

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

ANALÝZA VLÁKNOVÉHO OPTICKÉHO SPOJE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PETR ŠEFARA

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

ANALÝZA VLÁKNOVÉHO OPTICKÉHO SPOJE

OPTICAL FIBER LINK ANALYSIS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PETR ŠEFARA

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JURAJ POLIAK

BRNO 2013



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Petr Šefara

ID: 134626

Ročník: 3

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Analýza vláknového optického spoje

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s koncepcí vláknových optických spojů obecně a zaměřte se detailně na problematiku přenosového prostředí. Podrobně rozeberte jednotlivé jevy, ke kterým dochází při šíření optické vlny vláknem. Navrhněte metodu měření pro výukové účely.

Sestavte laboratorní úlohu pro měření různých jevů ovlivňujících funkci vláknového optického spoje a kvalitativní parametry spoje. Úlohu proměřte a vypracujte vzorový protokol měření.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] WILFERT, O. Optoelektronika. Elektronické skriptum. Brno: FEKT, VUT v Brně, 2008.

[2] MAJUMDAR, A. K., RICKLIN, J. C. Free-Space Laser Communications: Principles And Advances. New York: Springer, 2007.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 31.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Juraj Poliak

Konzultanti bakalářské práce:

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

V této práci jsou shrnuty teoretické poznatky o šíření světla optickým vláknem a o příčinách vzniku parazitních jevů v optickém vlákně a jejich dopadu na přenášený signál. Jsou zde také vysvětleny základní metody pro měření těchto jevů. Dále je proveden návrh laboratorní úlohy pro měření parametrů optického spoje pomocí výukového souboru PROMAX EF-970.

KLÍČOVÁ SLOVA

Optické vlákno, útlum, disperze, PMD, PROMAX EF-970, laboratorní měření

ABSTRACT

This theses report on theoretical findings about spreading light in an optical fiber and about causes of origin parasitic effects in optical fiber and their impact on carried signal. There is also explained basic methods of measuring this effects. In this theses is made concept of laboratory measurment of parameters optical link using tutorial set PROMAX EF-970.

KEYWORDS

Optical Fiber, Attenuation, Dispersion, PMD, PROMAX EF-970, laboratory measuration

ŠEFARA, Petr *Analýza vláknového optického spoje*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2012. 78 s. Vedoucí práce byl Ing. Juraj Poliak

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Analýza vláknového optického spoje“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu semestrální práce panu Ing. Juraji Poliakovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	10
1 Optická vlákna	11
1.1 Dělení optických vláken	11
1.1.1 Mnohomodová vlákna se skokovou změnou indexu lomu	11
1.1.2 Gradientní vlákna s pozvolnou změnou indexu lomu	11
1.1.3 Jednomodová optická vlákna	12
1.2 Princip šíření světla optickým vláknem	12
1.3 Zdroje optického záření	14
1.3.1 Luminiscenční polovodičové diody	14
1.3.2 Laserové diody	15
1.4 Detektory optického záření	16
1.4.1 Fotodiody PIN	17
1.4.2 Lavinové diody	18
1.5 Útlum optických vláken	18
1.5.1 Ohybové ztráty	20
1.6 Disperze	22
1.6.1 Chromatická disperze	22
1.6.2 Vidová disperze	26
1.6.3 Polarizační vidová disperze	26
2 Měření parametrů optických vláken	28
2.1 Úvod	28
2.2 Měření útlumu v OV	28
2.2.1 Metoda dvou délek	28
2.2.2 Metoda vloženého útlumu	29
2.2.3 Metoda zpětného rozptylu	29
2.3 Měření chromatické disperze v OV	31
2.3.1 Měření chromatické disperze metodou fázového posunu	31
2.3.2 Měření chromatické disperze metodou zpožděných impulzů . .	31
2.4 Měření polarizační vidové disperze	32
2.4.1 Interferometrické měření PMD	32
2.4.2 Metoda polarizovaného zpětného rozptylu	33
3 Optický vysílač a přijímač	35
3.1 Optický vysílač	35
3.2 Optický přijímač	40

3.3	Výukový soubor PROMAX EF-970	42
3.3.1	Simulátor chyb	44
4	Realizace laboratorní úlohy	50
4.1	Laboratorní úloha Přenos informace optickým vláknem	50
4.2	Laboratorní úloha Přenos TTL signálu optickým vláknem	51
5	Závěr	53
	Literatura	54
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	56
	Seznam příloh	58
A	Přenos informace optickým vláknem	59
A.1	Vzorový protokol	59
A.2	Datové listy vybraných obvodů	67
B	Přenos TTL signálu optickým vláknem	72
B.1	Vzorový protokol	72

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Princip šíření optického svazku vláknem [5].	13
1.2	Energetický diagram LED.	15
1.3	Princip činnosti fotodiody PIN [6].	17
1.4	Princip činnosti lavinové diody [6].	18
1.5	Útlumová charakteristika optického vlákna [6].	20
1.6	Vliv makroohybu na optický paprsek [6].	21
1.7	Závislost materiálové disperze na vlnové délce [6].	23
1.8	Vlákno s posunutou disperzní charakteristikou [9].	24
1.9	Vlákno s plochou disperzní charakteristikou [9].	24
1.10	Kompenzace chromatické disperze pomocí DCF [6].	25
1.11	Kompenzace chromatické disperze pomocí Braggovské mřížky [6]. . .	25
1.12	Ilustrace Polarizační vidové disperze [6].	26
2.1	Metoda dvou délek [6].	28
2.2	Modifikovaná metoda dvou délek [12].	29
2.3	Metoda zpětného rozptylu - blokové schéma [6].	30
2.4	Měření fázového posunu - blokové schéma [6].	32
2.5	Měření zpožděných impulzů - blokové schéma [6].	32
2.6	Interferometrické měření PMD - blokové schéma [6].	33
2.7	Měření PMD pomocí stupně polarizace - blokové schéma [6].	33
3.1	Blokové schéma optického vysílače	35
3.2	Oboustranný omezovač amplitudy a jeho převodní charakteristika . .	36
3.3	Dvoustupňový předzesilovač [15].	36
3.4	Možné propojení laserové diody a PIN diody	38
3.5	Doporučení zapojení filtru pro budič laserové diody	39
3.6	Příklady vhodného a nevhodného zemnění [22].	39
3.7	Blokové schéma optického přijímače.	40
3.8	Architektura obvodu MAX3744 [19].	41
3.9	Propojení obvodů MAX3744 a MAX3748 [20].	42
3.10	Blokové schéma optického vysílače EF-970B/E.	46
3.11	Blokové schéma optického přijímače EF-970B/R.	49

SEZNAM TABULEK

1.1	Maximální dovolené makro-ohybové ztráty dle ITU-T G.657A a ITU-T G.657B.	21
1.2	Maximální hodnoty koeficientu chromatické disperze dle ITU-T G.695.	23
3.1	Přehled chybových stavů optického vysílače.	45
3.2	Přehled chybových stavů optického přijímače.	48

ÚVOD

Optickému vláknu (OV) patří v moderních telekomunikačních systémech významná role jako nepostradatelnému přenosovému médiu, především díky jeho malému útlumu, schopnosti dosahovat velké přenosové rychlosti a možnosti přenášet velké množství nezávislých signálů, přičemž každému je přiřazena jiná vlnová délka. Další nezanedbatelnými výhodami optického vlákna, které nelze opomenout, je odolnost optického vlákna vůči vnějšímu elektrickému rušení a elektrické oddělení vysílací a přijímací strany systému, což se s výhodou využívá například u sítí vysokého napětí.

I když je princip využití světla pro šíření informací již dlouhou dobu, k aplikaci teorie do praxe nemohlo dlouho dojít kvůli vysokému útlumu. Snížit útlum pod hranici 20 dB/km se podařilo až v roce 1970, kdy americká firma Corning Glass Works (nyní Corning Inc.) oznámila, že se vědcům Robertu D. Maurerovi, Donaldu Keckovi, Peteru C. Schultzovi a Franku Zimarovi podařilo – na základě práce Charlese K. Kaa otištěné v britském časopise *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers* [1], ve které se zabýval vlivem koncentrace nečistot na absorpční a rozptylové vlastnosti optického materiálu, vyvinout vlákno s útlumem 17 dB/km. O několik let později se již vyrábělo vlákno s útlumem pouze 4 dB/km u něhož byl základní příměsí oxid germania.

O významu objevu optických vláken a práce Ch. K. Kaa svědčí i to, že tento vědec v roce 2009 obdržel Nobelovu cenu za fyziku [2].

