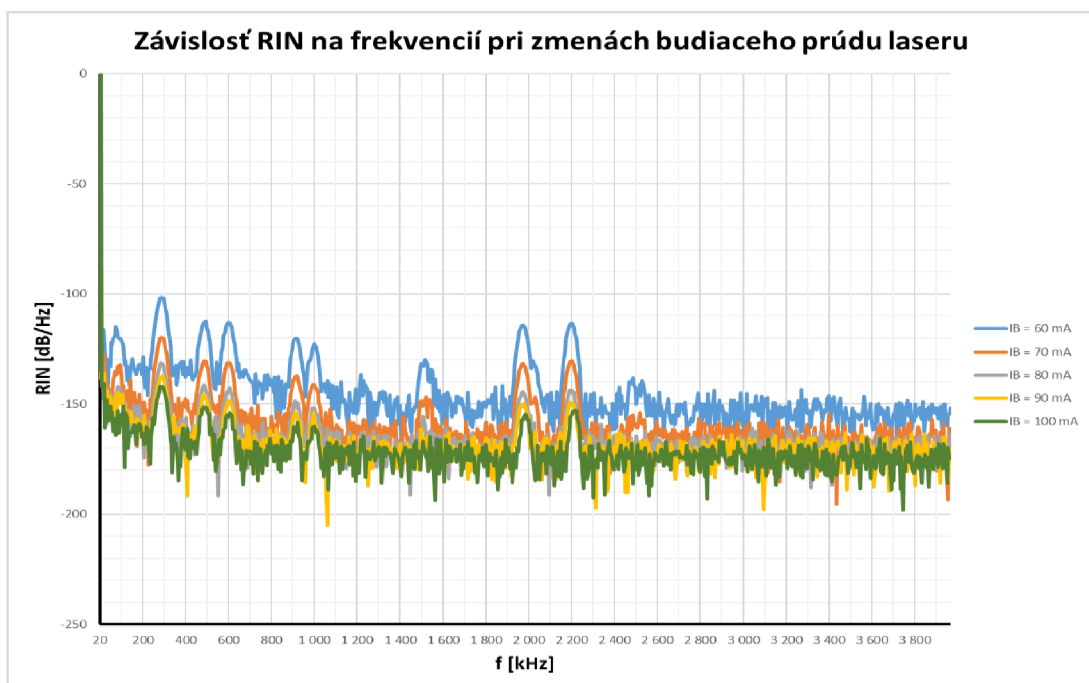
Graf zobrazujúci závislosť parametru RIN na frekvencii, ktorý bol vypočítaný pomocou prvej metódy je zachytený na Obrázku 5.3.

Druhá metóda zahŕňa odčítanie šumov spôsobených optickým detektorom, predzosilňovačom a samotným analyzátorom. Jedná sa o šumy spomínané vyššie N_q , N_{th} a N_{dk} . Výpočet RIN [dB/Hz] pre tento spôsob je nasledovný:

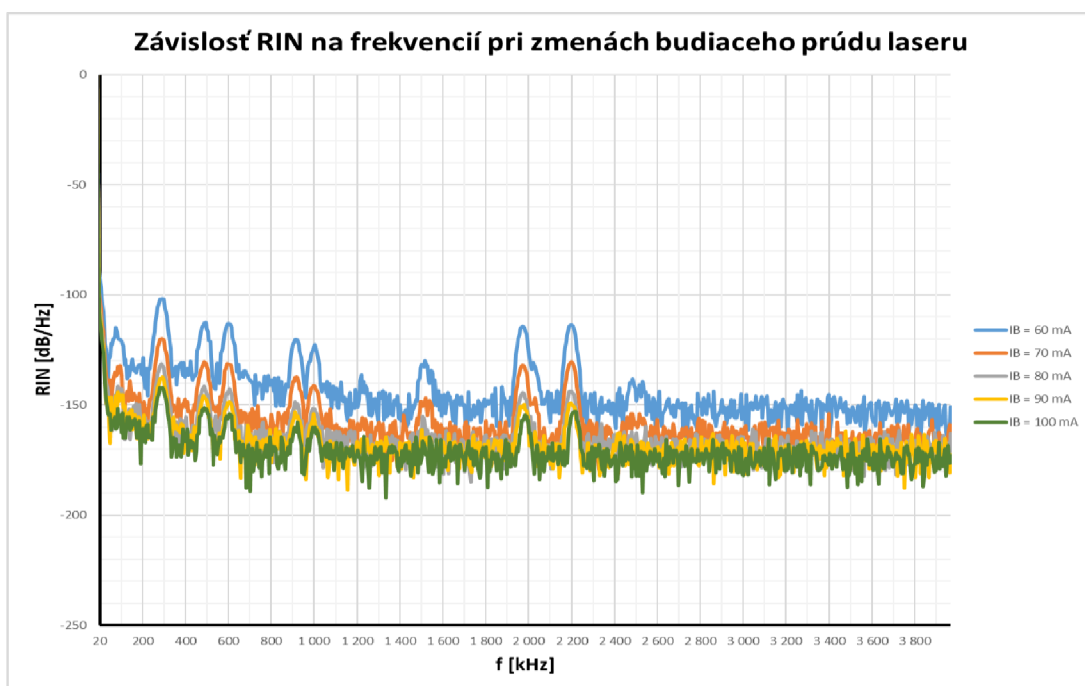
$$RIN = 10 \cdot \log \left(\frac{S+N}{(I_{DC})^2 \cdot R_L} \right) - N_q - N_{th} - N_{dk}, \quad (5.5)$$

kde $S+N$ je hodnota signálu so šumom na danej frekvencii, B je šírka pásma, I_{DC} je hodnota jednosmerného prúdu, R_L je pridaná záťaž o hodnote 50Ω , N_q je hodnota výstrelového šumu, N_{th} je hodnota tepelného šumu a N_{dk} je hodnota "dark current" šumu.

Výsledný priebeh závislosti parametru RIN na frekvencii, ktorý bol vypočítaný pomocou druhej metódy je zobrazený v grafe viz. Obrázok 5.4.



Obrázok 5.3 Graf závislosti RIN na frekvencii pri zmenách I_B pomocou prvej metódy



Obrázok 5.4 Graf závislosti RIN na frekvencií pri zmenách I_B pomocou druhej metódy

Z grafov je viditeľná závislosť parametru RIN od meniaceho sa budiaceho prúdu lasera. Platí pre nich nepriama úmera. Čím je hodnota budiaceho prúdu lasera nižšia, tým je naopak vyššia hodnota parametru RIN. Túto závislosť je možné odčítať z grafov. Laser vysiela žiarenie s kontinuálnym výkonom, ktorí je ovplyvnený šumom. Tento šum popisuje parameter RIN. V grafoch sa prejavuje ako impulzné výchylky od kontinuálneho priebehu. Čím sú tieto impulzy vyššie, tým je vplyv šumov výraznejší a tým je hodnota parametru RIN vyššia.

Na prvý pohľad výsledné grafy oboch metód vyzerajú totožne. Ich tvar priebehu je rovnaký, ale po detailnejšom preskúmaní grafov je vidieť, že pomocou druhej metódy je možné dosiahnuť lepšie výsledky v niektorých častiach spektrálneho priebehu a to až o 30 dB oproti prvej metóde. Pomocou druhej metódy, je tak možné získať presnejšie výsledky zahŕňajúce samotný šum lasera, čo je podstatou pri určovaní parametru RIN pre konkrétny použitý laser.

Porovnaní odčítanej hodnoty parametru RIN z datasheetu pre použitý laser $RIN = -150 \text{ dB/Hz}$ s výslednými priebehmi zobrazených v grafoch pri oboch metódach je možné vidieť, že výsledné priebehy v grafoch viz. Obrázok 5.3 a Obrázok 5.4 sa pohybujú v oblasti tejto hodnoty.

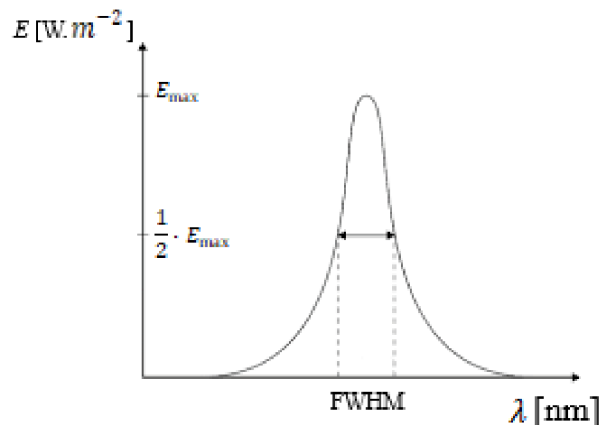
5.1.3 Použité prístroje

Na zostavenie laboratórneho reťazca pre stanovenie parametru RIN boli potrebné tieto zariadenia:

- Laser: Thorlabs SFL1550P, $\lambda = 1550 \text{ nm}$, $P_o = 25\text{-}40 \text{ mW}$
- DC napäťový zdroj: GW Instek GPD-3303S, 3 kanály, $U = 0\text{-}30 \text{ V}$, $I = 1\text{-}3 \text{ A}$
- Optické vlákno: SM, GI, $l = 15 \text{ m}$
- Fotodetektor: Thorlabs DC400FC, InGaAs Pin, $\lambda = 800\text{-}1700 \text{ nm}$, $B = \text{DC-}1 \text{ GHz}$
- Predzosilňovač: LNA, $G = 30 \text{ dB}$, $B = 0,1 \text{ MHz-}2 \text{ GHz}$, $U = 9\text{-}12 \text{ V}$
- Spektrálny analyzátor: Siglent SSA 3032X, $B = 9 \text{ kHz-}3,2 \text{ GHz}$
- Osciloskop: Rigol MSO 174, 4 kanály, $B = \text{DC-}100 \text{ MHz}$, 1 GSa/s
- Tester optických vlákien: EXFO FOT-10A, $\lambda = 780\text{-}1550 \text{ nm}$

5.2 Meranie šírky spektrálnej čiary lasera

Hodnota šírky spektrálnej čiary je stanoviteľná pomocou grafického znázornenia závislosti optickej intenzity E [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] na vlnovej dĺžke λ [nm] viz. Obrázok 5.5. Jej hodnotu je možné z grafu určiť ako vzdialenosť okrajov laserového zväzku z polovice priebehu optickej intenzity teda $\frac{1}{2} \cdot E_{\max}$, čo predstavuje pokles úrovne signálu o 3 dB. Šírka spektrálnej čiary je vlastne hodnota FWHM (FWHM – Full Width at Half Maximum), ktorá predstavuje hodnotu celej šírky pásma pri polovičnom maxime optickej intenzity lasera.



Obrázok 5.5 Závislosť optickej intenzity na vlnovej dĺžke pre stanovenie šírky spektrálnej čiary prevzaté z [22]

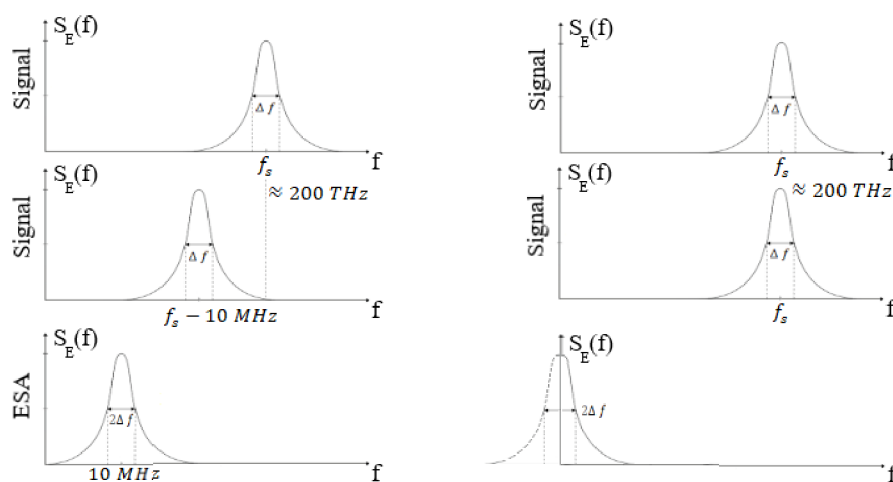
Niektoré optické spektrálne analyzátory (OSA – Optical Spectrum Analyzer) neumožňujú požadované rozlíšenie pre meranie šírky spektrálnej čiary lasera. Z toho dôvodu je možné (okrem odčítania hodnoty FWHM z grafu) stanoviť hodnotu FWHM použitím alternatívnych charakterizačných metód. Alternatívne metódy zahŕňajú štyri možnosti merania a to: optickú heterodynňovú metódu, optickú heterodynňovú metódu s oneskorením, optickú homodynňovú metódu s oneskorením a optickú diskriminačnú techniku [22]. Tieto metódy sú schopné veľmi vysokého rozlíšenia, ktoré je vyžadujúce pre meranie šírky spektrálnej čiary lasera.

Meranie bolo uskutočnené pomocou optickej heterodynňovej metódy s oneskorením viz. Obrázok 5.7. Výhodou tejto metódy oproti heterodynňovej metóde (bez oneskorenia) je to, že pre meranie FWHM nie je potrebné použitie lokálneho oscilátora. Namiesto lokálneho oscilátora využíva práve oneskorenie dosiahnuté pomocou optického vlákna. Čím je optické vlákno dlhšie, tým je oneskorenie väčšie. Optický signál šíriaci sa po hornej vetve je teda oproti signálu šíriacemu sa v dolnej vetve časovo oneskorený. Ak oneskorenie v jednej vetve prekročí koherenčný čas zdroja, potom kombinujúce signály spolu interferujú akoby pochádzali z dvoch nezávislých laserov [22].

Jednotlivé zmeny priebehu signálu putujúceho sústavou sú graficky znázornené na Obrázku 5.6. V hornej časti priebehu je zachytená spektrálna čiara lasera, ktorý

vyžaruje optický signál o hodnote $\lambda = 1550$ nm, čo v prepočte približne zodpovedá frekvencií $f_s = 200$ THz. V časti pod ním je zobrazený posun frekvencie nosného signálu po interferencií so signálom oneskoreným pomocou optického vlákna. Vplyvom oneskorenia teda dochádza k posunu referenčnej hodnoty o určitú frekvenčnú hodnotu zodpovedajúcu vzniknutému oneskoreniu. V tomto prípade hodnota oneskorenia zodpovedá frekvencií o hodnote $f = 10$ MHz. Posledná časť obrázku poukazuje na vplyv fotodetekcie. Fotodetektor po vykonaní detekcie, spôsobí posun celého priebehu do základného pásma (k počiatku súradnicovej sústavy) a dvojnásobné rozšírenie spektrálnej čiary. Takýto priebeh je teda finálny priebeh, ktorý je možné zobraziť pomocou elektrického spektrálneho analyzátora (ESA – Electric Spectrum Analyzer).

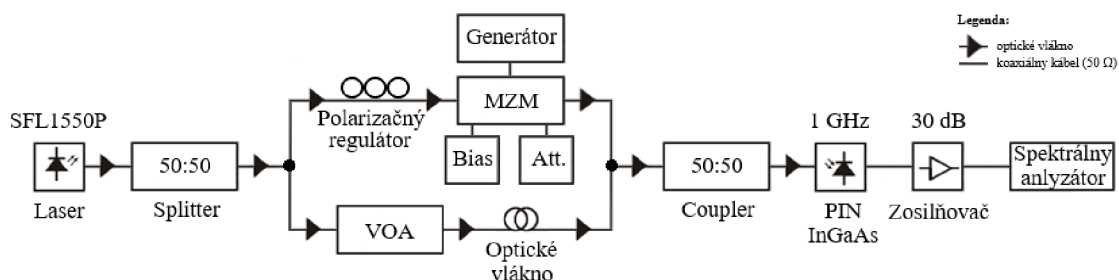
Odlišnosť optickej homodynnej metódy s oneskorením oproti optickej heterodynnej metódy s oneskorením spočíva primárne vo výsledku fotodetekcie ako je znázornené na Obrázku 5.6. Fotodetektor spôsobí posun referenčnej hodnoty spektrálnej čiary priamo do počiatku súradnicovej sústavy, ktorú je možné zobraziť pomocou ESA. Na spektrálnom analyzátore je teda viditeľná len polovica celého priebehu, čo môže spôsobovať určité nepresnosti v stanovení hodnoty FWHM.



Obrázok 5.6 Princíp heterodynnej (vľavo) a homodynnej (vpravo) metódy s oneskorením prevzaté a upravené z [22]

5.2.1 Priebeh merania

Pracovisko pre stanovenie šírky spektrálnej čiary je znázornené na Obrázku 5.7.