Další zkvalitňování výroby optických vláken, výzkum v oblasti materiálů používaných pro optická vlákna a objev vláknových zesilovačů, které umožnili lépe využít obrovskou šířku pásma OV, vedlo k tomu, že současná optická vlákna mají útlum menší, než metalické vodiče a dosahují obrovských přenosových rychlostí – v roce 2011 dosáhli dvě skupiny vědců, nezávisle na sobě, s využitím rozdílné technologie rychlosti přes 100 TB/s [3].

Cílem této práce je shrnout teoretické poznatky o optických vláknech a o jevech, které mají vliv na kvalitativní parametry vlákna - útlumu a disperzi - a navrhnout měřící pracoviště pro měření těchto jevů.

V první části dojde k teoretickému rozboru tématu, budou zde rozebrány obvody zdrojů optického signálu, obvody detektorů, dojde k rozboru útlumu a disperze v optickém vlákne a v neposlední řadě bude věnována pozornost měřícím metodám pro měření útlumu a disperze.

V další části bude navrženo laboratorní pracoviště, pro měření výše zmíněných parazitních jevů a dojde k výběru některých klíčových součástek a obvodů.

V poslední části pak dojde ke zhodnocení dosažených výsledků a porovnání změřených výsledků s teoretickými poznatky.

1 OPTICKÁ VLÁKNA

V této kapitole budou popsány druhy optických vláken, zdroje a detektory optického záření a podrobně budou vysvětleny parazitní jevy, ke kterým ve vlákně dochází - útlum a disperze.

1.1 Dělení optických vláken

Optická vlákna můžeme dělit podle mnoha parametrů, jako například podle příměsí v jádře vlákna, podle tloušťky jádra či celého vlákna, podle způsobu provedení atd. Jedním z nejběžnějších způsobů dělení optických vláken je však dělení podle změny indexu lomu a podle způsobu provozu na vlákna:

- Mnohomodová se skokovou změnou indexu lomu
- Gradientní s pozvolnou změnou indexu lomu
- Jednomodová

1.1.1 Mnohomodová vlákna se skokovou změnou indexu lomu

Index lomu těchto vláken na rozhraní jádro plášť se mění skokově. Průměr jádra těchto vláken je mnohokrát větší než je tomu u vláken jednomodových, takže mohou přenášet velké množství módů. Tyto vlákna jsou používána na krátkých trasách (například mezi místnostmi či mezi sousedními budovami). Při použití těchto vláken na dlouhých trasách se u nich projevuje vliv disperze (podrobněji viz část věnující se útlumu a disperzi v optickém vlákně) a navíc jejich útlum je vyšší, než útlum vlákna jednomodového. Výhodou těchto vláken je nižší výrobní cena, snazší navazování paprsku do vlákna (tyto vlákna mají vyšší numerickou aperturu – $NA=0,3$) díky čemuž můžeme používat levnější zdroje záření (luminiscenční polovodičové diody).

1.1.2 Gradientní vlákna s pozvolnou změnou indexu lomu

U těchto vláken dochází ke snížení vlivu disperze ve vlákně tak, že index lomu se na rozhraní jádro plášť mění pozvolna tak, aby vidy, šířící se ve vlákně po nejkratší dráze měly nižší přenosovou rychlost, než vidy šířící se po delší dráze – paprsek se tak šíří vláknem po sinusoidě. V kombinaci se snížením počtu vidů, které se ve vlákně mohou šířit, dochází k výrazné redukci disperze, řádově až desetkrát. Tyto vlákna mohou pracovat s paprsky o vyšších vlnových délkách, než je tomu u mnohamodových vláken se skokovou změnou indexu lomu a díky tomu je koeficient útlumu podstatně

menší ($\alpha=0.5$ dB/km při $\lambda=1310$ nm; $\alpha=0.25$ dB/km při $\lambda=1550$ nm). Tyto vlákna našla využití především v aplikacích LAN - Local Area Network [4].

1.1.3 Jednomodová optická vlákna

Jednomodové vlákno je ve své podstatě gradientní vlákno s pozvolnou změnou indexu lomu, které pracuje v režimu tzv. jednomodovosti, což znamená, že se vláknem šíří pouze jeden optický paprsek. Tím odstraníme vliv disperze ve vlákně a přenos ve vlákně bude ovlivňován pouze útlumem, jehož hodnota je přirozeně stejná, jako u gradientních vláken. Tyto vlákna našla uplatnění v dálkových telekomunikačních spojích, protože jsme jimi schopni přenášet data velkou rychlostí na velké vzdálenosti. Nevýhoda tohoto typu vlákna přichází se zmenšením průměru jádra – paprsek se hůře navazuje do jádra ($NA=0.055$) a potřebujeme tedy přesnější a dražší zdroje záření.

1.2 Princip šíření světla optickým vláknem

Optické vlákno si můžeme představit jako tenkou dielektrickou trubičku, vyrobenou z křemičitého skla, která je dotována příměsemi, abychom docílili změnu indexu lomu. První optická vlákna byla dotována oxidem germánia (GeO_2) u moderních vláken se používá oxidu hlinitého (Al_2O_3). Než přistoupíme k popisu principu šíření světla ve vlákně, musíme zadefinovat několik pojmů, které budeme dále používat:

Index lomu: Index lomu je bezrozměrná veličina popisující schopnost šíření elektromagnetické vlny – světla – ve zkoumaném materiálu. V matematickém vyjádření se index lomu definuje jako podíl rychlosti světla ve vakuu ku rychlosti světla v daném materiálu.

$$n = \frac{c}{v}. \quad (1.1)$$

Snellův zákon: Snellův zákon je základním nástrojem pro popis vlnění, které přechází lomem z jednoho prostředí do druhého. Uvažujeme-li dvě různá prostředí, s indexy lomu n_1 a n_2 , na jejichž rozhraní se lomí paprsek, pak můžeme úhel paprsku dopadajícího označit α_1 a úhel paprsku lomeného α_2 a podle Snellova zákona můžeme psát:

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2. \quad (1.2)$$

Ze Snellova zákona plyne, že paprsek se může lomit dvěma způsoby: ke kolmici – pokud se paprsek lomí z prostředí s nižším indexem lomu do prostředí s vyšším indexem lomu – a nebo od kolmice – pokud se paprsek lomí z prostředí s vyšším indexem lomu do prostředí s nižším indexem lomu.

Totální odraz: Totální odraz je zvláštním případem lomu od kolmice, kdy se paprsek lomí pod úhlem 90° , což znamená, že paprsek se vůbec nedostane do prostředí s indexem lomu n_2 , ale zůstává v prostředí s indexem lomu n_1 .

Konstanta šíření: Konstanta šíření určuje vidy, které lze vést vláknem. Můžeme určit dvě krajní hodnoty konstanty šíření, při kterých se ještě vid optickým vláknem šíří:

$$\beta_{min} = \frac{2\pi n_2}{c}, \quad (1.3)$$

$$\beta_{max} = \frac{2\pi n_1}{c}. \quad (1.4)$$

Z těchto dvou okrajových podmínek můžeme psát, že pro vidy, které se vláknem šíří platí:

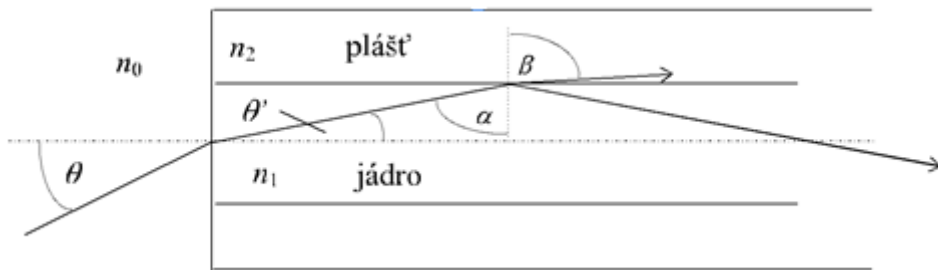
$$\frac{2\pi}{\lambda} n_2 \leq \beta \leq \frac{2\pi}{\lambda} n_1 \quad (1.5)$$

Nyní můžeme přikročit k principu šíření světla ve vlákně: Optický svazek dopadá z prostředí (nejčastěji vzduch) s indexem lomu n_0 na čelo vlákna, resp. jádra s indexem lomu n_1 . Paprsek tak přechází z opticky řidšího prostředí (=prostředí s nižším indexem lomu) do opticky hustšího a láme se ke kolmici. Podle Snellova zákona můžeme psát:

$$\frac{\sin\theta}{\sin\theta'} = \frac{n_1}{n_0}. \quad (1.6)$$

K dalšímu lomu dochází uvnitř vlákna. Zde potřebujeme, aby došlo k totálnímu odrazu a paprsek se lomil zpět do jádra. Opět platí:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (1.7)$$



Obr. 1.1: Princip šíření optického svazku vláknem [5].