Obrázok 5.7 Bloková schéma pre stanovenie šírky spektrálnej čiary lasera

Meranie spočívalo v použití lasera o vlnovej dĺžke $\lambda = 1550$ nm. Optický signál z lasera bol pomocou splittera rozdelený v pomere 50:50 do dvoch vetví. Teda z pôvodne jedného optického signálu vznikli dva, pričom ich výkon je polovičný oproti pôvodnému optickému signálu.

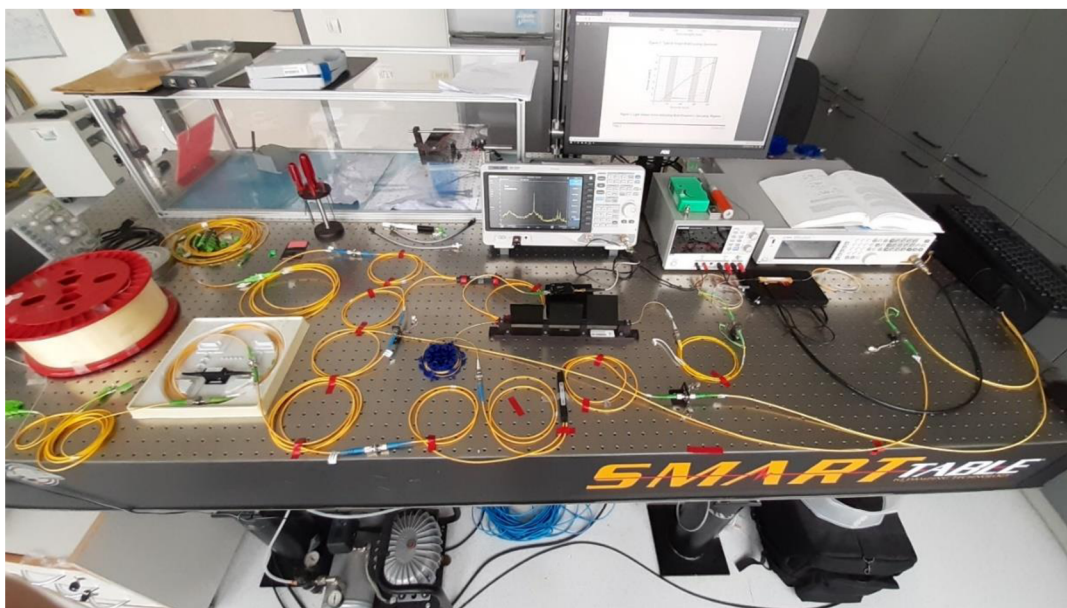
Signál putujúci v hornej vetve vstupoval do polarizačného regulátora. Pomocou neho bolo možné nastaviť potrebnú polarizáciu, kvôli Mach-Zhenderovmu modulátoru, ktorého funkčnosť závisí na zmene polarizácie. Do MZM modulátora vstupoval optický signál z polarizačného regulátora, vysokofrekvenčný signál s frekvenciou $f = 10$ MHz a signály z jednosmerného napäťového zdroja. Prvý privedený signál slúžil pre nastavenie MZM do potrebného pracovného bodu. Napätie biasu pracovného bodu dosahovalo hodnotu $U_{\text{Bias}} = 5,8$ V. Druhý privedený signál slúžil pre nastavenie attenuátora, ktorý pridával vložený útlm do trasy v prípade potrebného doladenia výsledného signálu zobrazeného na spektrálnom analyzátore.

Signál putujúci v spodnej vetve vstupoval do variabilného optického attenuátora (VOA – Variable Optical Attenuator), ktorý mal rovnakú funkciu ako attenuátor na Mach-Zhenderovom modulátore. Ďalej bol signál prenášaný cez optické vlákno, ktorého dĺžka bola $l = 25$ km. Prechod signálu cez optické vlákno vytváralo určité oneskorenie v tejto vetve oproti hornej vetve. Vzniknuté oneskorenie signálu v spodnej vetve bolo potrebné pre následné sčítanie oboch signálov v uzle.

Sčítanie signálov z oboch vetiev do jedného pôvodného optického signálu zaisťoval coupler. Po sčítaní bol signál konvertovaný z optickej do elektrickej podoby pomocou fotodetektoru. Ďalej bol signál zosilnený pomocou predzosilňovača s hodnotou zisku $G = 30$ dB. Po zosilnení bol výsledný signál zobrazený pomocou spektrálneho analyzátora, z ktorého boli získané namerané údaje potrebné na spracovanie grafov pre určenie šírky spektrálnej čiary.

Meranie prebiehalo na pracovisku viz. Obrázok 5.8 pri zmenách budiaceho prúdu lasera od 60 mA do 100 mA s krokom 10 mA. Na základe týchto meraní bolo následne možné namerané údaje spracovať do grafov a stanoviť šírky spektrálnych čiar pri jednotlivých hodnotách budiacich prúdov lasera. Taktiež bolo preverené single módové pracovné pásmo použitého lasera z hodnotami uvádzaných v datasheete. Tento typ lasera

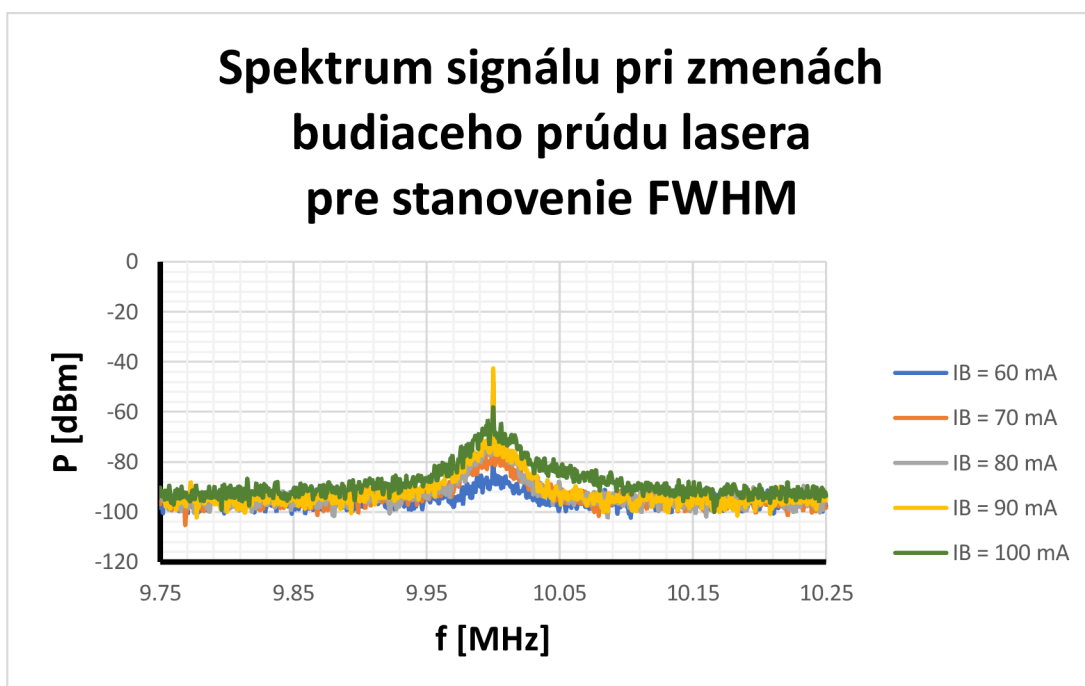
má určitý charakter správania v niektorých prúdových rozsahoch. Teda pre niektoré hodnoty prúdov vykazuje charakter multi-módového lasera a pre iné zase single-módového lasera.



Obrázok 5.8 Laboratórne pracovisko pre stanovenie šírky spektrálnej čiary lasera

5.2.2 Výsledky merania

Spektrálne čiary lasera pri jednotlivých budiacich prúdoch sú znázornené v grafe viz. Obrázok 5.9. Na priebehy spektrálnych čiar je možné aplikovať tzv. Lorentzianovú aproximáciu. Tento typ aproximácie sa využíva na aproximáciu kriviek s Gaussovým priebehom, kvôli názornosti odlišnosti reálnych nameraných priebehov od ideálneho priebehu.



Obrázok 5.9 Graf závislosti výkonu z optického prijímača $P_{RF_výstup}$ na frekvencií pri zmenách budiaceho prúdu I_B pre stanovenie FWHM

Hodnoty FWHM pri jednotlivých budiacich prúdoch lasera sú uvedené v tabuľke viz. Tabuľka 5.3. Z tabuľky je možné vyčítať hodnoty FWHM pohybujúce sa v rozsahu od 40 kHz do 55 kHz pri jednotlivých budiacich prúdoch lasera I_B .

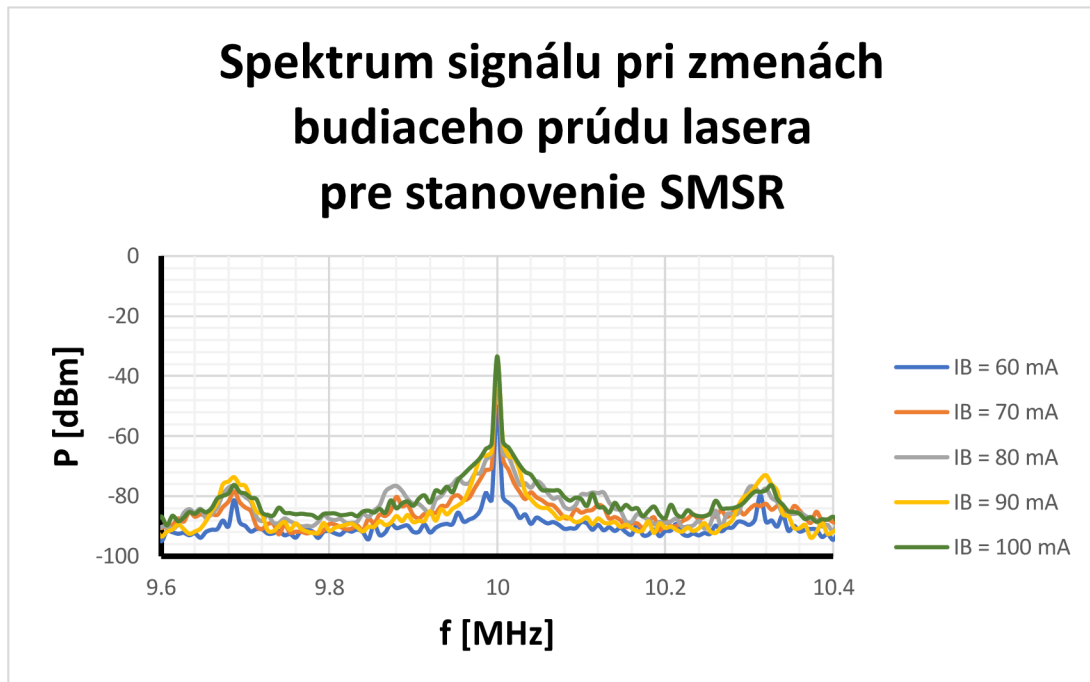
Tabuľka 5.3 Tabuľka odčítaných hodnôt FWHM z grafu viz. Obrázok 5.9

| Poč. mer. | I_B [A] | FWHM [kHz] |
|-----------|-----------|------------|
| 1 | 0,06 | 55 |
| 2 | 0,07 | 53 |
| 3 | 0,08 | 40 |
| 4 | 0,09 | 55 |
| 5 | 0,10 | 49 |

Pre overenie charakteru lasera, ktorý v určitých častiach spektra vykazuje multi-módové a v iných častiach zase single-módové vlastnosti, bolo prevedené meranie s väčším rozpätím zobrazenia signálu, pre lepšiu názornosť prítomnosti prípadne neprítomnosti postranných pásiem. Pri tejto hodnote zobrazenia bolo vykonaných päť meraní pre budiace prúdy lasera I_B o rovnakých hodnotách ako v predošlom meraní.

Z nameraných hodnôt bolo možné zobraziť graf viz. Obrázok 5.10, pomocou ktorého bolo následné možné odčítať veľkosti bočných postranných pásiem a hodnoty SMSR (SMSR – Side Mode Suppression Ratio). SMSR je hodnota udávaná v [dB], ktorá

vyjadruje rozsah od maximálnej hodnoty optického výkonu po najbližšiu vyššiu postrannú zložku.

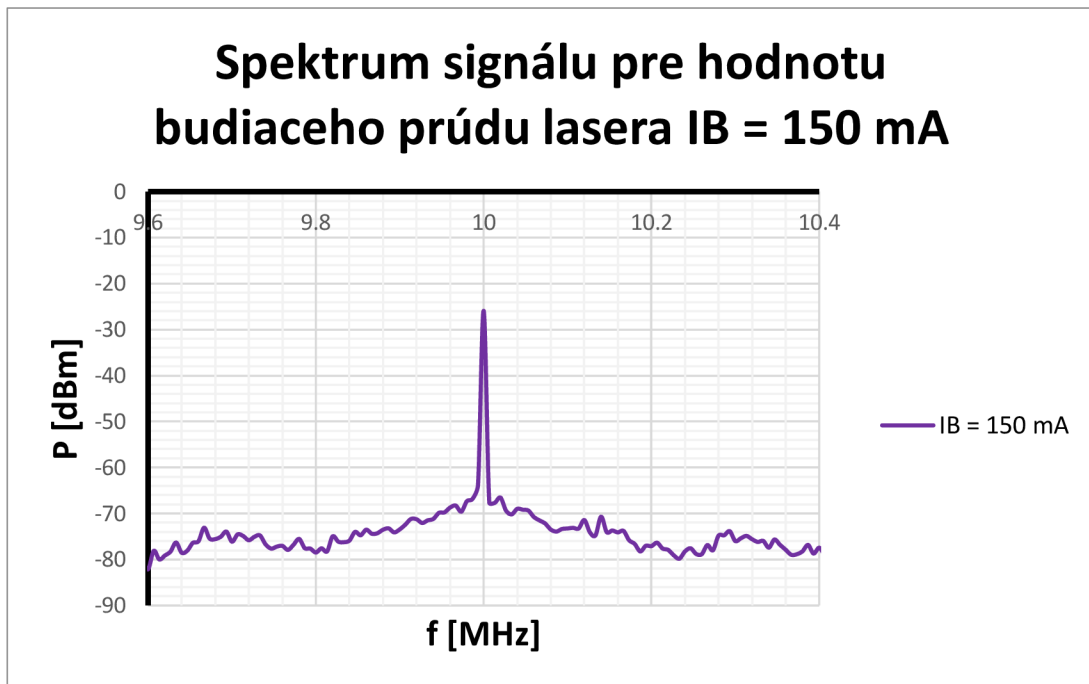


Obrázok 5.10 Graf závislosti výkonu z optického prijímača $P_{RF_výstup}$ na frekvencií pri zmenách budiaceho prúdu I_B pre stanovenie SMSR

Tabuľka 5.4 Tabuľka odčítaných hodnôt úrovni ľavých (L_{pp}) a pravých (R_{pp}) postranných pásiem a hodnoty SMSR z grafu viz. Obrázok 5.10

| Poč. mer. | I_B [A] | L_{pp} [dB] | R_{pp} [dB] | SMSR [dB] |
|-----------|-----------|---------------|---------------|-----------|
| 1 | 0,06 | 12 | 14 | 28 |
| 2 | 0,07 | 16 | 10 | 31 |
| 3 | 0,08 | 18 | 18 | 30 |
| 4 | 0,09 | 20 | 21 | 32 |
| 5 | 0,10 | 18 | 18 | 29 |

Posledné meranie spočívalo v overení platnosti údajov z datasheetu, kde pre tento typ lasera bol garantovaný single-módový charakter v rozsahu hodnôt budiacich prúdov lasera od 125 mA do 250 mA. Meranie prebiehalo pri hodnotu $I_B = 150$ mA. Výsledok tohto merania je viditeľný z grafu viz. Obrázok 5.11.