Při totálním odrazu bude $\beta = \frac{\pi}{2}$ a úhel $\sin\beta = 1$. Maximální úhel, při kterém ještě dojde k totálnímu odrazu – α_m – můžeme vyjádřit jako:

$$\sin\alpha_m = \cos\theta'_m = \frac{n_2}{n_1}. \quad (1.8)$$

Pro maximální úhel, pod kterým musí paprsek vstupovat do vlákna z vnějšího prostředí platí:

$$\sin \Theta_m = \frac{n_1}{n_0} \sin \Theta'_m = \frac{n_1}{n_0} \sqrt{1 - \cos^2 \Theta'_m} = \frac{n_1}{n_0} \sqrt{1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}} \approx (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} \approx (2n_1 \Delta)^{\frac{1}{2}}, \quad (1.9)$$

kde Δ je rozdíl v indexu lomu jádra a pláště – $\Delta = n_1 - n_2$ – a Θ_m je takzvaný aperturní (příjmový) úhel vlákna. Veličina $\sin \Theta_m$ se definuje jako numerická apertura (NA) optického vlákna, která určuje schopnost vlákna navázat optický svazek do jádra [5].

1.3 Zdroje optického záření

Zdroje optického záření – generátory – mají za úkol převést elektrický signál na signál optický a navázat jej do vlákna. Teoreticky sice lze použít jakýkoliv světelný zdroj, například žárovku, nicméně moderní světelný zdroj pro optická vlákna musí splňovat určité požadavky, které na něj klademe:

- Co největší účinnost
- Úzká vyzářovací charakteristika zdroje
- Generace záření na určitých vlnových délkách, pro které mají současná optická vlákna nejmenší útlum
- Vysoká spolehlivost, stálost parametrů a nízká cena

Jako zdroje světelného záření se používají převážně polovodičové lasery (LD – Laser Diode) a LED

1.3.1 Luminiscenční polovodičové diody

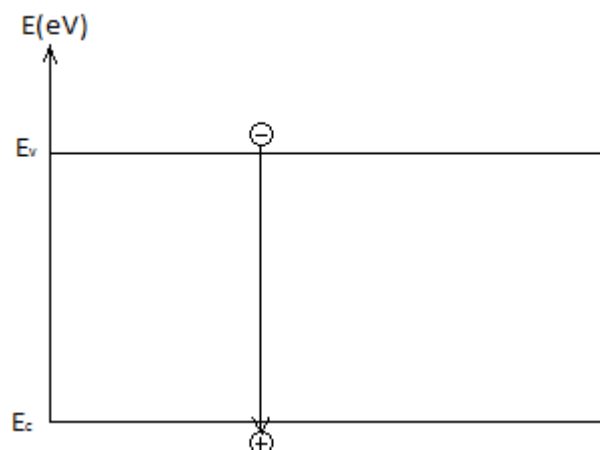
Luminiscenční polovodičová dioda (LED – Light Emitting Diode) je polovodičová součástka s jedním P-N přechodem polarizovaným v propustném směru. Průchodem proud dochází na hranici P-N přechodu k injekci minoritních nosičů náboje a vzniku energie, díky níž se v aktivní oblasti vytváří pár elektron-díra. Elektronů se nacházejí ve vodivostním pásu E_v a díry ve valenčním pásu E_c .

Při rekombinaci se do okolí vyzáří energie, která je dána rozdílem energií energetických pásů:

$$\Delta E = E_v - E_c. \quad (1.10)$$

Mezi vyzářovanou energií a frekvencí platí vztah:

$$\Delta E = hf, \quad (1.11)$$



Obr. 1.2: Energetický diagram LED.

kde h je Planckova konstanta ($h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Ws}^2$). Pro frekvenci vztah:

$$f = \frac{c}{\lambda}, \quad (1.12)$$

kde c je rychlost světla ve vakuu ($c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$). Dosazením a úpravou můžeme obdržet vztah pro vlnovou délku světla vyzařovaného danou strukturou:

$$\lambda = \frac{1,242}{\Delta E}. \quad (1.13)$$

Jestliže známe rozdíl energetických hladin materiálu, který použijeme pro výrobu LED, můžeme určit vlnovou délku světla, kterou bude emitovat. Například pro gálium-marsenit, který má energetický rozdíl $\Delta E = 1,4 \text{ eV}$ nám vyjde vlnová délka $0,89 \mu\text{m}$. Změnu vlnové délky můžeme ovlivňovat příměsemi do základního materiálu [6].

Náběžná hrana světelného impulsu u běžně používaných diod je velmi krátká, běžně několik ns. Tohoto dosáhneme nahrazením P-N přechodu heteropřechodem, který vznikne spojením dvou různých polovodičů.

Výhodami LED je cenová dostupnost a dlouhá životnost, v porovnání s LD však vyzařují menší výkon a mají větší spektrální šířku, dalším omezením je široký vyzařovací diagram, takže tyto zdroje nejsou použitelné pro jednomodová vlákna.

1.3.2 Laserové diody

Laserové diody jsou oproti LED zdrojem koherentního záření s užší šířkou spektra. Jejich funkce je založena na principu stimulované emise, která je vyvolána interakcí P-N přechodu (přesněji řečeno dvojitého heteropřechodu) s přítomným elektromagnetickým polem. Touto interakcí je dosaženo koherentnosti záření, které v oblasti tohoto přechodu vzniká.

Aby ke stimulované emisi došlo a vznikající světlo bylo zesilováno, musí být v excitovaném stavu (tj. ve vyšší energetické hladině než je hladina základní) více atomů než v základním stavu, nebo-li rychlost emisních přechodů W_{emise} musí být větší než rychlost absorpce W_{absorbce} :

$$W_{\text{emise}} \sim \int n_c(W) F_c(W) n_v(W - hv) [1 - F_v(W - hv)] dW. \quad (1.14)$$

$$W_{\text{absorbce}} \sim \int n_v(W - hv) F_v(W - hv) n_c(W) [1 - F_c(W)] dW, \quad (1.15)$$

kde F_c a F_v jsou Fermiho-Diracovy rozdělovací funkce:

$$F_c(W) = \frac{1}{1 + \exp \frac{W - W_{F_c}}{kT}}. \quad (1.16)$$

$$F_v(W - hv) = \frac{1}{1 + \exp \frac{(W - hv) - W_{F_v}}{kT}}, \quad (1.17)$$

kde $h\nu$ je energie emitovaných fotonů, n_c , n_v jsou hustoty stavů ve valenčním a vodivostním, W_{F_c} a W_{F_v} jsou zdánlivé Fermiho hladiny platné pro vodivostní a valenční pás [6].

Aby došlo k zesílení světla, musí platit podmínka:

$$W_{F_c} - W_{F_v} > hv. \quad (1.18)$$

Tato podmínka však neplatí pro generaci světla, k tomu je třeba zavést kladnou zpětnou vazbu, čehož se dosahuje pomocí speciálních rezonátorů umístěných do struktury PN přechodu.

Na vyzařovaný výkon LD má vliv proud, kterým je dioda buzena – do určité hodnoty proudu dochází pouze ke spontánní emisi – vyzařované světlo je nekoherentní a výstupní výkon je velmi malý. Při překročení hodnoty prahového proudu – jehož hodnota se pohybuje zhruba od 30 mA do 250 mA – dochází ke stimulované emisi a výkon diody prudce roste. Prahový proud je teplotně závislý – s rostoucí teplotou roste hodnota prahového proudu.

Laserové diody jsou schopny generovat záření všech vlnových délek, které se v praxi používají (od 0,85 μm do 1,55 μm) a díky úzké šířce směrové charakteristiky umožňují lepší navázání světla do vlákna – laserové diody jsou mnohem efektivnější než LED. Nevýhodou těchto zdrojů záření je jejich vyšší cena.

1.4 Detektory optického záření

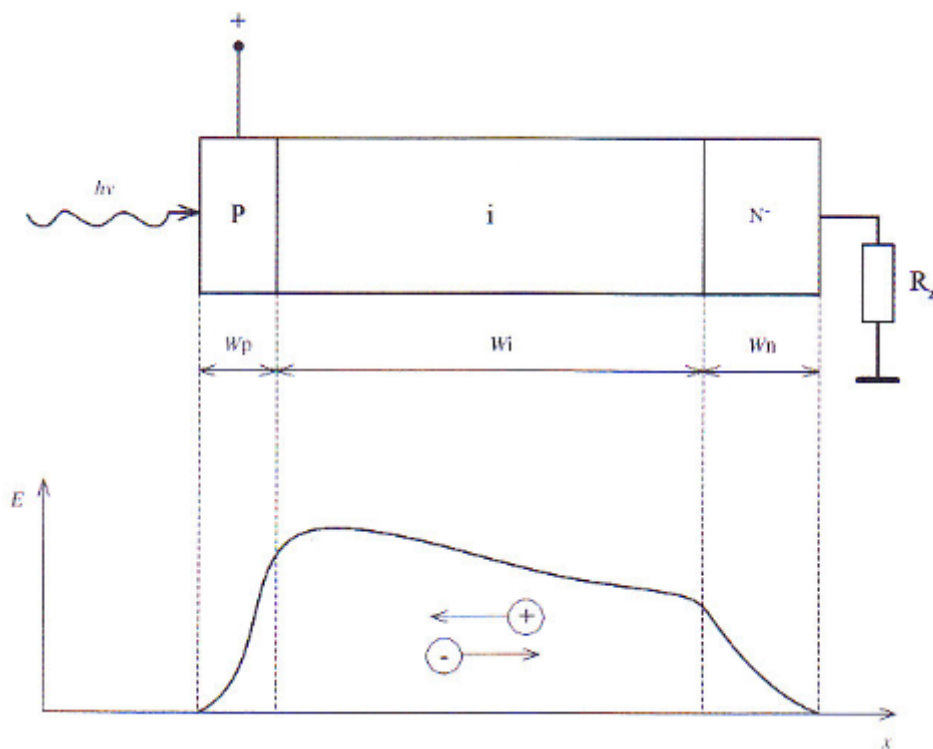
Úkolem detektorů je přeměnit optický signál z vláken na signál elektrický. Kvalitní detektor záření musí - stejně jako zdroj záření – splňovat určitá kvalitativní kritéria:

- Vysoká citlivost v oblasti běžně používaných vlnových délek
- Rychlá odezva
- Malý vlastní šum

Jako detektory se používají polovodičové součástky s P-N přechodem, nejčastěji fotodiody PIN a lavinové diody APD (Avalanche Photodiode)

1.4.1 Fotodiody PIN

Zatím obyčejná fotodioda má klasický přechod P-N upravený tak, aby na něj dopadalo světlo, fotodioda PIN se skládá ze tří vrstev – ze silně obohacených vrstev P a N, mezi kterými je ochuzená (intrinsická) vrstva i. Vznikají tak dva přechody – P-i a N-i. Páry elektron-díra mohou vznikat ve všech třech oblastech. Vlivem závěrného napětí, kterým je dioda polarizovaná, difundují (v oblasti i) elektrony k N oblasti, díry k oblasti P. Elektrony vzniklé v P oblasti difundují nejprve do oblasti i a dále potom k oblasti N. Díry vzniklé v N oblasti se chovají stejně.

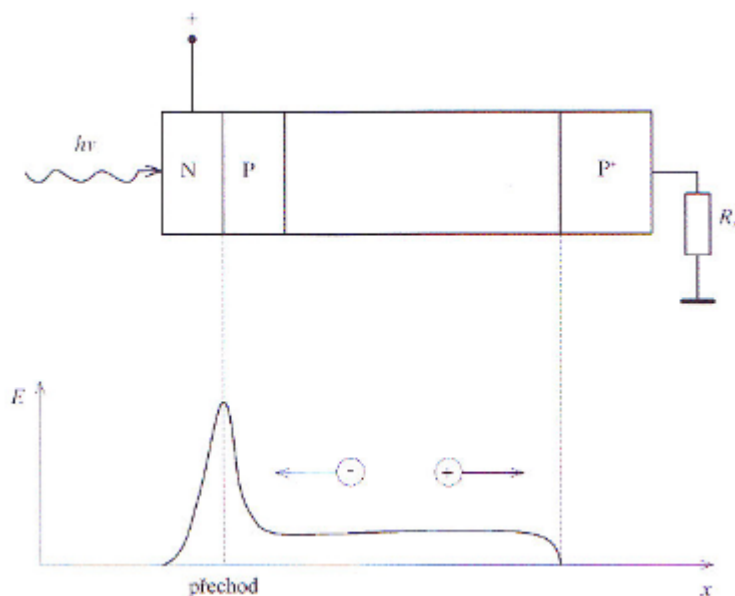


Obr. 1.3: Princip činnosti fotodiody PIN [6].

PIN diody mohou být vyrobeny buďto z křemíku nebo germánia. Pokud to aplikace dovoluje, je vhodné použít diody křemíkové, které mají menší tepelnou závislost a nižší proud za tmy.

1.4.2 Lavinové diody

U lavinových diod opět dochází k procesu legování a to tak, aby v oblasti přechodu dosáhla intenzita elektrického pole co nejvyšší hodnoty. Při dopadu světla vznikne pár elektron-díra, který je silným elektrickým polem urychlen až do takové rychlosti, která stačí ke generaci nového páru elektron-díra vlivem srážky s krystalickou mřížkou. Tento nový pár je opět urychlen a opět dochází ke vzniku dalšího páru. Tímto způsobem dochází k lavinovému jevu a tím k nárůstu nosičů náboje.



Obr. 1.4: Princip činnosti lavinové diody [6].

Doba potřebná k vytvoření laviny je v řádu pikosekund, takže se tyto diody hodí pro širokopásmovou detekci optických signálů.

1.5 Útlum optických vláken

Útlum v optických vláknech představuje výkonové ztráty, čili pokles přijatého světelného výkonu na konci vlákna oproti výkonu, který do vlákna navazujeme na jeho začátku. Tyto ztráty jsou dány souhrnem nepříznivých jevů, ke kterým ve vláknech dochází – především Rayleighův rozptyl, ztráty absorbcí a ztráty vyzařováním.

Rayleighův rozptyl je způsoben nehomogenitami a nečistotami v materiálu jádra vlákna, které jsou rozměrově malé oproti vlnové délce procházejícího světelného paprsku. Tento jev je neodstranitelný, lze pouze snížit jeho vliv posunem pracovní frekvence do IR oblasti. Ze vztahu popisující Rayleighův rozptyl vidíme, že je přímo úměrný osmé mocnině indexu lomu a nepřímo úměrný čtvrté mocnině vlnové délky procházejícího paprsku.

$$\gamma = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} n^8 p^2 \beta_c k T_F. \quad (1.19)$$

Ztráty absorbcí souvisí s přeměnou části energie ve vlákně na teplo vlivem rezonance iontů OH, jejichž rezonanční kmitočet první harmonické sice odpovídá vlnové délce mimo pracovní oblast využívanou pro optický přenos, ale druhá (1,38 μm) a třetí (0,94 μm) harmonická již spadají do využívané oblasti. Je proto nezbytné zajistit při výrobě optického vlákna minimální koncentraci nežádoucích nečistot - především zmíněných iontů OH a iontů kovů.

Ke ztrátám vyzařováním dochází na rozhraní jádro-plášť, kdy vlivem rozdílných vlastností každého z prostředí dochází při lomu šířících se paprsků k pronikání části energie ven z jádra.

Pro praktickou představu o hodnotě útlumu v daném vlákně slouží koeficient útlumu α [dB.km⁻¹]. Koeficient útlumu lze určit podle vztahu:

$$\alpha(\lambda) = \frac{-1}{l} 10 \log \frac{P_2}{P_1}, \quad (1.20)$$

kde l je délka vlákna, P_2 je výkon na konci vlákna a P_1 je výkon na začátku vlákna.