Obrázok 5.11 Graf závislosti z optického prijímača $P_{\text{RF}_\text{výstup}}$ na frekvencií pri hodnote budiaceho prúdu $I_B = 150 \text{ mA}$ pre ukážku single-módového charakteru použitého laser

5.2.3 Použité prístroje

Na zostavenie laboratórneho reťazca pre stanovenie šírky spektrálnej čiary lasera boli potrebné tieto zariadenia:

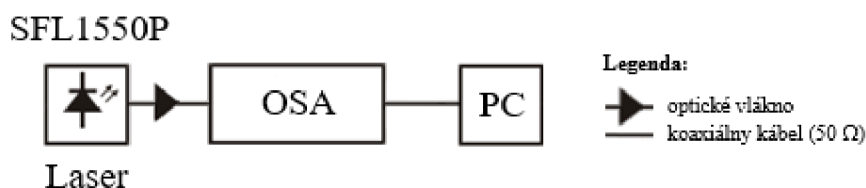
- Laser: Thorlabs SFL1550P, $\lambda = 1550 \text{ nm}$, $P_o = 25\text{-}40 \text{ mW}$
- DC napäťový zdroj: GW Instek GPD-3303S, 3 kanály, $U = 0\text{-}30 \text{ V}$, $I = 1\text{-}3 \text{ A}$
- Generátor: Agilent N5181A MXG, $f = 100 \text{ kHz}\text{-}3 \text{ GHz}$
- Splitter/Coupler: Newport F-CPL-F12155, Single-mod, Coupling Ratio 50%/50%
- Polarizačný regulátor: Thorlabs, 3 pedály
- Variabilný optický attenuator (VOA)
- Optické vlákno: SM, GI, $l = 25 \text{ km}$
- Mach-Zehnderov modulátor: JDS Uniphase, Single drive-MZM, 10 Gb/s
- Fotodetektor: Thorlabs DC400FC, InGaAs Pin, $\lambda = 800\text{-}1700 \text{ nm}$, $B = \text{DC}\text{-}1 \text{ GHz}$
- Predzosilňovač: LNA, $G = 30 \text{ dB}$, $B = 0,1 \text{ MHz}\text{-}2 \text{ GHz}$, $U = 9\text{-}12 \text{ V}$
- Spektrálny analyzátor: Siglent SSA 3032X, $B = 9 \text{ kHz}\text{-}3,2 \text{ GHz}$

5.3 Meranie optického spektra

Optické spektrum alebo emisné spektrum nejakého optického zdroja (lasera) obsahuje informáciu o tom, ako je optická energia distribuovaná na rôzne vlnové dĺžky [23]. Jedná sa teda o širokú škálu vlnových dĺžok prípadne frekvencií, ktoré sú zvyčajne zobrazované vo forme diagramov. Grafické znázornenie optického spektra často predstavuje len určitý výsek spektra. Podľa požadovaných kritérií je rozumne volené rozpätie vlnových dĺžok okolo strednej hodnoty. Stredná hodnota predstavuje také miesto v optickom spektre, ktoré zodpovedá vlnovej dĺžke, s najväčším množstvom energie. Toto miesto je označované ako "peak". Pre tento peak je charakteristické to, že má normálne respektíve Gaussovské rozloženie.

5.3.1 Priebeh merania

Laboratórne pracovisko pre meranie optického spektra je znázornené na Obrázku 5.12. Samotný reťazec obsahuje štyri komponenty: laser, optické vlákno, optický spektrálny analyzátor (OSA – Optical Spectrum Analyzer) a počítač. Kľúčový prístroj na meranie optického spektra je práve OSA, ktorý bol pripojený na počítač kvôli grafickému znázorneniu nameraných údajov.



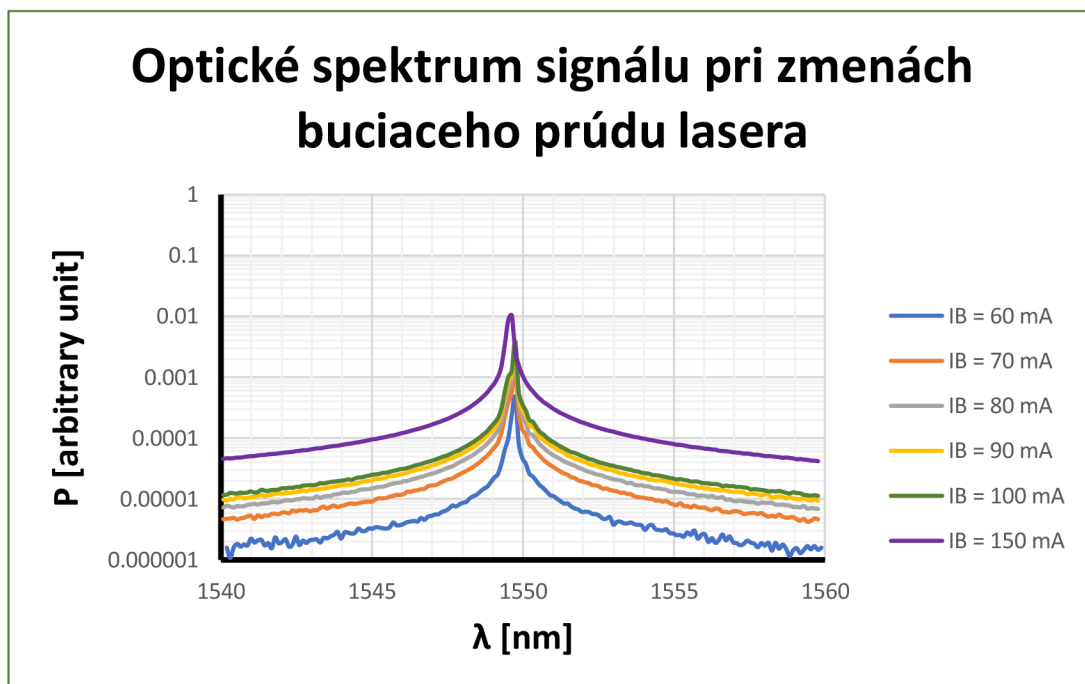
Obrázok 5.12 Bloková schéma pre meranie optického spektra laserového signálu

Meranie spočívalo v nastavovaní hodnôt budiaceho prúdu lasera I_B v rozsahu hodnôt od 60 mA po 100 mA s krokom 10 mA, rovnako ako aj v predošlých meraniach. Okrem týchto hodnôt bolo premerané single-módové pracovné pásmo použitého lasera pri hodnote 150 mA. Pozorovaný rozsah spektra predstavoval rozpätie hodnôt vlnových dĺžok λ od 1540 nm do 1560 nm.

5.3.2 Výsledky merania

Výsledné priebehy optických spektier pre jednotlivé hodnoty budiacich prúdov sú zobrazené v grafe viz. Obrázok 5.13. Zmeny budiaceho prúdu lasera, vyvolávajú nepatrné zmeny (posuny) vlnovej dĺžky laserového žiarenia. Pre rozsah budiacich prúdov od 60 mA po 100 mA sú však tieto zmeny z grafu neodčítateľné. Stredné hodnoty zodpovedajú vlnovej dĺžke $\lambda = 1549,8$ nm a javia sa ako konštantné. Okrem toho pri zvyšovaní hodnoty budiaceho prúdu je viditeľná zmena tvaru "peaku". Okrem deformácie tvaru dochádza aj k postupnému vyhladzovaniu priebehu po oboch stranách spektra od strednej hodnoty.

V prípade merania optického spektra pri budiacom prúde $I_B = 150$ mA, ktorý sa nachádza ako už bolo spomínané vyššie v single-módovej pracovnej oblasti lasera, je z grafu viditeľný výrazný posun priebehu oproti iným hodnotám budiaceho prúdu. Pri budiacom prúde $I_B = 150$ mA zodpovedá stredná hodnota $\lambda = 1549,6$ nm. Rozdiel vlnových dĺžok teda predstavuje hodnotu $\Delta\lambda = 0,2$ nm. V prípade prepočtu na kmitočet sa jedná o hodnotu zmeny frekvencie Δf až 25 GHz. Táto oblasť vykazuje takmer dokonale hladký priebeh optického spektra. Taktiež dochádza k takmer minimálnej deformácii tvaru “peaku“, ktorý má Gaussovský charakter.



Obrázok 5.13 Graf závislosti výkonu z optického prijímača P_o na vlnovej dĺžke λ pri zmenách budiaceho prúdu I_B

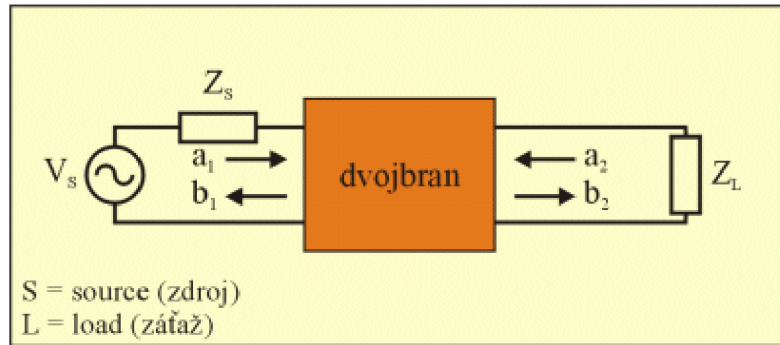
5.3.1 Použité prístroje

Na zostavenie laboratórneho reťazca pre meranie optického spektra lasera boli potrebné tieto zariadenia:

- Laser: Thorlabs SFL1550P, $\lambda = 1550$ nm, $P_o = 25-40$ mW
- Optické vlákno: SM, GI
- Optický spektrálny analyzátor: FT-IR Spectrometer MIR 8025, 50/60 Hz, 1 AMP
- PC

5.4 Meranie parametrov S_{11} a S_{21}

S-parametre dávajú do súvislosti zdrojovú, odrazenú a postupnú vlnu. Na meranie s-parametrov je nevyhnutný zdroj vlnenia a záťaž. Dvojbran znázornený na Obrázku 5.14 predstavuje časť obvodu nachádzajúcu sa medzi zdrojom a záťažou. V rámci výsledkov nemá tento dvojbran nijaký vplyv a teda ho je možné považovať za tzv. “black box”.



Obrázok 5.14 Dvojbran s vyznačenými zdrojovými (a_i) a odrazenými (b_i) vlnami prevzaté z [24]

S-parametre je možné odvodiť pomocou premenných a_i a b_i , ktoré sú normalizované komplexné napäťové vlny pôsobiace na i -tú bránu n -branu a odrazené od i -tej brány n -branu [24]. Vzorce popisujúce činiteľ prenosu a činiteľ odrazu sú nasledujúce:

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1}, \quad (5.6)$$

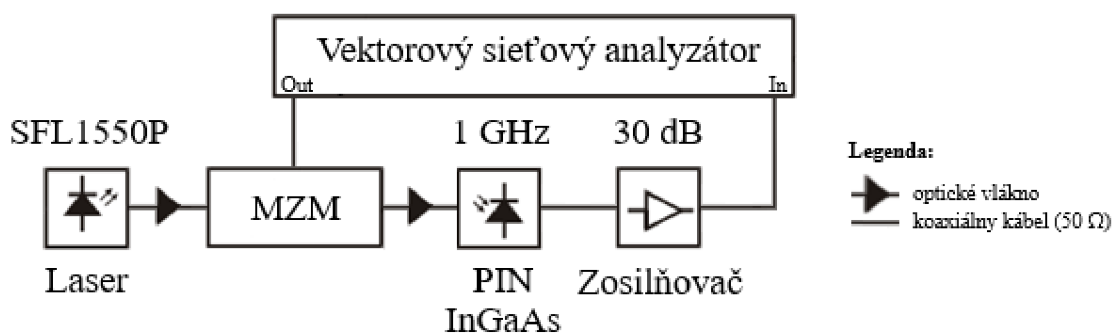
kde S_{21} predstavuje hodnotu činiteľa odrazu, b_2 je signál na výstupe a a_1 je signál vstupujúci do systému

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1}, \quad (5.7)$$

kde S_{11} predstavuje hodnotu činiteľa odrazu, b_1 je signál odrazený na vstupe a a_1 je signál vstupujúci do systému

5.4.1 Priebeh merania

Laboratórne pracovisko pre meranie činiteľa prenosu S_{21} a činiteľa odrazu S_{11} je znázornené na Obrázku 5.15. V tejto meracej sústave, kvôli dosiahnutiu zobrazenia závislosti parametrov S_{21} a S_{11} na frekvencií bol použitý vektorový sieťový analyzátor (VNA – Vector Network Analyzer).



Obrázok 5.15 Bloková schéma pre stanovenie parametrov S_{11} a S_{21}

Pri meraní bol použitý laser o vlnovej dĺžke $\lambda = 1550$ nm. Signál z lasera bol prenesený pomocou optického vlákna do Mach-Zehnderovho modulátora. Signál z MZM bol opäť prenesený pomocou optického vlákna do fotodetektora. Výstupný signál z fotodetektora bol následne zosilnený predzosilňovačom o hodnote zosilnenia $G = 30$ dB. Tento signál bol privedený na vstup vektorového sieťového analyzátoru. Výstup VNA bol pripojený na MZM. Meranie bolo prevedené automatizovane pre oba s-parametre v kmitočtovom rozsahu o šírke pásma $B = 1$ GHz.

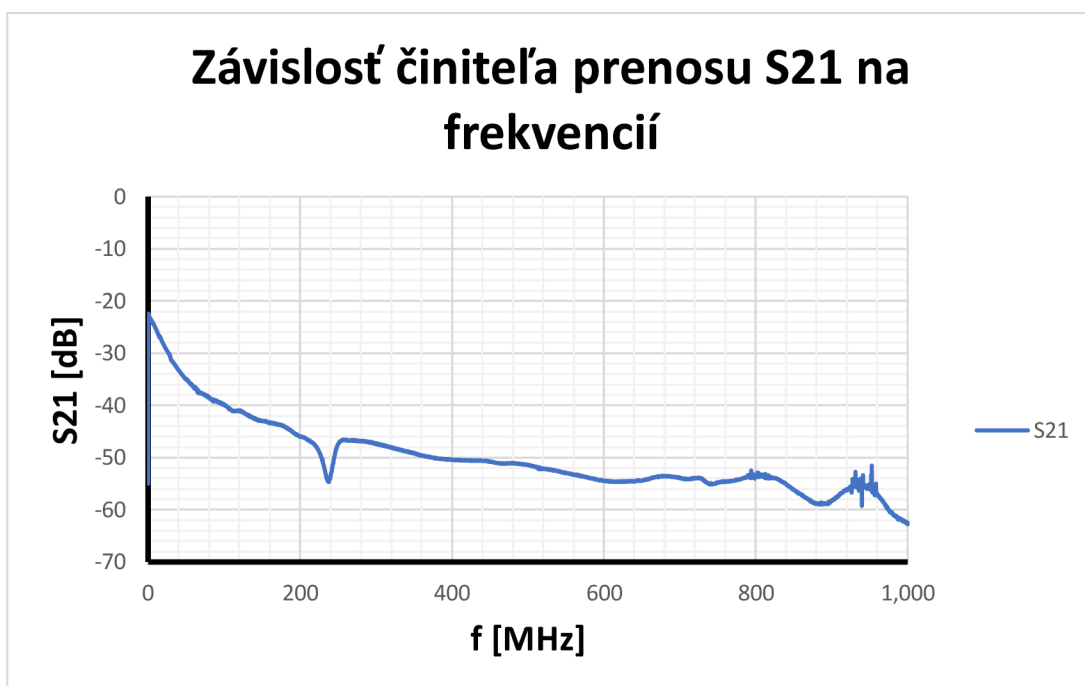
V prípade merania činiteľa prenosu S_{21} , VNA neustále porovnával výstupný signál z fotodetektora so vstupným signálom do MZM pre danú hodnotu frekvencie, ktorá bola momentálne nastavená. Následne výslednú hodnotu po porovnaní vykreslil do grafu. Týmto spôsobom premeral celú šírku pásma s dostatočne jemným krokom.

Pomocou VNA bol rovnakým spôsobom merania zmeraný činiteľ odrazu S_{11} . V tomto prípade, ale VNA porovnával signál odrazený od vstupu so vstupným signálom.