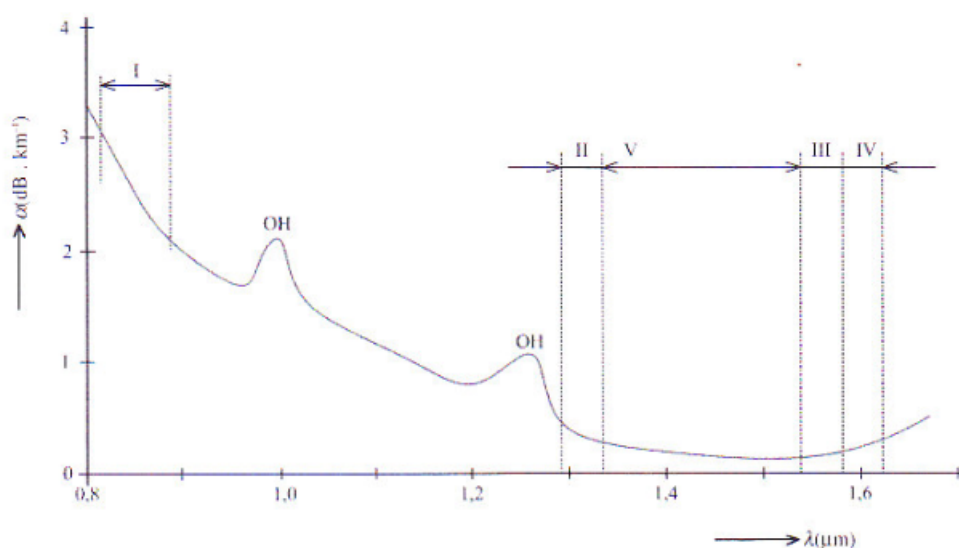
Koeficient útlumu je veličina závislá na vlnové délce, na obrázku 1.5 je zobrazen jeho průběh. Z tohoto obrázku je také patrné rozdělení celé šíře používaných vlnových délek na tzv. okna.

První okno, s vlnovou délkou kolem 850nm, je kvůli vysoké hodnotě koeficientu útlumu prakticky nepoužitelné pro přenos na delší trasy, v tomto okně však lze použít levné zdroje záření jako jsou LED.

Druhé okno - $\lambda = 1280 \div 1335$ nm - s útlumem pod 0,35 dB.km⁻¹ je používané pro přenosy na střední vzdálenosti. Používá se zde jednovidový přenos s využitím vlákna s průměrem 9 μm/125 μm.

Ve třetím okně využíváme vlnových délek 1530 až 1565 nm. Nachází se zde minimum měrného útlumu standardního křemenného vlákna. Hodnota měrného útlumu se pohybuje v rozmezí 0,19 ÷ 0,22 dB.km⁻¹. Využití tohoto okna je především pro přenos na velké vzdálenosti.

Čtvrté okno, ležící na vlnových délkách 1565 až 1625 nm, se příliš neliší od okna třetího. Hodnota jeho měrného útlumu sice leží za minimem, ale díky moderním optickým zesilovačům se tento rozdíl stírá a lze třetí a čtvrté okno spojit a účinně tak navýšit přenosovou kapacitu.



Obr. 1.5: Útlumová charakteristika optického vlákna [6].

Páté okno o vlnových délkách 1335 až 1530 nm bylo dlouho nedostupné z důvodu lokálního maxima útlumu na vlnové délce $\lambda = 1380 \text{ nm}$, které bylo způsobeno vysokou koncentrací příměsí OH. Teprve od konce 90.let pokročila technologie výroby optických vláken natolik, že se toto maximum podařilo eliminovat. Nyní můžeme spojit druhé až páté okno a vytvořit tak přenosový kanál o šířce pásma až 50 THz.

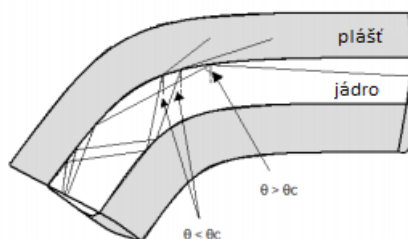
1.5.1 Ohybové ztráty

Kromě výše uvedených faktorů, které ovlivňují ztráty v optických vláknech, se na celkovém útlumu vláken nezanedbatelně podílejí i faktory související s montáží optické trasy, především pak ztráty způsobené ohyby. Tyto ohyby můžeme rozdělit podle poloměru jejich zakřivení na mikroohyby, u nichž je poměr zakřivení srovnatelný s vlnovou délkou světla, které se šíří vláknem, a makroohyby, u nichž je poloměr ohybu nesrovnatelně větší oproti vlnové délce.

Velikost vložených ztrát mikroohyby je závislá na vlnové délce - s rostoucí vlnovou délkou rostou i ztráty. Mikroohyby se většinou objevují po celé délce vlákna a k jejich vzniku dochází jednak při samotné výrobě vlákna, jednak vlivem působení okolních jevů při pokládání optické trasy. Výskyt mikroohybů je náhodný a lze je zkoumat pouze pomocí statistických metod.

Makroohyby vznikají zcela běžně při práci s optickými vlákny. Útlum, který vzniká v důsledku vyvázání části energie optického paprsku pryč z vlákna, jak je ilustrováno na Obr. 1.6, je v tomto případě závislý na poloměru ohybu a platí, že

čím menší tento poloměr bude, vlákno bude více „zlomeno“, tím větší bude hodnota útlumu.



Obr. 1.6: Vliv makroohybu na optický paprsek [6].

U vláken lze definovat tzv. kritický poloměr ohybu - tj. poloměr ohybu, při kterém dojde ke ztrátě 100% energie. Pro mnohovidové vlákno platí

$$R_c \cong \frac{3n_1^2 \lambda}{4\pi \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)^2}}. \quad (1.21)$$

Pro jednovidová vlákna pak platí poněkud odlišný vztah

$$R_c \cong \frac{20\lambda}{\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}} \frac{1}{2,748 - 0,996 \frac{\lambda}{\lambda_c}}. \quad (1.22)$$

Jelikož je jasné, že se při montáži optické trasy makroohybům nedokážeme vyhnout, existují typy optických vláken, která jsou vůči makroohybům do jisté míry odolná. Jejich parametry můžeme najít v doporučení ITU-T G.657A a ITU-T G.657B, přehled parametrů některých vybraných vláken je v Tab. 1.1.

Tab. 1.1: Maximální dovolené makro-ohybové ztráty dle ITU-T G.657A a ITU-T G.657B.

Specifikace	A2	B2	B2	B3	B3	B3
Poloměr ohybu [mm]	15		10		7,5	5
Počet závitů	10		1	10	1	1
Maximální útlum pro $\lambda = 1550 \text{ nm}$ [dB]	0,03	0,03	0,1	0,03	0,8	0,15
Maximální útlum pro $\lambda = 1625 \text{ nm}$ [dB]	0,1	0,1	0,2	0,1	0,25	0,45

1.6 Disperze

Disperze je zásadním parazitním jevem, který nepříznivě ovlivňuje přenosovou rychlost signálu vláknem. Můžeme ji definovat jako rozdíl šířky pulzu v polovině jeho délky na konci vlákna a na jeho začátku. Disperze rozeznáváme tři základní druhy - chromatická, vidovou a polarizační.

1.6.1 Chromatická disperze

Chromatická disperze se nejvíce projevuje u jednovidových vláken. Chromatickou disperzi lze dále rozdělit na disperzi materiálovou a vlnovodnou.

Protože světlo se skládá z paprsků různých vlnových délek, a protože index lomu je kmitočtově závislý, budou se různé paprsky šířit různou rychlostí. Tento jev označujeme jako materiálová disperze a můžeme ho matematicky popsat jako:

$$\Delta t_{mat} = t_{s1} - t_{s2} = (t_s + \frac{dt_s}{d\lambda}) - t_s = \frac{dt_s}{d\lambda} \Delta\lambda, \quad (1.23)$$

kde t_s je skupinové zpoždění:

$$t_s = \frac{1}{v_s} = \frac{n_s}{c} = (n - \lambda \frac{dn}{d\lambda}) \frac{1}{c}, \quad (1.24)$$

dosazením vzorce pro skupinové zpoždění do vzorce 1.18 a jeho úpravou obdržíme výsledný vztah pro materiálovou disperzi:

$$\Delta t_{mat} = \frac{\lambda \Delta\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2}. \quad (1.25)$$

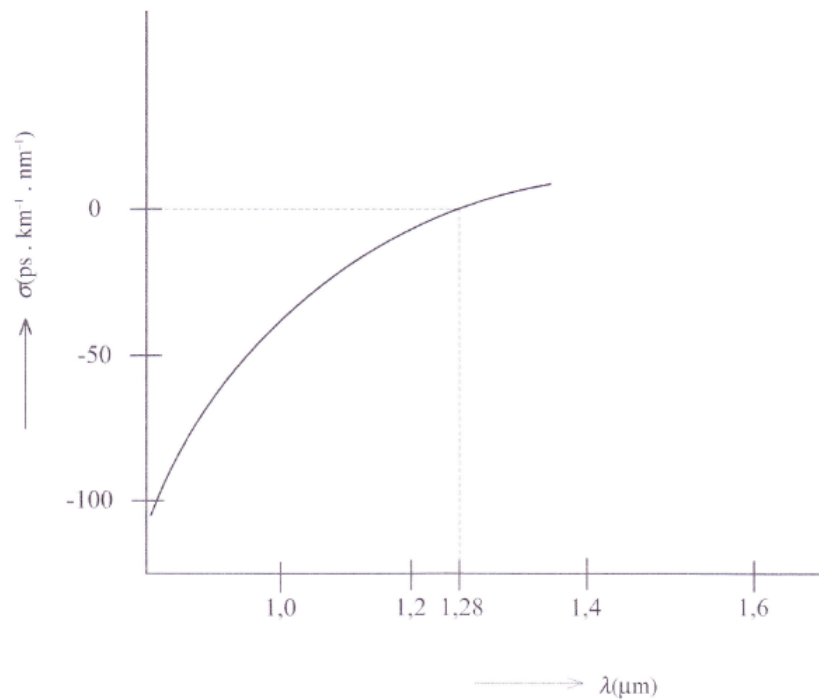
Z předchozího vztahu je patrné, že průběh materiálové disperze je závislý na vlnové délce. Typický průběh závislosti materiálové disperze na vlnové délce pro materiál SiO_2 je na obrázku 6. Vidíme, že pro vlnovou délku $\lambda = 1,28 \mu\text{m}$ je materiálová disperze nulová. Při dopování kysličníku křemičitého jiným materiálem lze měnit vlnovou délku, při které je materiálová disperze nulová [6].

Vlnovodná disperze se projevuje, stejně jako disperze materiálová, změnou šířky pulzu na výstupu optického vlákna oproti šířce pulzu na jeho vstupu. Vlnovodnou disperzi způsobuje různá hodnota konstanty šíření pro každý vid, který se šíří vláknem. Změna konstanty šíření má pak za následek změnu rychlosti šíření vidu vláknem. Míru vlnovodné disperze popisujeme koeficientem vlnovodné disperze D_{vln} :

$$D_{vln} = c_0 f t_{s1} \Delta \frac{dT_s}{df}. \quad (1.26)$$

Celková chromatická disperze je vyjádřena koeficientem chromatické disperze, který je definován:

$$D_{chr} = c_0 f \frac{dt_s}{df}. \quad (1.27)$$



Obr. 1.7: Závislost materiálové disperze na vlnové délce [6].

Maximální hodnoty tohoto koeficientu jsou normovány ITU a lze je najít v doporučení ITU-T G.695 - viz Tab.1.1 [7].

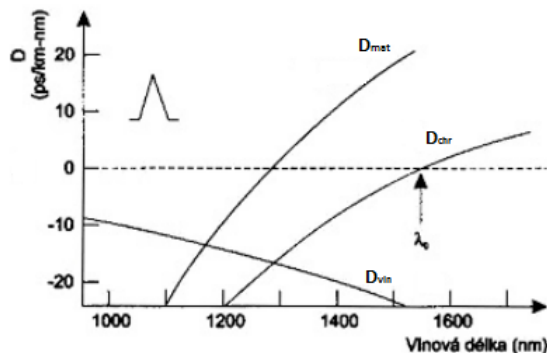
Tab. 1.2: Maximální hodnoty koeficientu chromatické disperze dle ITU-T G.695.

Vlnová délka [nm]	Koeficient chromatické disperze $D_{\text{chr}} [\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}]$
1291-1351	5.7
1311-1371	6.8
1391-1451	11.5
1531-1591	19.9
1471-1611	21.1

Chromatickou disperzi můžeme částečně eliminovat upravením profilu indexu lomu jádra (přesněji řečeno změnou profilu indexu lomu ovlivňujeme vlnovodnou disperzi). V takovém případě mluvíme o „vláknech s posunutou disperzí“ (Dispersion Shifted Fiber - DSF) nebo o „vláknech s plochou disperzní charakteristikou“ (Dispersion Flattened Fiber - DFF).

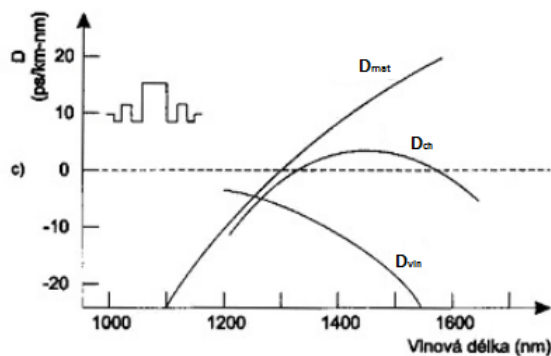
Vlákno s posunutou disperzní charakteristikou je znázorněno na Obr. 7. Je zda zakreslen průběh nejen celkové chromatické disperze D_{chr} , ale i jednotlivých jejích

složek D_{mat} a D_{vln} , je zde také zakreslen profil indexu lomu. Vidíme, že nulová hodnota chromatické disperze je na vlnové délce zhruba 1550 nm. Tato vlnová délka tak spadá do pátého okna, kde je také nejnižší koeficient útlumu α .



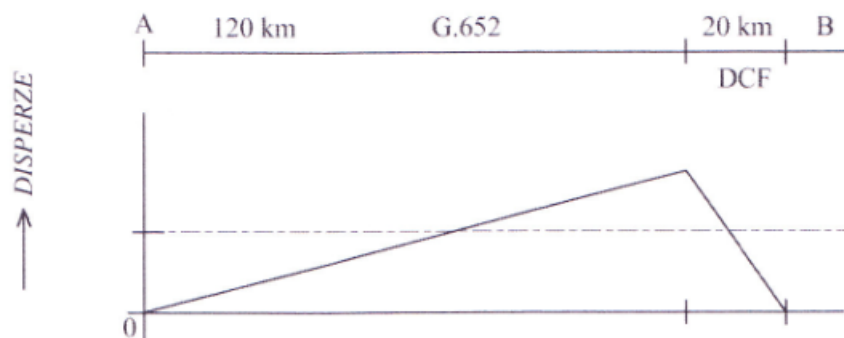
Obr. 1.8: Vlákn s posunutou disperzní charakteristikou [9].

Vlákna s plochou disperzní charakteristikou jsou vlákna, jejichž hodnota chromatické disperze je v malém pásmu vlnových délek velmi nízká. Ačkoliv se tato skutečnost jeví jako výhodná, bylo zjištěno, že chromatická disperze kromě svých negativních vlastností, také snižuje efekt některých nežádoucích jevů jako například čtyřvlnné směšování (Four-Wave Mixing - FWM). Proto jsou tato vlákna jen málo používána.



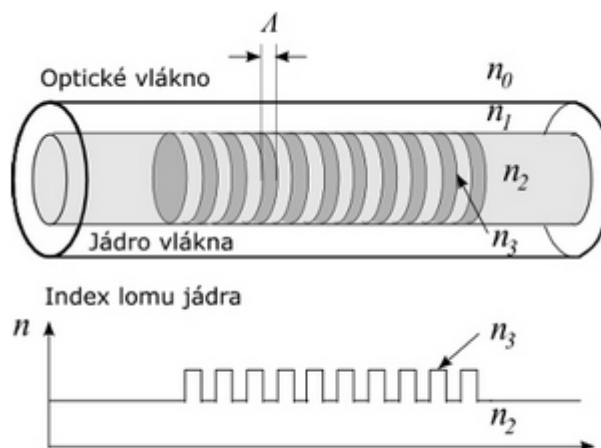
Obr. 1.9: Vlákn s plochou disperzní charakteristikou [9].

Jiný způsob kompenzace chromatické disperze je použití speciálního vlákna (Dispersion Compensation Fibre - DCF) s velkou zápornou hodnotou koeficientu chromatické disperze D_{chr} . Délka těchto kompenzačních vláken je asi 1/6 délky celkové trasy. Nevýhodou této kompenzace je nárůst útlumu optické trasy a poměrně velká velikost tohoto kompenzátoru.



Obr. 1.10: Kompenzace chromatické disperze pomocí DCF [6].