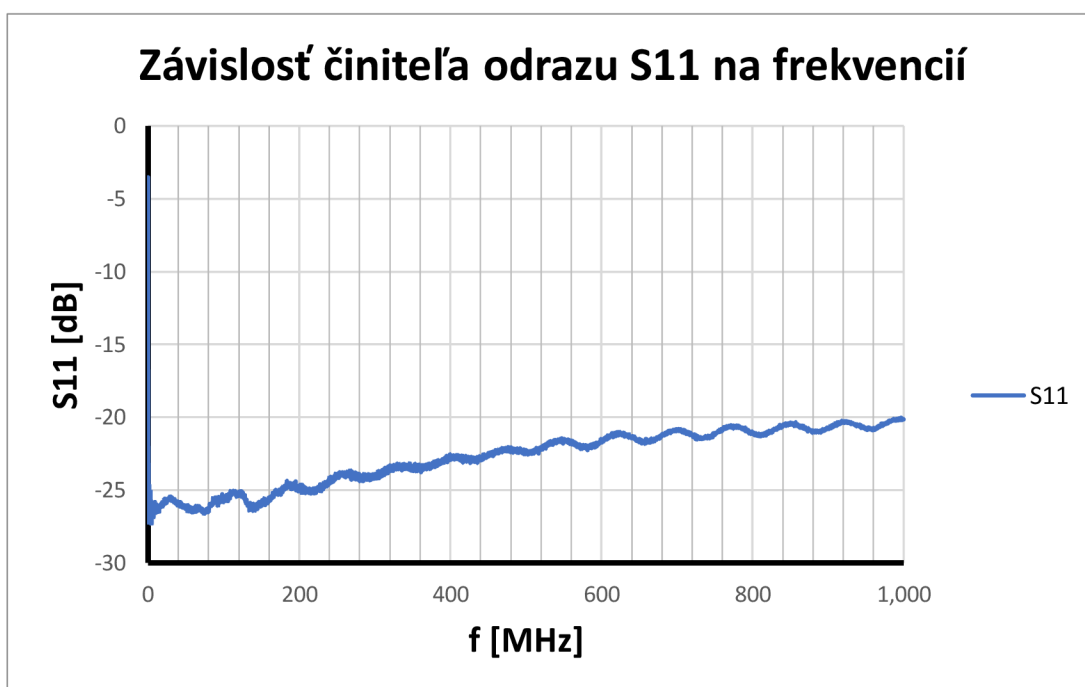
5.4.2 Výsledky merania

Údaje s-parametrov boli uložené a vynesené do grafov viz. Obrázok 5.16 a Obrázok 5.17. MZM nevykazoval veľmi vysoké hodnoty prenosu. Signál prechádzajúci cez MZM bol veľmi utlmený. Najvyššia hodnota činiteľa prenosu bola okolo -22 dB pri frekvenciách okolo 20 MHz a naopak najnižšia hodnota činiteľa prenosu na konci meraného frekvenčného rozsahu vykazovala približne -64 dB. Útlm mohol byť zapríčinený nekvalitnými zvarmi vstupného a výstupného vlákna na MZM.

Graf závislosti činiteľa odrazu S_{11} na frekvencií vykazoval odhadované správanie priebehu. Hodnota parametru S_{11} sa pohybovala v meranom frekvenčnom pásme v rozmedzí hodnôt od -27 dB po -20 dB. Horná hranica parametru S_{11} uvádzaná v datasheete je -14 dB.



Obrázok 5.16 Graf závislosti modulu činiteľa prenosu S_{21} na frekvenciách



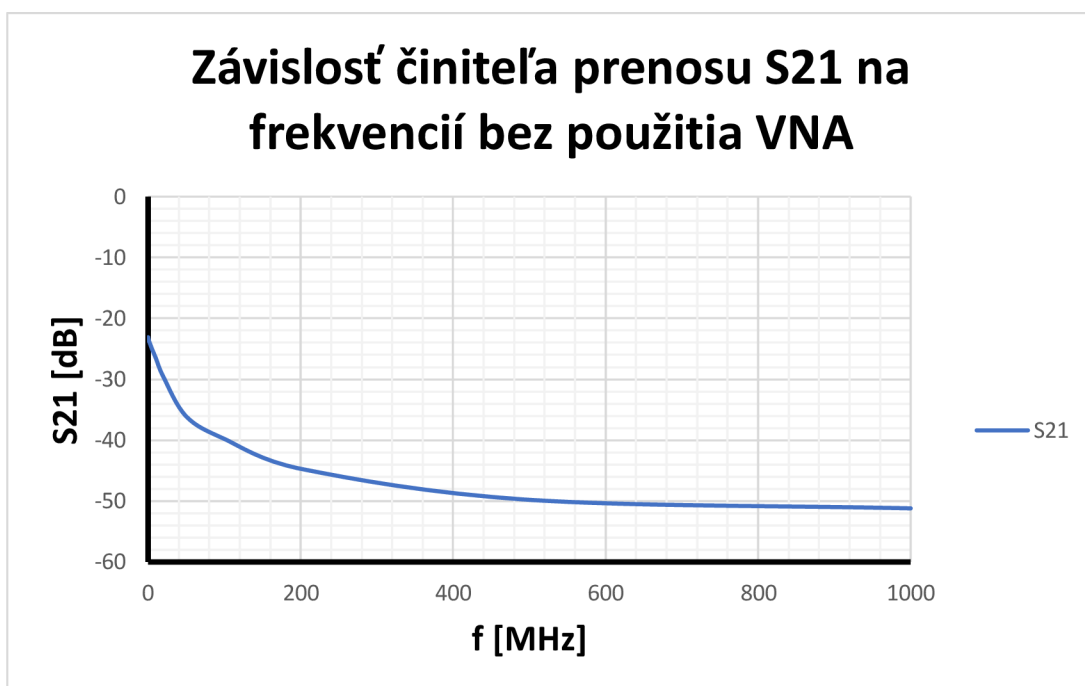
Obrázok 5.17 Graf závislosti modulu činiteľa odrazu S_{11} na frekvenciách

Stanovenie činiteľa prenosu S_{21} bolo možné aj bez použitia vektorového sieťového analyzátora viz. Obrázok 5.15. Náhradou VNA za generátor, kvôli budenie MZM a použitím spektrálneho analyzátora, kvôli zobrazeniu výsledkov merania, bolo možné zmerať parameter S_{21} . V tomto prípade sa nejednalo o automatizované meranie. Bolo potrebné jednotlivé hodnoty frekvencií nastavovať na generátore postupne a zaznamenávať hodnoty výkonu optického signálu zmeraných pomocou spektrálneho analyzátora do tabuľky viz. Tabuľka 5.5.

Tabuľka 5.5 Tabuľka zmeraných hodnôt optických výkonov $P_{RF_výstup}$ pre jednotlivé frekvencie

| f [MHz] | $P_{RF_výstup}$ [dBm] |
|-----------|------------------------|
| 0,1 | -23,10 |
| 0,2 | -23,20 |
| 0,5 | -23,40 |
| 1 | -23,70 |
| 2 | -24,00 |
| 5 | -25,00 |
| 10 | -26,50 |
| 20 | -29,60 |
| 50 | -36,10 |
| 100 | -39,80 |
| 200 | -44,70 |
| 500 | -49,80 |
| 1000 | -51,20 |

Z tabuľky bolo následné možné vyniesť namerané údaje do grafu viz. Obrázok 5.18. Porovnaním výsledných priebehov grafov viz. Obrázok 5.16 a Obrázok 5.18 je možné prehlásiť, že priebehy na oboch grafoch majú rovnaký charakter. Meranie s použitím VNA je samozrejme niekoľko násobne presnejšie. VNA pri premeraní daného frekvenčného rozsahu používa veľmi jemný krok. Výsledný priebeh však obsahuje niekoľko prekmitov, ktoré mohli byť zapríčinené parazitnými vlastnosťami použitých komponentov. Meranie bez VNA slúži, len ako názorná ukážka rýchleho premerania prenosu signálu v danom frekvenčnom pásme.



Obrázok 5.18 Graf závislosti modulu činiteľa prenosu S_{21} na frekvenciách zmeraného bez použitia VNA

5.4.3 Použité prístroje

Na zostavenie laboratórneho reťazca pre stanovenie parametrov S_{11} a S_{21} boli potrebné tieto zariadenia:

- Laser: Thorlabs SFL1550P, $\lambda = 1550$ nm, $P_0 = 25-40$ mW
- Optické vlákno: SM, GI
- DC napäťový zdroj: GW Instek GPD-3303S, 3 kanály, $U = 0-30$ V, $I = 1-3$ A
- Mach-Zehnderov modulátor: JDS Uniphase, Single drive-MZM, 10 Gb/s
- Fotodetektor: Thorlabs DC400FC, InGaAs Pin, $\lambda = 800-1700$ nm, $B = DC-1$ GHz
- Predzosilňovač: LNA, $G = 30$ dB, $B = 0,1$ MHz-2 GHz, $U = 9-12$ V
- Vektorový sieťový analyzátor: Rohde&Schwarz ZVL, $B = 9$ kHz-3 GHz

5.5 Meranie vložného útlmu

Vložný útlm spôsobuje stratu signálu šíriaceho sa zo zdroja k prijímaču, kvôli vloženým zariadeniam v prenosovej linke a spojom v prenosovej linke. Hodnota vložného útlmu je vyjadrovaná v [dB] a je definovaná vzťahom:

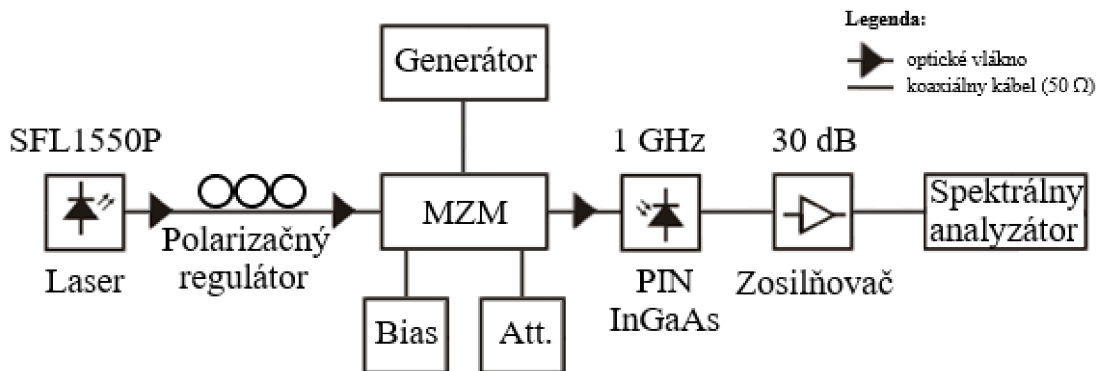
$$IL = 10 \cdot \log \left(\frac{P_T}{P_R} \right), \quad (5.8)$$

kde P_T je hodnota optického výkonu zo zdroja (bez vložného útlmu) a P_R je hodnota optického výkonu na prijímači vrátane vloženého útlmu.

Hodnota vložného útlmu závisí aj od dĺžky prenosového média. Čím je prenosové médium dlhšie, tým vznikajú vyššie straty. Pri prechode signálu cez jednotlivé zariadenia môže dochádzať k trom typom stratám: straty odrazu, absorpčné straty a dielektrické straty [25].

5.5.1 Priebeh merania

Pracovisko pre meranie parametrov vložného útlmu a predpätia (Bias) je znázornené na Obrázku 5.19. Pre stanovenie oboch parametrov bolo použité rovnaké pracovisko. Meranie vložného útlmu spočívalo v zistení hodnôt optického výkonu na vstupe a výstupe Mach-Zehnderovho modulátora. Na tento účel bol použitý tester optických vlákien, ktorý nie je súčasťou blokovej schémy viz. Obrázok 5.19.



Obrázok 5.19 Bloková schéma pre meranie vložného útlmu

Zdrojom optického signálu bol použitý laser o vlnovej dĺžke $\lambda = 1550$ nm. Optický signál ďalej putoval cez optické vlákno do polarizačného regulátora. Výstup z polarizačného regulátora bol následne zapojený do testera optických vlákien. Na vstup testera bol pridaný útlmový článok o hodnote útlmu $L = 10$ dB, kvôli zníženiu výkonu lasera a kvôli zaisteniu, aby sa tester nedostal do oblasti saturácie. Nameraná hodnota výkonu optického signálu na vstupe MZM bola $P_{o_vstup} = -7,25$ dBm.

Následne bol zmeraný výstup MZM. MZM bol budený signálom z generátora o hodnote frekvencie $f = 1$ MHz s amplitúdou 15 dBm. Na vstupný port MZM bol tiež privedený signál z DC napäťového zdroja, kvôli regulácii hodnôt vložného útlmu.

Meranie výkonu optického signálu z MZM bolo prevádzané v rozsahu napätí od 0 V do 4,1 V. Pre vyššie hodnoty napätí, nebol tester optických vlákien schopný merania. Merané hodnoty sa ďalej pohybovali mimo merací rozsah testera optických vlákien. V opačnom prípade by bolo možné prevádzať meranie až do maximálnej hodnoty uvádzanej v datasheete $U_{Att_max} = 8,4$ V. Výsledné hodnoty merania sú uvedené v tabuľke viz. Tabuľka 5.6. Hodnota vložného útlmu bola vypočítaná z rozdielu hodnôt optických výkonov na vstupe a výstupe MZM tzn. $IL = P_{o_vstup+L} - P_{o_výstup}$.

Tabuľka 5.6 Tabuľka zmeraných optických výkonov na vstupe a výstupe MZM

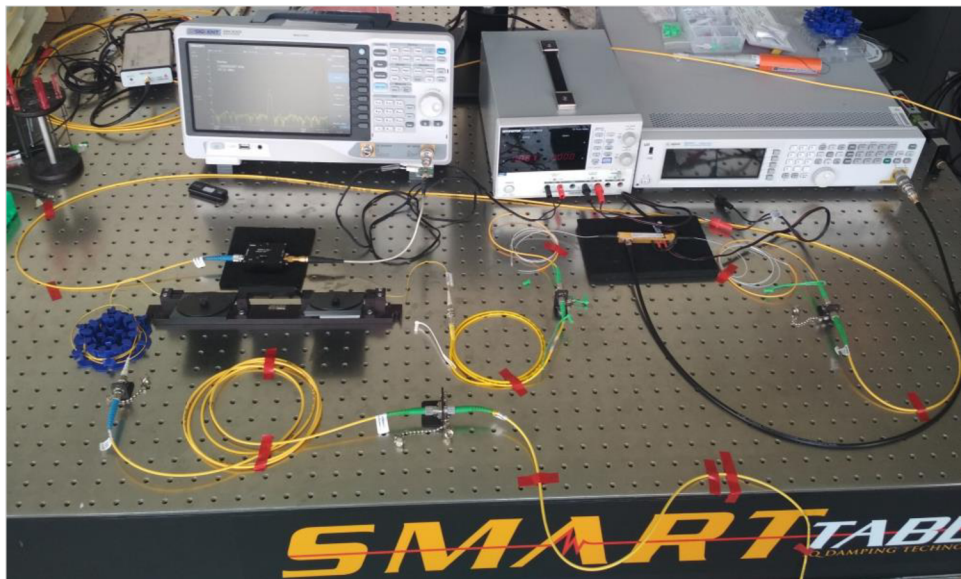
| U [V] | P_{o_vstup} [dBm] | L [dB] | $P_{o_vstup+L}$ [dBm] | $P_{o_výstup}$ [dBm] | IL [dB] |
|------------|-------------------------|-------------|---------------------------|--------------------------|--------------|
| 0,0 | -7,25 | 10 | 2,75 | -29,70 | 32,45 |
| 0,4 | -7,25 | 10 | 2,75 | -30,70 | 33,45 |
| 0,8 | -7,25 | 10 | 2,75 | -30,80 | 33,55 |
| 1,2 | -7,25 | 10 | 2,75 | -31,15 | 33,90 |
| 1,6 | -7,25 | 10 | 2,75 | -31,35 | 34,10 |
| 2,0 | -7,25 | 10 | 2,75 | -31,85 | 34,60 |
| 2,4 | -7,25 | 10 | 2,75 | -32,65 | 35,40 |
| 2,8 | -7,25 | 10 | 2,75 | -33,75 | 36,50 |
| 3,2 | -7,25 | 10 | 2,75 | -35,25 | 38,00 |
| 3,6 | -7,25 | 10 | 2,75 | -37,60 | 40,35 |
| 4,0 | -7,25 | 10 | 2,75 | -42,00 | 44,75 |
| 4,1 | -7,25 | 10 | 2,75 | -47,35 | 50,10 |

Rovnaká bloková schéma aká je znázornená na Obrázku 5.19 bola použitá pri meraní optického výkonu v závislosti na zmenách hodnôt predpätia. Jediným rozdielom bolo privedenie signálu z DC napäťového zdroja na vstupný port MZM, kvôli regulácii hodnôt predpätia namiesto regulácie hodnôt vložného útlmu. Výstup z MZM bol privedený na fotodetektor. Výstup z fotodetektora vstupoval do osciloskopu cez predzosilňovač o hodnote zisku $G = 30$ dB. Hodnoty optického výkonu boli odčítané z osciloskopu pri zmenách hodnôt predpätia od 0 V do 5,4 V s krokom 0,2 V. V tomto meraní nebol tester optických vlákien použitý. Výsledné hodnoty merania boli zaznamenané do tabuľky viz. Tabuľka 5.7.

Tabuľka 5.7 Tabuľka zmeraných výkonov RF signálov na výstupe MZM v závislosti od predpätia

| U_{Bias} [V] | $P_{RF_výstup}$ [dBm] | U_{Bias} [V] | $P_{RF_výstup}$ [dBm] |
|-------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------|
| 0,0 | -47,3 | 2,8 | -62,8 |
| 0,2 | -46,5 | 3,0 | -56,4 |
| 0,4 | -45,8 | 3,2 | -52,3 |
| 0,6 | -45,6 | 3,4 | -49,6 |
| 0,8 | -45,1 | 3,6 | -47,8 |
| 1,0 | -45,5 | 3,8 | -47,2 |
| 1,2 | -45,7 | 4,0 | -46,6 |
| 1,4 | -46,4 | 4,2 | -45,9 |
| 1,6 | -47,3 | 4,4 | -45,7 |
| 1,8 | -49,1 | 4,6 | -45,5 |
| 2,0 | -51,2 | 4,8 | -46,2 |
| 2,2 | -53,5 | 5,0 | -47,2 |
| 2,4 | -60,6 | 5,2 | -48,4 |
| 2,6 | -76,1 | 5,4 | -50,0 |

Obrázok 5.20 znázorňuje laboratórne pracovisko na ktorom boli vykonávané merania zmien vložného útlmu a predpätia (Bias) na MZM pomocou DC napäťového zdroja.

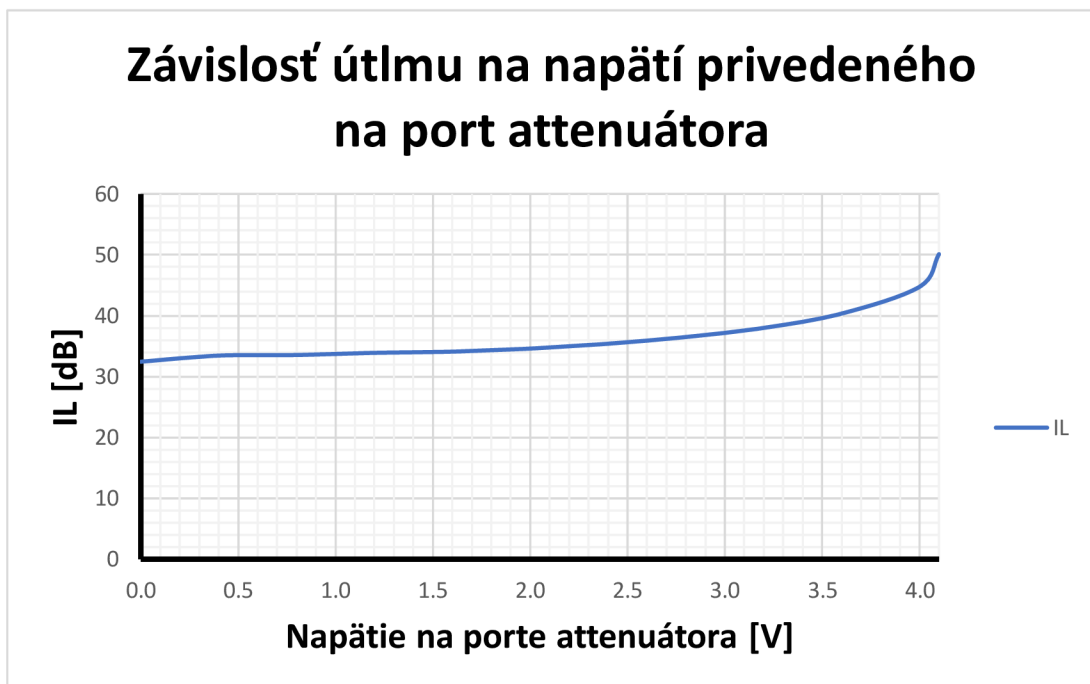


Obrázok 5.20 Laboratórne pracovisko pre meranie vložného útlmu a predpätia

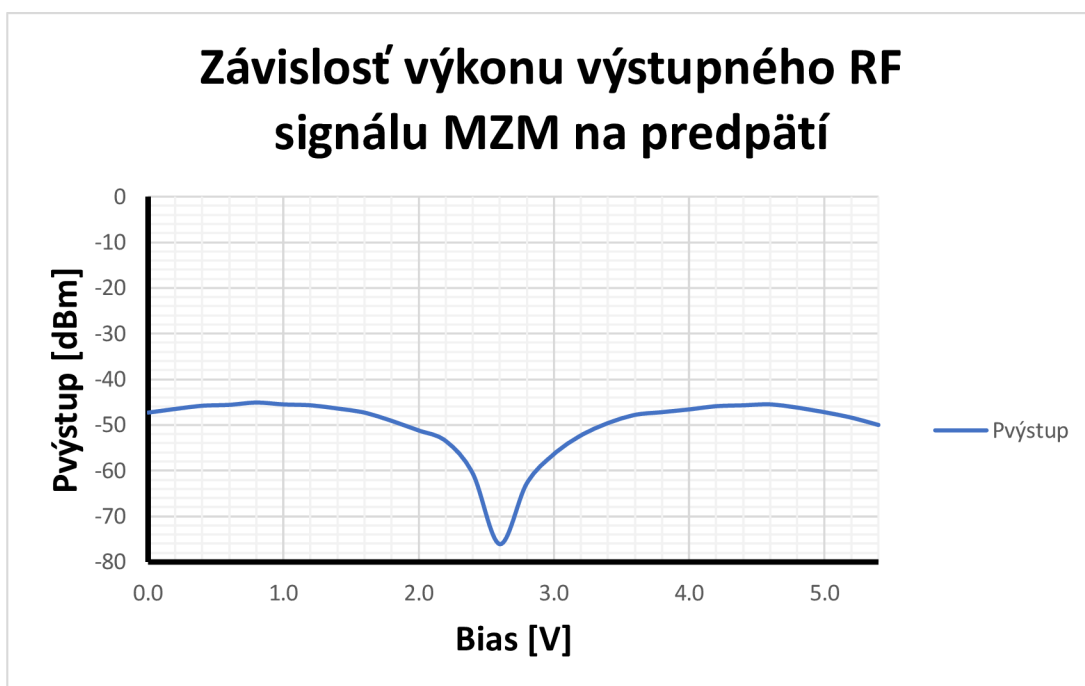
5.5.2 Výsledky merania

Z nameraných výsledkov uvedených v tabuľkách viz. Tabuľka 5.6 a Tabuľka 5.7 boli zostrojené grafy výsledných priebehov závislostí optického výkonu na zmenách hodnôt napätí attenuátora a predpätia.

Graf viz. Obrázok 5.21 poukazuje na takmer lineárnu závislosť optického výkonu meraného na výstupe MZM na napätí, ktoré bolo privedené na port attenuátora MZM. Z grafu je viditeľná priama úmera medzi IL a U_{Att} , teda so zvyšujúcou hodnotou U_{Att} narastá hodnota IL takmer lineárne. Toto tvrdenie platí do hodnoty $U_{Att} = 4$ V. Po prekročení tejto hodnoty dochádza k značne strmšiemu nárastu IL .



Obrázok 5.21 Graf závislosti výstupného optického výkonu z MZM na napätí privedeného na port attenuátora



Obrázok 5.22 Graf závislosti výkonu RF signálu na predpätí

Graf zobrazený na Obrázku 5.22 zachytáva charakteristickú krivku Mach-Zehnderovho modulátora. Táto krivka má harmonický priebeh. Ostrý prekmit v dolnej časti priebehu je spôsobený nedostatočne malým krokom použitým pri meraní. V opačnom prípade by charakteristická krivka viac pripomínala sínusový tvar, aký je znázornený v druhej kapitole na Obrázku 2.6. Určenie špičkového, kvadrátneho a nulového pracovného bodu je aj napriek nedokonalosti priebehu odhadnuteľné. Kvadrátne body je možné stanoviť z polovice približne lineárnych častí priebehov. Hodnota kvadrátneho bodu v klesajúcej časti priebehu je približne 2,5 V a v rastúcej časti priebehu približne 2,7 V.

5.5.3 Použité prístroje

Na zostavenie laboratórneho reťazca pre meranie vložného útlmu boli potrebné tieto zariadenia:

- Laser: Thorlabs SFL1550P, $\lambda = 1550 \text{ nm}$, $P_o = 25\text{-}40 \text{ mW}$
- Optické vlákno: SM, GI
- Polarizačný regulátor: Thorlabs, 3 pedály
- DC napäťový zdroj: GW Instek GPD-3303S, 3 kanály, $U = 0\text{-}30 \text{ V}$, $I = 1\text{-}3 \text{ A}$
- Generátor: Agilent N5181A MXG, $f = 100 \text{ kHz}\text{-}3 \text{ GHz}$
- Mach-Zehnderov modulátor: JDS Uniphase, Single drive-MZM, 10 Gb/s
- Fotodetektor: Thorlabs DC400FC, InGaAs Pin, $\lambda = 800\text{-}1700 \text{ nm}$, $B = \text{DC}\text{-}1 \text{ GHz}$
- Predzosilňovač: LNA, $G = 30 \text{ dB}$, $B = 0,1 \text{ MHz}\text{-}2 \text{ GHz}$, $U = 9\text{-}12 \text{ V}$
- Osciloskop: Rigol MSO 174, 4 kanály, $B = \text{DC}\text{-}100 \text{ MHz}$, 1 GSa/s
- Tester optických vlákien: EXFO FOT-10A, $\lambda = 780\text{-}1550 \text{ nm}$

5.6 Meranie optického extinkčného pomeru

Optický extinkčný pomer je parameter, ktorý popisuje ako efektívne sa elektrická energia prevádza na optickú energiu. Tento parameter je jeden z najdôležitejších parametrov v telekomunikačných aplikáciách pre stanovenie optických vysielačov používaných vo vysokorýchlostných digitálnych komunikačných a video systémoch [26]. Jednou z možností ako stanoviť parameter optického extinkčného pomeru je pomocou tzv. diagramu oka. Pomocou vzorca viz. (2.17), uvedeného v podkapitole funkcia MZM je možné tento parameter stanoviť pomerom vysokej a nízkej úrovne diagramu oka. To zodpovedá pomeru optického výkonu lasera pri zapnutom a pri vypnutom režime. Platí, že čím je pomer väčší, tým je optický vysielač kvalitnejší. Táto analógia rovnako platí pre stanovenie SNR, teda pomeru signálu od šumu. Hodnota extinkčného pomeru môže byť zhoršená v prípade, že nie sú obe ramená MZM striktne identické jedná sa o tzv. strátovú nerovnováhu [26].

5.6.1 Priebeh a výsledky merania

Pre stanovenie parametru optického extinkčného pomeru bolo využité rovnaké pracovisko ako v predchádzajúcej kapitole s blokovou schémou viz. Obrázok 5.19. Meranie spočívalo v nastavení frekvencie na generátore na nejakú nízku hodnotu konkrétne $f = 1$ MHz. Pri tejto hodnote frekvencie boli následne pomocou spektrálneho analyzátora odčítané hodnoty optického výkonu nosného signálu P_o a výkon najbližšej vyššej šumovej zložky N_{sum} . Rovnakým spôsobom boli odčítané hodnoty P_o a N_{sum} pri hodnote frekvencie $f = 500$ MHz. Namerané hodnoty sú zachytené v tabuľke viz. Tabuľka 5.8.

Tabuľka 5.8 Tabuľka hodnôt pre stanovenie optického extinkčného pomeru

| f [MHz] | P_o [dBm] | N_{sum} [dBm] | r_e [dB] |
|-----------|-------------|------------------------|------------|
| 1 | -27,8 | -65,2 | 37,4 |
| 500 | -50,6 | -65,3 | 14,7 |

Parameter r_e predstavuje rozdiel hodnôt P_o a N_{sum} . Tento rozdiel vyjadruje pomer nízkej a vysokej úrovne spektrálnych čiar, teda optický extinkčný pomer. Hodnoty extinkčného pomeru, by mali byť spravidla vyššie ako 10 dB [26]. Pre obe hodnoty frekvencie bola výsledná hodnota r_e vyššia než 10 dB.

Nízka a vysoká hodnota frekvencií v podstate predstavovala nízku a vysokú úroveň signálu v diagrame oka. Rozsah frekvencií nie je nijak tabuľkovo daný. Podstatou je značná rozdielnosť medzi nízkou a vysokou úrovňou frekvenčného signálu. Výsledná hodnota extinkčného pomeru by v diagrame oka predstavovala úroveň otvorenia prípadne prížmúrenia oka. Snahou je dosiahnuť oko čo najviac otvorené. Dosiahnutie otvoreného oka poukazuje na kvalitný systém.

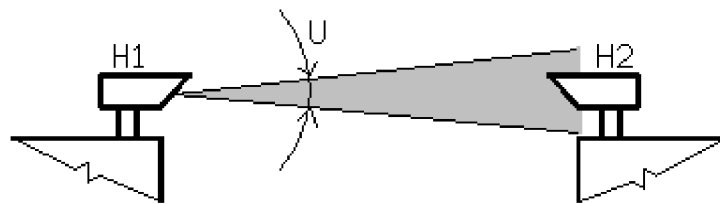
5.6.2 Použité prístroje

Na zostavenie laboratórneho reťazca pre stanovenie optického extinkčného pomeru boli potrebné tieto zariadenia:

- Laser: Thorlabs SFL1550P, $\lambda = 1550 \text{ nm}$, $P_o = 25\text{-}40 \text{ mW}$
- Optické vlákno: SM, GI
- Polarizačný regulátor: Thorlabs, 3 pedály
- DC napäťový zdroj: GW Instek GPD-3303S, 3 kanály, $U = 0\text{-}30 \text{ V}$, $I = 1\text{-}3 \text{ A}$
- Generátor: Agilent N5181A MXG, $f = 100 \text{ kHz}\text{-}3 \text{ GHz}$
- Mach-Zehnderov modulátor: JDS Uniphase, Single drive-MZM, 10 Gb/s
- Fotodetektor: Thorlabs DC400FC, InGaAs Pin, $\lambda = 800\text{-}1700 \text{ nm}$, $B = \text{DC}\text{-}1 \text{ GHz}$
- Predzosilňovač: LNA, $G = 30 \text{ dB}$, $B = 0,1 \text{ MHz}\text{-}2 \text{ GHz}$, $U = 9\text{-}12 \text{ V}$
- Osciloskop: Rigol MSO 174, 4 kanály, $B = \text{DC}\text{-}100 \text{ MHz}$, 1 GSa/s

6. BEZKÁBLOVÝ OPTICKÝ SPOJ

Optický bezkáblový spoj WOL (WOL – Wireless Optical Link) je typ komunikácie, ktorý realizuje prenosy signálov pomocou bezdrôtového prenosového média (vzdušný spoj). Pre šírenie laserových lúčov nepoužíva teda optické vlákna ako bolo použité v rámci laboratórneho prevedenia, ale využíva priame prenosy laserových lúčov cez voľné prostredie, akým je najčastejšie vzduch v atmosférickom prenosovom prostredí (APP). Tento typ komunikácie však nachádza uplatnenie aj vo vesmírnych komunikáciách, teda komunikáciách medzi družicami. WOL je zložený z dvoch hlavíc, umiestnených vo vysielacej a prijímacej časti spoja, pracujúcich v plne duplexnom režime. Hlavice v APP využívajú úzko smerový optický zväzok, ktorý je schopný dosiahnuť prenosové rýchlosti až 10 Gb/s [10]. Tento typ komunikácie je využívaný na vzdialenosti až do 4 km. Podmienkou fungovania WOL je priama viditeľnosť vysielacej a prijímacej hlavice viz. Obrázok 6.1. Práve táto podmienka predstavuje primárnu rozdielnosť medzi optickým bezkáblovým spojom a anténou komunikáciou, v ktorej nie je nevyhnutná priama viditeľnosť vysielača a prijímača, ale komunikácia môže prebiehať za pomoci viaccestného šírenia signálu.



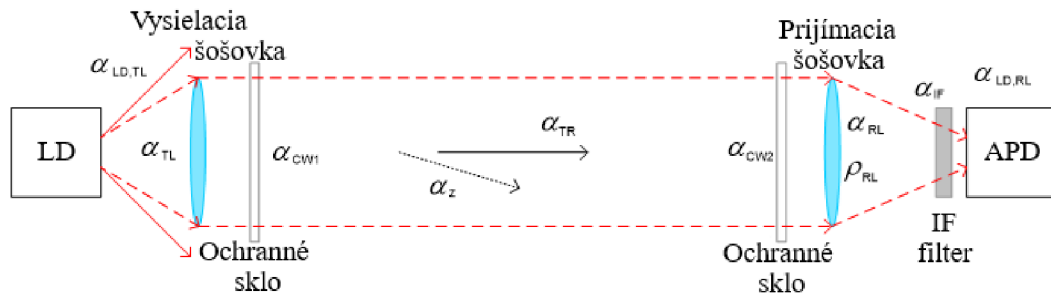
Obrázok 6.1 Ukážka priamej viditeľnosti hlavice H1 (vysielač) s hlavicom H2 (prijímač), kde U je uhlová šírka zväzku prevzaté a upravené z [10]

Optický bezkáblový spoj je zložený z troch častí: optická vysielacia hlavica, prenosové prostredie a optická prijímacia hlavica. Hlavice stavané pre vysielanie optického signálu sú konštrukčne mierne odlišné od hlavíc určených na príjem optického signálu. Vysielacia hlavica pozostáva primárne z vhodne zvoleného lasera, ktorý spĺňa určité kritéria súvisiace s vlnovou dĺžkou laserového zväzku, výkonom, spektrálnou charakteristikou atď. Ďalej sa v nej nachádza vysielacia šošovka slúžiaca na vytvorenie vhodného tvaru zväzku a krycie sklo, ktorého sklon je nastavený tak, aby nedochádzalo k spätným odrazom do laserového zdroja.