Další možností, jak chromatickou disperzi kompenzovat, je použití Braggovské mřížky. Mřížka je realizována jako reflektor v krátkém úseku optického vedení, v němž se pravidelně mění index lomu, díky čemuž některé vlnové délky propouští a jiné odráží. Různé vlnové délky se odráží v různých místech mřížky - „pomalejší“ vlnové délky se odráží blíže a „rychlejší“ vlnové délky dále. Díky tomu je spektrum výstupního pulzu z mřížky užší, než spektrum, které do mřížky vstupují. Nevýhodou je, že tato kompenzace je poměrně úzkopásmová - jen několik nm - i když dnes už existují i kompenzátory s Braggovskou mřížkou pro šířku pásma až 35 nm. [6, 8 - 10]



Obr. 1.11: Kompenzace chromatické disperze pomocí Braggovské mřížky [6].

1.6.2 Vidová disperze

Vidová disperze se nepříznivě projevuje především u mnohavidových vláken se skokovou změnou indexu lomu. Vysvětlení vidové disperze je možné na základě šíření světla ve vlákně z pohledu geometrické optiky - viz kapitola 1.2. Čím větší bude úhel Θ - úhel mezi paprskem a osou optického vlákna - tím delší bude dráha paprsku mezi vstup a výstupem vlákna a tím nižší bude jeho podélná rychlost. Proto se vyšší vidy, které jsou blíže meznímu kmitočtu, šíří pomaleji, než nižší vidy. Matematicky můžeme vidovou disperzi popsat jako:

$$\Delta t_{vid} = \frac{t_s}{\cos\Theta} - t_s = t_s \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right) = \frac{n_s}{c_0} \Delta. \quad (1.28)$$

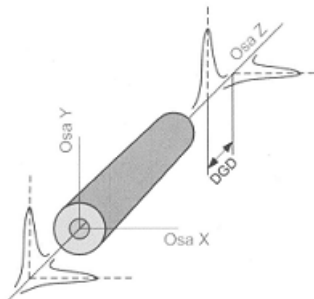
U vláken s gradientní změnou indexu lomu, kde je vidová disperze nižší pak platí:

$$\Delta t_{vid} = \frac{n(0)}{c_0} \left(\frac{1 - \Delta}{\sqrt{1 - 2\Delta}} - 1 \right). \quad (1.29)$$

1.6.3 Polarizační vidová disperze

Polarizační vidová disperze - PMD - je jev, který se s rostoucí bitovou rychlostí stává stále důležitějším i přes to, že její hodnota je z pravidla nižší, než hodnota chromatické disperze. Je to především proto, že velikost PMD je závislá na mnoha faktorech, jako např. výrobní proces OV, jakost montáže optické trasy či teplotní změny.

Jev PMD nejlépe ilustruje Obr.12. Světelný paprsek, šířící se vláknem, je rozdělen na dvě osy. Vertikální - nebo také „pomalou“ - osu Y a horizontální - „rychlou“ - osu X. Vlivem výše uvedených faktorů dochází k většímu či menšímu časovému zpoždění mezi těmito osami. Vlivem toho může dojít k rozšíření impulzu a dochází tak ke zhoršení odstupu signál/šum a v případě bitového přenosu k mezi-bitové interferenci [11].



Obr. 1.12: Ilustrace Polarizační vidové disperze [6].

PMD je udávána v ps.km^{-1} a lze ji vyjádřit

$$PMD = \frac{\Delta\tau}{l}, \quad (1.30)$$

kde $\Delta\tau$ je zpoždění mezi osami X a Y, někdy bývá též označováno jako DGD - Differential Group Delay - a l je délka optické trasy. Uvedený vzorec platí jen pro vlákna, která mají délku výrazně menší ve srovnání s korelační délkou, tedy pro vlákna s délkou asi 10 km.

U delších vláken nenarůstá hodnota PMD lineárně, jako u vláken krátkých, ale narůstá s odmocninou vzdálenosti

$$PMD = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{l}}. \quad (1.31)$$

2 MĚŘENÍ PARAMETRŮ OPTICKÝCH VLÁKEN

2.1 Úvod

Měření parazitních jevů, které se v optickém vlákně vyskytují je velmi důležité pro posouzení kvality optického spoje. Každá měřicí metoda by měla být co nejpřesnější, opakovatelná a samotné měření by mělo být jednoduché. Některé měřicí metody budou představeny v následující kapitole. Pozornost bude věnována měření útlumu a chromatické a polarizační vidové disperze.

2.2 Měření útlumu v OV

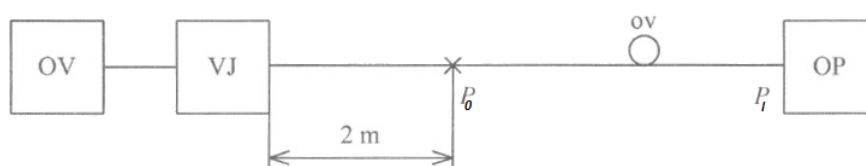
2.2.1 Metoda dvou délek

První metodou pro měření útlumu v optických vláknech je metoda dvou délek. Metoda je ve své základní konfiguraci destruktivní, neboť spočívá nejprve ve změření optického výkonu na konci celé délky vlákna, který označíme P_1 a poté vlákno zlomíme v vzdálenosti $l \approx 2$ m a změříme výkon P_0 . Celkový útlum vlákna je vyjádřen

$$\alpha = \frac{10}{l} \log\left(\frac{P_0}{P_1}\right), \quad (2.1)$$

kde l je celková délka měřeného vlákna.

Metodu ilustruje obrázek 2.1. OZ je optický zdroj, VJ je vysílací jednotka, OV znamená optické vlákno a zkratka OP reprezentuje optický přijímač.



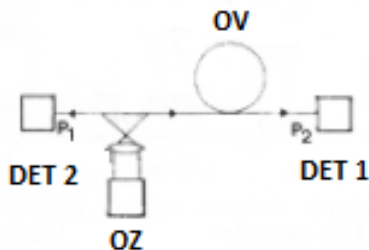
Obr. 2.1: Metoda dvou délek [6].

Výhodou metody je velká přesnost - $0,01 \div 0,04$ dB - a dynamický rozsah asi 20-35 dB. Nevýhodou je destrukce optického vlákna, ke které dochází.

Měřicí metodu lze upravit tak, aby při měření nedošlo k destrukci měřeného vlákna. Oproti předchozímu zapojení potřebujeme dvě optická vlákna, kde délka jednoho vlákna je výrazně kratší než druhého, a dva detektory. Optický paprsek ze zdroje je navázán do obou vláken a detektory indikují výkony P_1 a P_2 . Měřené

vlákno tak není při měření zničeno, oproti předchozímu zapojení však potřebujeme dva detektory. Celkový útlum je dán vztahem

$$\alpha = 10 \log\left(\frac{P_1}{P_2}\right). \quad (2.2)$$



Obr. 2.2: Modifikovaná metoda dvou délek [12].

2.2.2 Metoda vloženého útlumu

Tato metoda je na rozdíl od metody dvou délek nedestruktivní metodou. Měření opět provádíme dvě. Nejprve připojíme měřicí přístroj přímo ke zdroji optického paprsku a změříme výkon P_0 , čímž měřicí soupravu zkalibrujeme. Poté ke zdroji připojíme měřené vlákno a změříme výkon na konci vlákna P_1 . Celkový útlum se spočte stejně jako u předchozí mety, tedy dle vzorce 2.1 [13].

2.2.3 Metoda zpětného rozptylu

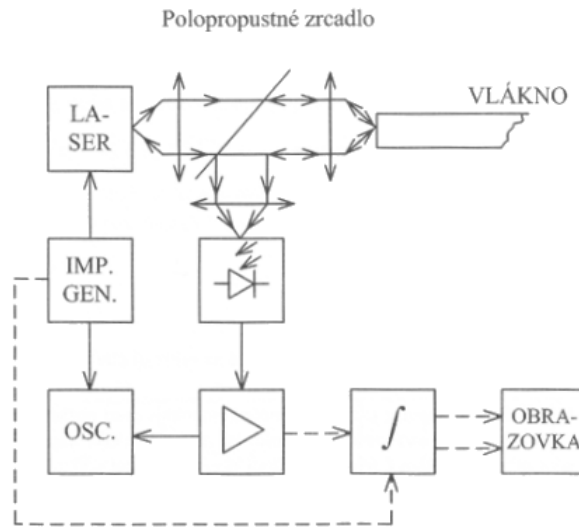
Metoda zpětného rozptylu je založena na měření zpětného odraženého výkonu pomocí impulzního reflektoměru. Tato metoda je opět nedestruktivní a s její pomocí jsme schopni určit nejen celkový útlum, ale také získáme představu o kvalitě měřeného vlákna jako takového, neboť pomocí této metody získáme představu o výskytu geometrických a jiných vad ve vlákne, jejich poloze a délce vlákna.