Signál vyslaný vysielacou hlavicou putuje voľným prostredím až do prijímacej hlavice. Tá je zložená z ochranného skla, nastaveného tak, aby dobre prepúšťalo prichádzajúci optický signál z vysielacej hlavice. Po ňom nasleduje prijímacia šošovka, ktorá slúži na zaostrenie optického zväzku do malej aktívnej plochy fotodetektora PIN/APD. Medzi prijímacou šošovkou a fotodetektorom je využívaný IF filter, ktorý

prepúšťa infračervené signály spektra typické pre laserové komunikácie. Zvyšné vlnové dĺžky z iných zdrojov akým je napríklad slnko potláča.

Prenosová trasa viz. Obrázok 6.2 je ľahko ovplyvniteľná rôznymi faktormi, ktoré zapríčiňujú nedokonalosti a odchýlky pri prijíme laserového signálu.



Obrázok 6.2 Schéma optického bezkáblového spoja prevzaté a upravené z [10]

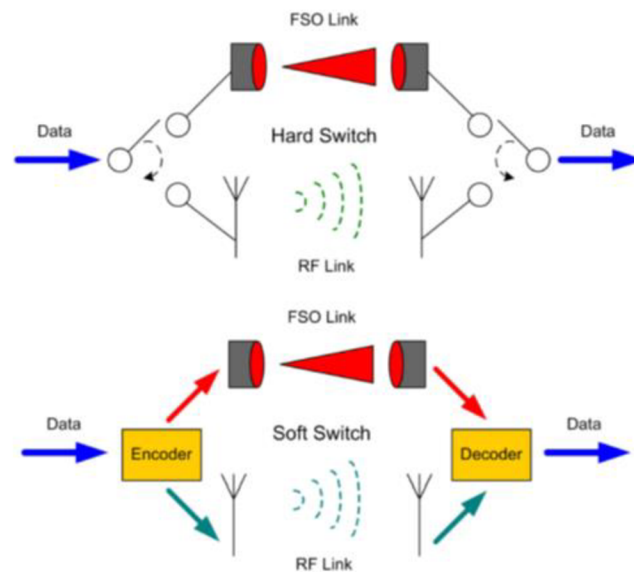
Nežiadúce vplyvy pri bezkáblovom optickom prenose sú napríklad: rušenie, prerušenie, útlm, refrakcia, turbulencia a pod. Vlastnosti atmosférického prenosového prostredia tiež ovplyvňujú kvalitu prenosu. APP je nestacionárne a nehomogénne prostredie tzn. hodnoty indexov lomu molekúl v atmosfére sa menia v závislosti od polohy a času. Samotná atmosféra sa taktiež správa ako filter, ktorý odfiltráva niektoré vlnové dĺžky vysielacieho optického lúča. Z toho dôvodu sa pre vysielanie optických lúčov využívajú tzv. atmosférické okná, v ktorých dochádza k minimálnym útlmom.

Parametre WOL sú delené do dvoch kategórií stacionárne a štatistické. Stacionárne parametre sú parametre, ktoré súvisia s konštrukciou spoja. Ich hodnoty je možné meniť. Jedná sa napríklad o prenosové rýchlosti, dosah optického spoja, chybovosť, energetika spoja atď.

Štatistické parametre sa naopak meniť nedajú. Tieto parametre súvisia s lokalitou optického spoja. Každá lokalita vykazuje špecifické meteorologické vplyvy, ktoré ovplyvňujú prenos optického signálu voľným prostredím. Ich prítomnosť je štatisticky odhadnuteľná. Jedná sa o dlhodobé prerušenia (hmla, mraky, snehová víchrica...) a krátkodobé prerušenia (prelet krdľa vtákov...).

V niektorých oblastiach s dobrou geografickou polohou, kde nedochádza k častým zmenám počasia je v rámci technológie možné využitie tzv. hybridného FSO/RF prenosu. Jedná sa spôsob prenosu, ktorý je možný aplikovať pre systém ROF p. Obrázok 6.3. Táto technológia využíva dve cesty pre jeden komunikačný spoj. Jedná sa o bezdrôtovú technológiu, kde jedna z ciest využíva na prenos signálu WOL a druhá cesta využíva anténny prenos. Vysielanie signálu, tak môže fungovať po dvoch cestách súčasne tzv. Soft switch, alebo sa prihliada na aktuálne atmosférické podmienky, čo vedie k vyhodnoteniu použitia cesty, v ktorej sa predpokladá lepší prenos (s menším útlmom)

tzv. Hard switch. Hard switch tak môže byť používaný aj v oblastiach s premenlivejším počasím.



Obrázok 6.3 Zobrazenie funkcie FSO linky pre Hard a Soft prepínanie prevzaté z [10]

Aplikovanie bezdrôtového optického spoja v technológií ROF by bolo realizovateľné na kratšie vzdialenosti. V situáciách, v ktorých by nastával problém inštalácie optického vlákna do zeme z rôznych dôvodov ako napríklad rieky, jazerá a podobne, by mohlo aplikovanie WOL byť prínosné v technológií ROF primárne z finančného hľadiska. V prípadoch, kde by nebolo nutné sa vyhýbať prekážkam, ktoré by bolo náročné podkopať alebo zložito inštalovať optické vlákna (pod vodu) by táto varianta bola zbytočne nákladná pre komunikáciu na dlhé vzdialenosti. Jej využitie by mohlo slúžiť ako záložný zdroj v prípade výpadku komunikácie pri poškodení optického vlákna pre niektoré dôležité krátke linky.

ZÁVER

Táto diplomová práca pojednáva o technológii RoF, ktorá umožňuje prenos rádiového signálu cez optické vlákno. Práca oboznamuje o tejto technológii, poukazuje na jej výhody a obmedzenia a taktiež zahŕňa jej typy a možné prevedenia. Popisuje funkciu, delenie a použitie jednotlivých komponentov zostaveného reťazca systému RoF.

V práci boli otestované vlastnosti navrhnutého systému v laboratórnom prevedení v pásme C. Testovanie spočívalo v meraní parametrov použitých komponentov. Jednalo sa o testovanie vlastností použitého lasera (SFL1550P) a Mach-Zehnderovho modulátora (MZM), ktoré predstavujú hlavné komponenty zostaveného reťazca. Zmerané parametre súvisiace s použitým laserom boli relatívny intenzitný šum (RIN), šírka spektrálnej čiary (FWHM) a spektrum optického signálu. Hodnota parametru RIN bola stanovená dvoma spôsobmi. Prvá metóda využíva odčítanie frekvenčného spektra pri konkrétnej hodnote budiaceho prúdu od spektra pri vypnutom laseri. Druhá metóda zahŕňa odčítanie šumov spôsobenými inými komponentmi od spektra pri danej hodnote budiaceho prúdu. Obidve metódy vykazovali výsledky zrovnateľné s výsledkami v datasheete. Meranie šírky spektrálnej čiary bolo prevádzané pomocou optickej heterodynnej metódy s oneskorením. Oneskorenie bolo spôsobené zaradením optického vlákna o určitej dĺžke do jednej z trás. Vplyvom interferencie signálov z oboch trás, bolo možné v danom rozsahu zobrazenia na spektrálnom analyzátore, zmerať šírku laserovej čiary z polovice priebehu pre jednotlivé hodnoty budiacich prúdov lasera.

V rámci MZM boli zmerané parametre S_{11} a S_{21} , vplyv predpätia (Bias) a vložného útlmu na výstupný optický výkon z MZM a optický extinkčný pomer. Pri meraní činiteľa prenosu bol zaznamenaný značný útlm signálu pri prechode MZM. Vlastnosti samotného modulátora sú vďaka tomu značne ovplyvnené. Tento nedostatok zabraňuje v použití tohto modulátora v niektorých aplikáciách. Príčina vysokej hodnoty vložného útlmu mohla byť spôsobená nekvalitnými zvyermi na vstupnom a výstupnom vlákne MZM. Potlačenie vzniknutého útlmu by bolo možné použitím vysokofrekvenčného zosilňovača pred vstup MZM, alebo použitím lasera s vyšším výkonom. Všetky merania boli prevádzané do hodnoty $f = 1$ GHz, z dôvodu kmitočtových obmedzení použitých komponentov, konkrétne: fotodetektor, predzosilovač a spektrálny analyzátor.

Z výsledkov zmeraných parametrov bol vytvorený vzorový laboratórny protokol, ktorý je súčasťou príloh.

Možné rozšírenie tejto práce by mohlo spočívať vo využití MZM v bezkáblovom optickom spoji.

LITERATÚRA

- [1] *Access denied* [online]. Copyright © 2020 [cit. 18.11.2020]. Dostupné z: <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95043078-what-is-radio-over-fiber>
- [2] ZIN, A. M., M. S BONGSU, S. M. IDRUS a N. ZULKIFLI. *An overview of radio-over-fiber network technology*. In: International Conference On Photonics 2010 [online]. IEEE, 2010, 2010, s. 1-3 [cit. 2020-05-15]. DOI: 10.1109/ICP.2010.5604429. ISBN 978-1-4244-7186-7.
- [3] *Journal of Optical Communications*, Volume 38, Issue 1, Pages 19–25, eISSN 2191-6322, ISSN 0173-4911, DOI: <https://doi.org/10.1515/joc-2016-0020>.
- [4] *A Review on Radio over Fiber communication System*. ResearchGate | Find and share research [online]. Copyright © IA [cit. 18.11.2020]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/319738806_A_Review_on_Radio_over_Fiber_communication_System
- [5] ISLAM, S., KHAN, M. F., HOSSAN, M. Z. a AMIN, M. A. *An Overview of Radio over Fiber (RoF) Technology*. In: 2019 2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICICT) [online]. IEEE, 2019, 2019, s. 749-752 [cit. 2020-05-15]. DOI: 10.1109/ICICICT46008.2019.8993233. ISBN 978-1-7281-0282-5.
- [6] TORNATORE, Massimo. *Fiber-Wireless Convergence in Next-Generation Communication Networks: Systems, Architectures, and Management*. 2017. ISBN 978-3-31-942822-2.
- [7] *Předzesilovače pro pásmo 23 cm s velmi malým šumem: Šumové číslo kaskádně řazených zesilovačů*. [online]. České Budějovice, 2017 [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: http://ok1ufc.nagano.cz/UHF_Small/ULNA/NF2.htm
- [8] *Laserové diody: Část 1- Princip funkce laserových diod* [<http://www.elektrorevue.cz/clanky/01034/index.html>]. [cit. 2020-12-02].
- [9] SENIOR, John M. *Optical fiber communications: principles and practice. 3rd ed.* Harlow: Prentice Hall, 2009, 1, 1076 s.: il. ISBN 978-0-13-032681-2.
- [10] WILFERT, O. *Optoelektronika*. UREL, VUT v Brně, Brno: UREL FEKT VUT v Brně, 2002. ISBN: 80-214-2264- 5.
- [11] *RP Photonics logo Encyclopedia: Relative Intensity Noise*. [online]. [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/relative_intenzity.html
- [12] ROZSYPAL, Filip. *Simulace Machova Zehnderova interferometru*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017, 62 listů.
- [13] ŽATKOVIČ, Ing. Alexander. *AMPLITÚDOVÁ MODULÁCIA [AM]* [online]. [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: <https://alzat.spseke.sk/radiote/modula/am/am.htm>
- [14] *Q Factor and Bandwidth of a Resonant Circuit. All About Circuits* [online]. [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-6/q-and-bandwidth-resonant-circuit/>

- [15] *Performance Analysis of RoF link using Mach-Zehnder Modulator and its parameters*. International Conference of Technology [online]. [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: <http://ijoes.vidyapublications.com/paper/Vol16/20-Vol16.pdf>
- [16] *Elektronická učebnica optokomunikačné systémy 1: OPTICKÉ VLÁKNA*. International Conference of Technology [online]. [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: <http://evyucba.ku.sk/oks/html/3.html>
- [17] *Technológie optických prenosov. Prenos signálu technológiami optických vlákien* [online]. [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: http://pk-info.spsepn.edu.sk/studium/ucebtext/ele/siete/technol_optika.pdf
- [18] PUNČOCHÁŘ, Ing. Josef. *Přenosová cesta optická*. [Http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuuka/FEI/AEO/sylaby/AEO_02.pdf](http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuuka/FEI/AEO/sylaby/AEO_02.pdf) [online]. [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: http://pk-info.spsepn.edu.sk/studium/ucebtext/ele/siete/technol_optika.pdf
- [19] BUBNÍK, Ing. Lukáš, Ing. Jiří KLAJBL a Ing. Petr MAZUCH. *Optoelektrotechnika: Vysvětlení principu šíření světla optickými vlákny*. 2014, 1-7. ISSN 978-80-88058-20-5. Dostupné z: <https://publi.cz/books/185/04.html>
- [20] *Elektronická učebnica optokomunikačné systémy 1: Detektory optického žiarenia*. International Conference of Technology [online]. [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: <http://evyucba.ku.sk/oks/html/3.html>
- [21] *What is RF over fiber technology and what are the benefits? ViaLite Communications* [online]. [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: <https://www.vialite.com/resources/guides/what-is-rf-over-fiber-technology/>
- [22] DERICKSON, Dennis. *Fiber Optic Test and Measurement*. 1998. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall. ISBN 0-13-534330-5.
- [23] *Optical Spektrum: Advances in 1–100GHz Microwave Photonics: All-Band Optical Wireless Access Networks Using Radio Over Fiber Technologies*. Science Direct [online]. 2005 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/optical-spectrum>
- [24] PROCHÁDZKA, Tomáš a Zdeněk BARTOŇ. *S-parametry: 2-Port Network Analysis* [online]. 13.6.2002 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02029/index.html>
- [25] *PCB DESIGN AND ANALYSIS: Insertion Loss vs. Return Loss: Signal Transmission and Reflection* [online]. [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://resources.pcb.cadence.com/blog/2020-insertion-loss-vs-return-loss-signal-transmission-and-reflection>
- [26] Extinction Ratio Simplified. *Embrionix* [online]. 2017 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://www.embrionix.com/resource/12G-SDI-Extinction-ratio-simplified-st297-st2082-compliant-sfp>

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

Skratky:

| | |
|-------|--------------------------------------------------------|
| RoF | Rádiový prenos cez optické vlákno |
| RF | Rádiová frekvencia |
| CATV | Káblová televízia |
| CS | Centrálne stanica |
| BS | Základná stanica |
| RAU | Vzdialená anténa jednotka |
| CU | Zariadenia užívateľa |
| RFoF | Prenos vysokofrekvenčného signálu cez optické vlákno |
| IFoF | Prenos signálu stredných frekvencií cez optické vlákno |
| BBoF | Prenos signálu v základnom pásme cez optické vlákno |
| IF | Stredná frekvencia |
| IM-DD | Modulácia intenzity s priamou detekciou |
| EM-DD | Externá modulácia s priamou detekciou |
| HE-DD | Heterodyniová modulácia s priamou detekciou |
| IM | Intenzita modulácie |
| EM | Externá modulácia |
| HE | Heterodyniová modulácia |
| DD | Priama detekcia |
| ISI | Medzysymbolová interferencia |
| BER | Bitová chybovosť |
| SNR | Pomer signál k šumu |
| CW | Kontinuálna vlna |
| RHD | Dial'ková detekcia heterodyniovania |
| LED | Luminiscenčná dióda |
| LD | Laserová dióda |
| RIN | Relatívny intenzitný šum |
| PSD | Výkonová spektrálna hustota |
| MZM | Mach-Zehnderov modulátor |
| AM | Amplitúdová modulácia |
| NA | Numerická apertúra |
| SM | Jednomódové vlákno |
| MM | Mnohomódové vlákno |
| SI | Skoková zmena indexu lomu |
| GI | Plynulá zmena indexu lomu |
| PMD | Polarizačná módová disperzia |
| APD | Lavínová fotodióda |
| NEP | Ekvivaletný šumový výkon |

| | |
|------|---------------------------------------------|
| EMI | Elektromagnetické rušenie |
| IoT | Internet vecí |
| DR | Dynamický rozsah |
| NF | Šumové číslo |
| WLAN | Bezdrôtová lokálna sieť |
| UMTS | Univerzálny mobilný telekomunikačný systém |
| QAM | Kvadrátúrna amplitúdová modulácia |
| OFDM | Ortogonalný multiplex s frekvenčným delením |
| DC | Jednosmerný prúd |
| FWHM | Šírka spektrálnej čiary |
| OSA | Optický spektrálny analyzátor |
| ESA | Elektrický spektrálny analyzátor |
| VOA | Variabilný optický attenuátor |
| SMSR | Činiteľ potlačenie bočného módu |
| PC | Počítač |
| VNA | Vektorový sieťový analyzátor |
| WOL | Bezkáblový optický spoj |
| APP | Atmosférické prenosové prostredie |
| FSO | Optická komunikácia vo voľnom priestore |

Symboly:

| | | |
|----------|---------------------------------------|----------------------|
| E | optická intenzita | $(W \cdot m^{-2})$ |
| I | prúd | (A) |
| f_c | nosná frekvencia | (Hz) |
| f_0 | stredná frekvencia | (Hz) |
| ω | uhlový kmitočet | $(rad \cdot s^{-1})$ |
| P_s | výkon signálu | (W) |
| P_n | výkon šumu | (W) |
| I_p | prahová hodnota prúdu | (A) |
| P_o | optický výkon | (W) |
| t | časová jednotka | (s) |
| E_g | šírka zakázaného pásu | (eV) |
| h | Planková konstanta | (J · s) |
| f | frekvencia | (Hz) |
| $w(z)$ | pološírka Gaussvého zväzku | (m) |
| w_0 | polomer zväzku v krčku | (m) |
| z | vzdialenosť na priestorovej súradnici | (m) |
| z_0 | Rayleighova vzdialenosť | (m) |

| | | |
|-----------------|---------------------------------------|--------------------|
| k | vlnové číslo | (m^{-1}) |
| $R(z)$ | polomer krivosti vlnoplochy | (m) |
| λ | vlnová dĺžka | (m) |
| θ_0 | divergencia zväzku | (s) |
| \underline{P} | priemerná hodnota optického výkonu | (W) |
| δP | nepravidelná hodnota optického výkonu | (W) |
| τ | časová konštanta | (s) |
| u_m | okamžitá hodnota amplitúdy | (V) |
| U_m | maximálna hodnota amplitúdy | (V) |
| f_d | dolné postranné pásmo | (Hz) |
| f_h | horné postranné pásmo | (Hz) |
| B | šírka pásma | (Hz) |
| m | koeficient amplitúdovej modulácie | (-) |
| r_e | optický extinkčný pomer | (-) |
| P_1 | optický výkon pri zapnutom zdroji | (W) |
| P_0 | optický výkon pri vypnutom zdroji | (W) |
| α_m | medzný uhol | (°) |
| n | index lomu | (-) |
| c | rýchlosť svetla vo vákuu | $(m \cdot s^{-1})$ |
| v | rýchlosť žiarenia v danom prostredí | $(m \cdot s^{-1})$ |
| V | normovaná frekvencia | (Hz) |
| λ_0 | vlnová dĺžka vo vákuu | (m) |
| a | polomer jadra optického vlákna | (m) |
| M | počet vybudených módov | (-) |
| L | útlm | (dB) |
| L_m | merný útlm | (dB/km) |
| L_A | útlm absorpciou | (dB) |
| L_R | útlm materiálového rozptylu | (dB) |
| L_O | útlm ohybom | (dB) |
| P_{IN} | vstupný svetelný výkon | (W) |
| P_{OUT} | výstupný svetelný výkon | (W) |
| l | dĺžka vlákna | (m) |
| i_λ | intenzita rozptýleného žiarenia | $(W \cdot m^{-2})$ |
| I_λ | intenzita priameho žiarenia | $(W \cdot m^{-2})$ |
| K | koeficient priepustnosti | (-) |
| W_v | výstupná práca uvoľnenia elektrónu | (W) |
| E_k | kinetická energia | (J) |
| E_v | intenzita osvetlenia | (lx) |
| S_a | jednotka plochy | (m^2) |

| | | |
|---------------|-----------------------------------------------|-----------------------|
| τ_f | časová konštanta fotodiódy | (s) |
| w_p | šírka vrstvy prechodu | (s) |
| v_T | rýchlosť nosičov náboja | (m. s ⁻¹) |
| C | elektrická kapacita fotodiódy | (F) |
| ε | permitivita prostredia | (F. m ⁻¹) |
| S_p | plocha prechodu | (m ²) |
| S_I | prúdová citlivosť | (A. W ⁻¹) |
| S_U | napät'ová citlivosť | (V. W ⁻¹) |
| U | napätie | (V) |
| S | výkon signálu | (W) |
| N | výkon šumu | (W) |
| F | šumový faktor | (-) |
| T_0 | štandardná teplota šumu | (K) |
| T_e | teplota šumu prenosového zariadenia | (K) |
| N_q | výstrelový šum | (W/Hz) |
| q | náboj elektónu | (C) |
| I_{DC} | hodnota jednosmerného prúdu | (A) |
| R_L | hodnota pridanej záťaže | (Ω) |
| N_{th} | tepelný šum | (W/Hz) |
| k_B | Boltzmanova konštanta | (J. K ⁻¹) |
| T_i | izbová teplota | (K) |
| F_A | šum predzosilňovača | (dB) |
| G_A | hodnota zosilnenia zosilňovača | (dB) |
| F_{SA} | šum spektrálneho analyzátora | (dB) |
| N_{dk} | dark current šum | (W/Hz) |
| P_{DC} | výkon jednosmernej zložky | (W) |
| U_{DC} | hodnota jednosmerného napätia | (V) |
| P_e | elektrický výkon | (W) |
| I_B | budiaci prúd lasera | (A) |
| L_{pp} | hodnota ľavého postranného pásma | (dB) |
| R_{pp} | hodnota pravého postranného pásma | (dB) |
| S_{21} | činiteľ prenosu | (dB) |
| b_2 | signál na výstupe dvojbranu | (-) |
| a_1 | signál na vstupe dvojbranu | (-) |
| S_{11} | činiteľ odrazu | (dB) |
| b_1 | signál odrazený od vstupu dvojbranu | (-) |
| U_{Bias} | predpätie | (V) |
| U_{Att} | hodnota napätia privedená na port attenuátora | (V) |
| IL | vložný útlm | (dB) |

ZOZNAM PRÍLOH

| | |
|--------------------------------------------|-----------|
| PRÍLOHA – LABORATÓRNY PROTOKOL..... | 85 |
|--------------------------------------------|-----------|

Príloha – Laboratórny protokol

MERANIE PARAMETROV ROF SYSTÉMU

Ústav radioelektroniky FEKT VUT v Brne

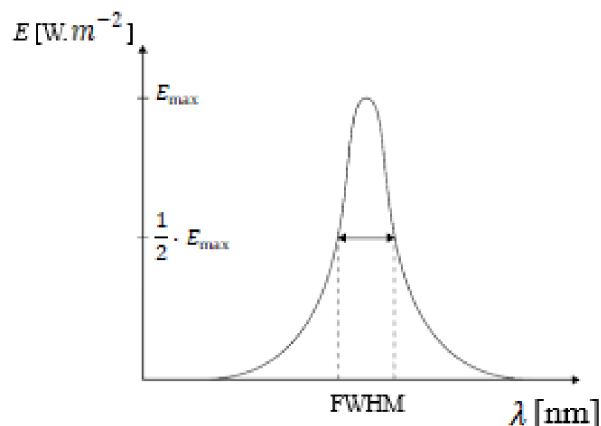
1. Teoretické poznatky

Technológia umožňujúca prenos rádiového signálu cez optické vlákno, pri ktorej je svetelný (optický) signál modulovaný rádiovým signálom (RF) sa nazýva Radio over Fiber (RoF). Technológia RoF bola vyvinutá s cieľom zefektívnenia komunikačných technológií. Je ľahko aplikovateľná na všetky typy prenosových systémov. Najviac je však spájaná z analógovým prenosom. Jej cieľom je zjednodušiť, zefektívniť a cenovo znížiť komunikačné systémy.

Experimentálne prevedenie reťazca RoF nezahŕňa anténne prenosy ako v reálnom prevedení. Vysokofrekvenčné signály sú generované do určitých frekvencií, ktoré sú limitované konkrétnym použitým typom generátora a ostatných komponentov. Cieľom tejto laboratórnej úlohy je meranie parametrov dvoch hlavných komponentov experimentálneho reťazca RoF systému a to lasera a modulátora.

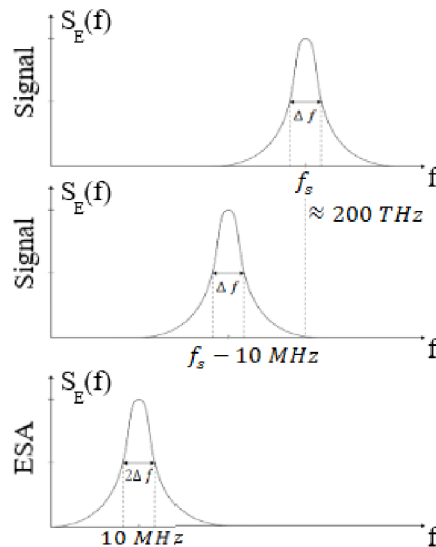
Parametre týkajúce sa použitého lasera v reťazci RoF sú šírka spektrálnej čiary (FWHM), relatívny intenzitný šum (RIN) a optické spektrum.

Hodnota šírky spektrálnej čiary je stanoviteľná pomocou grafického znázornenia závislosti optickej intenzity E [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] na vlnovej dĺžke λ [nm] viz. Obrázok 1. Jej hodnotu je možné z grafu určiť ako vzdialenosť okrajov laserového zväzku z polovice priebehu optickej intenzity teda $\frac{1}{2} \cdot E_{\text{max}}$, čo predstavuje pokles úrovne signálu o 3 dB.



Obrázok 1. Závislosť optickej intenzity na vlnovej dĺžke pre stanovenie šírky spektrálnej čiary

Nanešťastie optické spektrálne analyzátory (OSA) neumožňujú požadované rozlíšenie pre meranie šírky spektrálnej čiary lasera. Z toho dôvodu je možné (okrem odčítania hodnoty FWHM z grafu) stanoviť hodnotu FWHM použitím alternatívnych charakterizačných metód. Jednou z nich je tzv. heterodynová metóda s oneskorením. Táto metóda využíva vznik oneskorenia v jednej vetve reťazca dosiahnuté pomocou optického vlákna. Ak oneskorenie v jednej vetve prekročí koherenčný čas zdroja, potom kombinujúce signály spolu interferujú akoby pochádzali z dvoch nezávislých laserov.



Obrázok 2. Princíp heterodynovej metódy s oneskorením

Princíp heterodynovej metódy s oneskorením je znázornený na Obrázku 2. Kde v hornej časti priebehu je zachytená spektrálna čiara lasera, ktorý vyžaruje optický signál o hodnote $\lambda = 1550 \text{ nm}$, čo v prepočte približne zodpovedá frekvencií $f_s = 200 \text{ THz}$. V časti pod ním je zobrazený posun frekvencie nosného signálu po interferencií so signálom oneskoreným pomocou optického vlákna. Vplyvom oneskorenia teda dochádza k posunu referenčnej hodnoty o určitú frekvenčnú hodnotu zodpovedajúcu vzniknutému oneskoreniu. V tomto prípade hodnota oneskorenia zodpovedá frekvencií o hodnote $f = 10 \text{ MHz}$. Posledná časť obrázku poukazuje na vplyv fotodetekcie. Fotodetektor po vykonaní detekcie, spôsobí posun celého priebehu do základného pásma (k počiatku súradnicovej sústavy) a dvojnásobné rozšírenie spektrálnej čiary. Takýto priebeh je teda finálny priebeh, ktorý je možné zobraziť pomocou elektrického spektrálneho analyzátora (ESA). Bloková schéma určená na meranie FWHM, ktorá využíva tento princíp je znázornená nižšie v bode Ad 1 viz. Obrázok 4.

Hodnota relatívneho intenzitného šumu (RIN) je hodnota, ktorá poukazuje na nestabilitu úrovne optickej intenzity lasera. Výkyvy optickej intenzity sú zapríčinené nežiadúcimi javmi ako: vibrácie v laserovej dutine, kolísanie laserového zisku, prenos šumu zo zdroja a podobne. Okrem samotného lasera je parameter RIN ovplyvňovaný šumami spôsobenými ďalšími pripojenými prístrojmi do prenosového reťazca.

V laboratórnom meraní sa jedná o tri prvky, ktoré zapríčiňujú zvyšovanie šumových zložiek do výsledkov merania a to fotodetektor, predzosilňovač a spektrálny analyzátor. Typy šumov ovplyvňujúce výsledky merania sú:

$$N_q = 2 \cdot q \cdot I_{DC} \cdot R_L, \quad (1.1)$$

kde N_q predstavuje hodnotu výstrelového šumu, q je konštantná hodnota náboja elektrónu $q = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C, I_{DC} je jednosmerný prúd a R_L je pridaná záťaž o hodnote 50 Ω .

$$N_{th} = k_B \cdot T_i \cdot (F_A \cdot G_A + F_{SA} - 1) / G_A, \quad (1.2)$$

kde N_{th} predstavuje hodnotu tepelného šumu, k_B je Boltzmanova konštanta o hodnote $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J.K⁻¹, T_i je izbová teplota v Kelvinoch, G_A je hodnota zosilnenia predzosilňovača $G_A = 30$ dB, F_A je šum spôsobený vplyvom predzosilňovača $F_A = 2$ dB a F_{SA} je šum zapríčinený samotným spektrálnym analyzátorom $F_{SA} = 3$ dB.

$$N_{dk} = 2 \cdot q \cdot I_{DC}, \quad (1.3)$$

kde N_{dk} predstavuje hodnotu "dark current" šumu, q je konštantná hodnota náboja elektrónu $q = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C a I_{DC} je jednosmerný prúd.

Z toho vyplýva, že pre stanovenie parametru RIN je potrebné z výsledných hodnôt merania odpočítať vyššie uvedené šумы, čím je možné dosiahnuť hodnoty samotného šumu použitého lasera. Vzorec pre výpočet parametru RIN [dB/Hz] je definovaný vzťahom:

$$RIN = 10 \cdot \log \left(\frac{\frac{S+N}{B}}{(I_{DC})^2 \cdot R_L} \right) - N_q - N_{th} - N_{dk}, \quad (1.4)$$

kde $S+N$ je hodnota signálu so šumom na danej frekvencii, B je šírka pásma, I_{DC} je hodnota jednosmerného prúdu, R_L je pridaná záťaž o hodnote 50 Ω , N_q je hodnota výstrelového šumu, N_{th} je hodnota tepelného šumu a N_{dk} je hodnota "dark current" šumu.

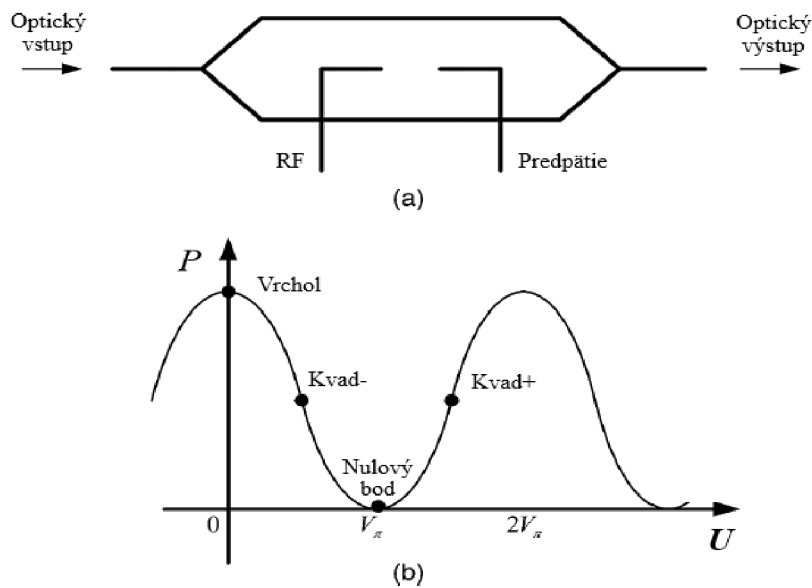
Hodnotu optického výkonu P_o je možné zmerať a taktiež stanoviť pomocou vzorca:

$$P_o = \frac{I_{DC}}{0,95}, \quad (1.5)$$

kde konštanta 0,95 A/W predstavuje parameter špičkovej odozvy (Peak Response) odčítaný z datasheetu fotodetektoru.

Optické spektrum nejakého optického zdroja (lasera) obsahuje informáciu o tom, ako je optická energia distribuovaná na rôzne vlnové dĺžky. Jedná sa teda o širokú škálu vlnových dĺžok prípadne frekvencií, ktoré sú zvyčajne zobrazované vo forme diagramov. Grafické znázornenie optického spektra často predstavuje len určitý výsek spektra. Podľa požadovaných kritérií je rozumne volené rozpätie vlnových dĺžok okolo strednej hodnoty. Stredná hodnota predstavuje také miesto v optickom spektre, ktoré zodpovedá vlnovej dĺžke, s najväčším množstvom energie. Toto miesto je označované ako "peak". Pre tento peak je charakteristické to, že má normálne respektíve Gaussovské rozloženie.

V laboratórnom reťazci je využívaný Mach-Zehnderov modulátor (MZM), ktorý vykonáva moduláciu vysokofrekvenčného signálu budeného pomocou generátora na optický nosný signál z lasera. MZM obsahuje jeden vstup a jeden výstup. Okrem vstupného a výstupného portu obsahuje aj pin, kvôli privedeniu potrebného predpätia pre nastavenie požadovaného pracovného bodu a pin pre reguláciu vložného útlmu viz. Obrázok 3. Pre určenie vlastností MZM je potrebné zmerať závislosť predpätia a vložného útlmu na výstupnom optickom výkone Mach-Zehnderovho modulátora. Meranie činiteľa prenosu S_{21} je nevyhnutné, kvôli určeniu prenosových vlastností MZM.



Obrázok 3. Horný obrázok po a) zobrazuje obdĺžnikové usporiadanie Mach-Zehnderovho modulátora a spodný obrázok po b) zobrazuje charakteristickú krivku modulátora s významnými bodmi

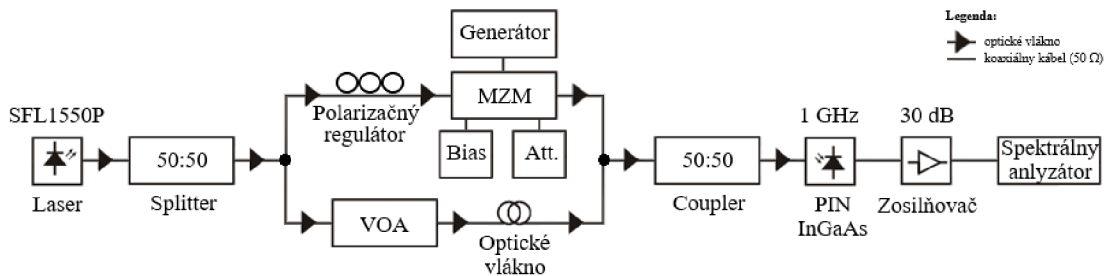
2. Zadanie

1. Stanovte šírku spektrálnej čiary lasera (FWHM).
2. Zmerajte a vypočítajte relatívny intenzitný šum lasera (RIN).
3. Zobrazte optické spektrum laserového signálu pri zmenách budiaceho prúdu lasera.
4. Vypočítajte hodnotu vložného útlmu (IL) na základe zmeraných hodnôt optických výkonov na vstupe a výstupe Mach-Zehnderovho modulátora (MZM).
5. Určte činiteľ prenosu S_{21} a sledujte ako ovplyvňujú zmeny polarizácie optický signál na výstupe MZM.
6. Overte závislosť RF signálu na výstupe MZM na zmenách predpätia U_{Bias} .

3. Pracovní postup

Ad 1:

Pre stanovenie šírky spektrálnej čiary lasera (FWHM – Full Width at Half Maximum) zapojte pracovisko podľa blokovej schémy viz. Obrázok 4. Hodnotu budiaceho prúdu lasera I_B voľte v rozsahu od 60 mA do 100 mA s krokom 10 mA. Na generátore nastavte budiaci vysokofrekvenčný signál MZM na hodnotu $f = 10$ MHz s amplitúdou 15 dBm. Kvôli dosiahnutiu potrebného pracovného bodu MZM nastavte hodnotu predpätia na DC napäťovom zdroji na $U_{Bias} = 5,8$ V. Nezabudnite na spektrálnom analyzátore nastaviť Center Frequency na hodnotu frekvencie nastavenej na generátore! Graficky zobrazte FWHM pre jednotlivé hodnoty budiacich prúdov I_B a výsledne hodnoty zaznamenajte do tabuľky viz. Tabuľka 1.



Obrázok 4. Bloková schéma pre stanovenie šírky spektrálnej čiary lasera

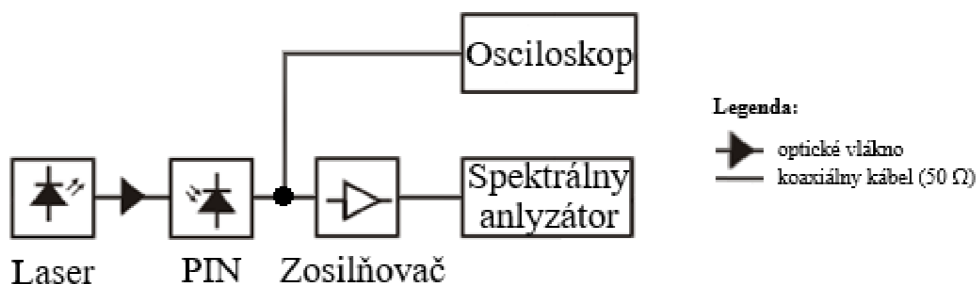
Ad 2:

Pracovisko pre stanovenie relatívneho intenzitného šumu (RIN – Relative Intensity Noise) je znázornené na Obrázku 5. Meranie prevádzajte pre rovnaký rozsah I_B ako v Ad 1. Meranie prevádzajte pre šírku pásma o hodnote $B = 4$ MHz.

1. Stanovte výkon jednosmernej zložky optického signálu P_e . Pomocou osciloskopu zmerajte napätia pre jednotlivé hodnoty budiacich prúdov I_B . Kvôli výpočtu výkonu jednosmernej zložky optického signálu P_e zapojte na vstup osciloskopu záťaž o hodnote 50Ω . Namerané a vypočítané údaje doplňte do tabuľky viz. Tabuľka 2.

2. Pre jednotlivé hodnoty budiacich prúdov I_B zmerajte optický výkon P_o . Laser zapojte priamo do testera optických vlákien s útlmovým článkom, kvôli zníženiu výkonu lasera o hodnote $L = 20$ dB. Vďaka zapojeniu útlmového článku nebude tester optických vlákien v saturácii. Namerané údaje doplňte do tabuľky viz. Tabuľka 3. a pre porovnanie vypočítajte hodnotu P_o pomocou vzorca (1.5).

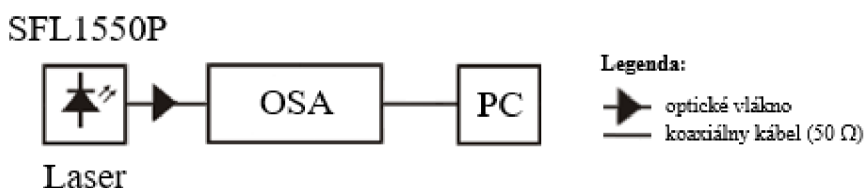
3. Vytvorte graf závislosti parametru RIN na frekvenciách. Pre výpočet parametru RIN využite vzorce (1.1 – 1.4) uvedené v časti teoretické poznatky.



Obrázok 5. Bloková schéma pre meranie RIN

Ad 3:

Na zobrazenie optického spektra využijete optický spektrálny analyzátor (OSA – Optical Spectral Analyzer) a jeho software na zobrazenie spektra. Program pre ovládanie OSA je dostupný na pracovnej ploche počítača umiestneného na pracovisku. Ovládanie programu je intuitívne. Nezabudnite zadať hodnotu vlnovej dĺžky lasera $\lambda = 1550$ nm a opäť voľte hodnotu budiaceho prúdu lasera I_B v rozsahu od 60 mA do 100 mA s krokom 10 mA. Údaje zobrazených priebehov nezabudnite uložiť! Pomocou Excelu vytvorte graf obsahujúci všetky namerané priebehy. Zapojenie pracoviska je znázornené na Obrázku 6. V prípade akýchkoľvek komplikácií sa neváhajte obrátiť na vášho vyučujúceho.



Obrázok 6. Bloková schéma pre meranie optického spektra laserového signálu

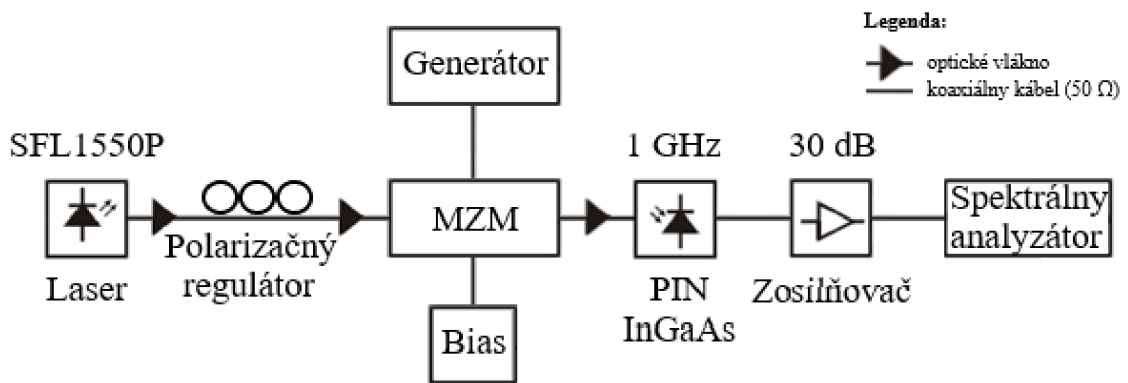
Ad 4:

V prípade určenia hodnoty vložného útlmu (IL – Insertion Loss) postupujte podľa nasledujúcich krokov:

1. Stanovte vstupný optický výkon signálu na MZM. Laser zapojte priamo do testera optických vlákien. Kvôli zníženiu výkonu lasera a kvôli zaisteniu, aby sa laser nedostal do oblasti saturácie, zapojte na tester optických vlákien útlmový článok o hodnote útlmu $L = 10$ dB.
2. Stanovte výstupný optický výkon signálu na MZM. Výstup MZM zapojte do testera optických vlákien a zaznamenajte hodnotu výkonu výstupného optického signálu.
3. Zo získaných hodnôt vypočítajte hodnotu vložného útlmu IL .

Ad 5:

Pracovisko pre určenie činiteľa prenosu S_{21} je znázornené na Obrázok 7. Postup merania je obdobný ako v Ad 1. Na generátore opäť nastavte amplitúdu na hodnotu 15 dBm a hodnoty frekvencií voľte podľa tabuľky viz. Tabuľka 4. Do tabuľky postupne zapisujte namerané hodnoty RF signálu na výstupe MZM zaznamenané na osciloskope. Pri meraní využite kurzor (Marker – Peak). Nezabudnite nastavovať Center Frequency, podľa aktuálnej nastavenej frekvencie na generátore. Výsledky nameraných hodnôt vyneste do grafu. Po zmeraní hodnôt sledujte zmeny optického výkonu na osciloskope vyvolané zmenou pozície pedálov na polarizačnom regulátore. V závere okomentujte vplyv zmien polarizácie na optický výkon.



Obrázok 7. Bloková schéma pre meranie parametru S_{21} , vložného útlmu a biasu

Ad 6:

Pre overenie závislosti RF signálu na výstupe MZM na zmenách predpätia U_{Bias} využite rovnaké zapojenie ako v predchádzajúcom bode Ad 5. Na generátore voľte hodnotu frekvencie $f = 1$ MHz s amplitúdou 15 dBm. Zmerajte charakteristickú krivku MZM, teda závislosť výstupného RF signálu na predpätí U_{Bias} . DC napäťový zdroj zapojte na port Bias. Meranie vykonávajte v rozsahu hodnôt napätia od 0 V do 5,4 V. Namerané hodnoty pomocou spektrálneho analyzátoru zapíšte do tabuľky viz. Tabuľka 5 a vyneste ich do grafu. V závere patrične okomentujte tvar priebehu.

Poznámky:

Počas merania dbajte na bezpečnosť pri práci a vyvarujte sa nebezpečeniu zasiahnutia oka laserovým žiarením !

Pri prepojení optických vlákien používajte rovnaké typy konektorov !

4. Použité prístroje

Na zostavenie laboratórneho reťazca pre meranie parametrov RoF systému sú potrebné tieto zariadenia:

- Laser: Thorlabs SFL1550P, $\lambda = 1550$ nm, $P_0 = 25-40$ mW
- Optické vlákno: SM, GI
- Polarizačný regulátor: Thorlabs, 3 pedály
- Variabilný optický attenuator (VOA)
- DC napäťový zdroj: GW Instek GPD-3303S, 3 kanály, $U = 0-30$ V, $I = 1-3$ A
- Generátor: Agilent N5181A MXG, $f = 100$ kHz-3 GHz
- Splitter/Coupler: Newport F-CPL-F12155, Single-mod, Coupling Ratio 50%/50%
- Mach-Zehnderov modulátor: JDS Uniphase, Single drive-MZM, 10 Gb/s
- Fotodetektor: Thorlabs DC400FC, InGaAs Pin, $\lambda = 800-1700$ nm, $B = DC-1$ GHz
- Predzosilňovač: LNA, $G = 30$ dB, $B = 0,1$ MHz-2 GHz, $U = 9-12$ V
- Osciloskop: Rigol MSO 174, 4 kanály, $B = DC-100$ MHz, 1 GSa/s
- Spektrálny analyzátor: Siglent SSA 3032X, $B = 9$ kHz-3,2 GHz
- Optický spektrálny analyzátor: FT-IR Spectrometer MIR 8025, 50/60 Hz, 1 AMP
- PC
- Tester optických vlákien: EXFO FOT-10A, $\lambda = 780-1550$ nm

| | | | | | | | |
|----|---------|-------|----------|---------|----------|-------|--------|
| ID | Skupina | Dátum | Príprava | Meranie | Výsledky | Záver | Celkom |
| | | | /0,5 | /1,5 | /1 | /1 | /4 |

1.

Tabuľka 1. Tabuľka odčítaných hodnôt FWHM z grafu viz. Obrázok 1.

| Poč. mer. | I_B [A] | FWHM [kHz] |
|-----------|-----------|------------|
| 1 | | |
| 2 | | |
| 3 | | |
| 4 | | |
| 5 | | |

2.

Tabuľka 2. Tabuľka zmeraných a vypočítaných hodnôt DC zložky optického výkonu pri zmenách budiaceho prúdu lasera I_B

| Poč. mer. | I_B [A] | R_L [Ω] | U_{DC} [V] | I_{DC} [A] | P_e [W] | P_e [dBm] | G [dB] | $P_{e_vysledné}$ [dBm] |
|-----------|-----------|--------------------|--------------|--------------|-----------|-------------|----------|-------------------------|
| 1 | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | |

Tabuľka 3. Tabuľka zmeraných a vypočítaných hodnôt P_o pri zmenách I_B

| Poč. mer. | I_B [A] | L [dB] | P_{o_mer} [dBm] | P_{o_mer+L} [dBm] | P_{o_vyp} [W] | P_{o_vyp} [dBm] |
|-----------|-----------|----------|--------------------|----------------------|------------------|--------------------|
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |
| 4 | | | | | | |
| 5 | | | | | | |

4.

$IL =$

5.

Tabuľka 4. Tabuľka nameraných hodnôt optických výkonov $P_{RF_výstup}$ pre jednotlivé frekvencie

| f [MHz] | $P_{RF_výstup}$ [dBm] |
|--------------|---------------------------|
| 0,1 | |
| 0,2 | |
| 0,5 | |
| 1 | |
| 2 | |
| 5 | |
| 10 | |
| 20 | |
| 50 | |
| 100 | |
| 200 | |
| 500 | |
| 1000 | |

6.

Tabuľka 6 Tabuľka zmeraných výkonov RF signálov na výstupe MZM v závislosti od predpätia

| U_{Bias} [V] | $P_{RF_výstup}$ [dBm] |
|-------------------|---------------------------|
| 0,0 | |
| 0,2 | |
| 0,4 | |
| 0,6 | |
| 0,8 | |
| 1,0 | |
| 1,2 | |
| 1,4 | |
| 1,6 | |
| 1,8 | |
| 2,0 | |
| 2,2 | |
| 2,4 | |
| 2,6 | |

| U_{Bias} [V] | $P_{RF_výstup}$ [dBm] |
|-------------------|---------------------------|
| 2,8 | |
| 3,0 | |
| 3,2 | |
| 3,4 | |
| 3,6 | |
| 3,8 | |
| 4,0 | |
| 4,2 | |
| 4,4 | |
| 4,6 | |
| 4,8 | |
| 5,0 | |
| 5,2 | |
| 5,4 | |