Poněkud nevýhodné je, že neměříme přímo útlum, jako je tomu u předchozích metod, ale dopočítává se z obdržené hodnoty odraženého výkonu a časového zpoždění mezi vyslaným a obdržným impulzem. Metoda je také vhodná pro delší vlákna, například pro již položené optické trasy, u vláken o délce několika málo metrů není vhodné metodu zpětného rozptylu aplikovat.

Principiálně měřicí systém funguje tak, že do vlákna vyšleme impuls o počátečním výkonu P_0 a měříme odražený - či rozptýlený - výkon $P_R(t)$. Kromě odraženého

výkonu nás také zajímá časové zpoždění mezi dobou vyslání impulzu, jehož hodnota je důležitá pro určení celkového útlumu.

Blokové schéma celkového zapojení je na Obr. 2.3. Impulz z generátoru (o šířce okolo 10 ns) je převeden pomocí laserové diody na optický signál, který je následně navázán do optického vlákna. Odražený signál je přiveden pomocí polopropustného zrcadla na fotodetektor, ve kterém je převeden odražený světelný signál na signál elektrický, který je zesílen a vstupuje do výpočetní jednotky s grafickým výstupem, která umožňuje vyhodnocení měření.



Obr. 2.3: Metoda zpětného rozptylu - blokové schéma [6].

Při samotném měření vlákna, ve kterém se vyskytuje porucha, musíme nejprve určit odražený výkon

$$P_R(t) = \frac{Rk}{2\alpha(l)} P_0, \quad (2.3)$$

kde P_0 je vstupní výkon, R je odrazivost plochy, k jsou ztráty způsobené samotným optickým systémem, $2\alpha(l)$ je průměr ztrát v přímém a zpětném směru.

Odrazivost plochy závisí na indexu lomu n_1 a indexu lomu okolí n_2

$$R = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2}. \quad (2.4)$$

Vzdálenost l k poruše pak určíme ze vztahu

$$l = \frac{tc}{2n_1} \pm \frac{\Delta tc}{2n_1}, \quad (2.5)$$

kde Δt je rozšíření impulzu vlivem disperze, c je rychlost světla, t je rozdíl mezi dobou vyslání impulzu a přijmutím impulzu odraženého.

Celkový útlum vlákna o délce $l_1 - l_2$ se spočte ze vztahu [6]

$$\alpha = \frac{l \ n \ P_2 - l \ n \ P_1}{2(l_1 - l_2)}. \quad (2.6)$$

2.3 Měření chromatické disperze v OV

V předchozí kapitole byl vysvětlen jev disperze a její vliv na optický signál. Nyní budou představeny metody pro měření chromatické disperze a polarizační vidové disperze. V případě chromatické disperze je přesné měření díky narůstajícím přenosovým rychlostem stále důležitější, neboť se začínají projevovat různé dosud zanedbávané jevy okolí mající na hodnotu chromatické disperze vliv, jako například okolní teplota. Díky těmto do jisté míry náhodným jevům je důležité chromatickou disperzi přesně měřit.

V kapitole 1.6 bylo vysvětleno, že chromatická disperze se projevuje roztažením šířky pulzu na přijímací straně oproti šířce toho pulzu na straně vysílací. Toto zpoždění lze měřit buďto z hlediska změny fáze a nebo přímo v časové oblasti.

2.3.1 Měření chromatické disperze metodou fázového posunu

Tato metoda byla představena již v roce 1982 v [14] a jak vyplývá již ze samotného názvu, měříme fázi signálu na výstupu oproti fázi na vstupu vlákna. Pro měření potřebujeme modulovaný zdroj optického signálu, který signál vysílá na více vlnových délkách, dále pak na každém konci měřeného optického vlákna musí být monochromátor a za monochromátorem na konci vlákna je přijímač signálu, do kterého současně přivádí ještě referenční signál přímo z optického zdroje.

Průchodem optického paprsku vláknem se mění fáze signálu v závislosti na skupinové rychlosti

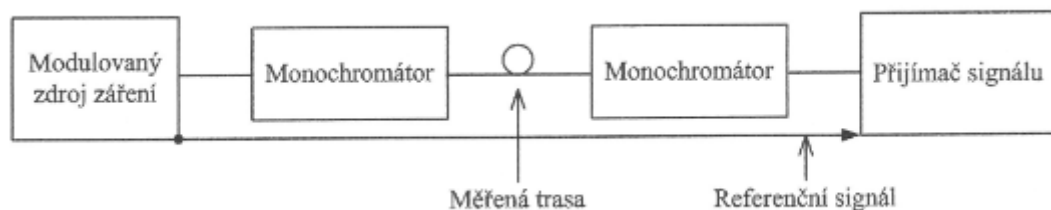
$$\varphi = 2\pi f_0 \tau_g(\lambda) = 2\pi f_0 \frac{l}{v_g(\lambda)}, \quad (2.7)$$

kde f_0 je modulační frekvence, l je délka vlákna $v_g(\lambda)$ je skupinová rychlost závislá na vlnové délce.

Jako zdroj světla můžeme použít buďto LED nebo sadu laserových diod. Jako přijímač a současně měřicí přístroj lze použít přesný vektorový voltmetr.

2.3.2 Měření chromatické disperze metodou zpožděných impulzů

Zapojení měřícího obvodu je velmi podobné předešlé metodě měření fázového zpoždění, jen s tím rozdílem, že odpadá potřeba referenčního signálu ze zdroje záření a místo

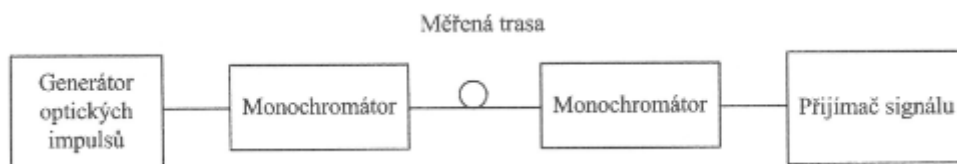


Obr. 2.4: Měření fázového posunu - blokové schéma [6].

modulovaného zdroje záření potřebujeme generátor optických impulsů.

Přesný sled impulsů na vstupu do měřeného vlákna zajišťuje monochromátor, kterým je soustava Braggových mřížek (viz str.25). Od každé mřížky se odráží určitá vlnová délka, čímž vzniká sled impulsů různých vlnových délek s časovým odstupem určeným odstupem jednotlivých Braggových mřížek.

Porovnáním rozestupů mezi impulzy na vstupu do optického vlákna a rozestupy na konci vlákna získáme vyšetřovanou hodnotu chromatické disperze.



Obr. 2.5: Měření zpožděných impulsů - blokové schéma [6].

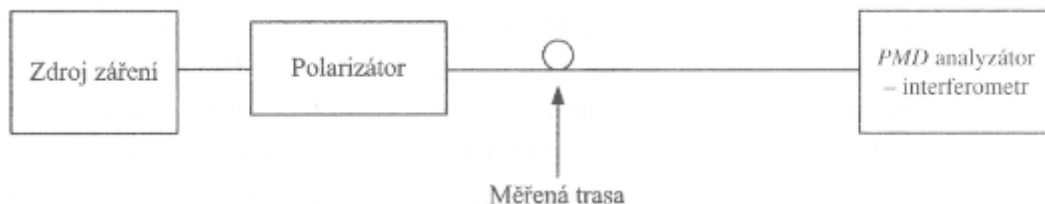
2.4 Měření polarizační vidové disperze

Přesné měření polarizační vidové disperze je důležité, neboť díky mnoha faktorů, které mohou hodnotu PMD, je měření jediný spolehlivý způsob, jak zjistit její hodnotu a vyhodnotit, ve kterých úsecích optického vlákna je nutné z hlediska snižování celkové hodnoty PMD provést změnu.

2.4.1 Interferometrické měření PMD

Při této měřicí metodě je na konci vlákna umístěn interferometr, který zajišťuje rozdělení optického paprsku do dvou větví, na jejichž koncích jsou umístěny zrcadla. Zatímco jedno zrcadlo je pevné, druhé zrcadlo se natáčí, čímž se mění fáze mezi větvemi. Díky interferenci, čili skládání vln, jsme na detektoru schopni zobrazit

zpoždění způsobené PMD - výsledkem metody jsou dva průběhy na sebe kolmých rovin, jejichž autokorelací získáme hledanou hodnotu o PMD.



Obr. 2.6: Interferometrické měření PMD - blokové schéma [6].

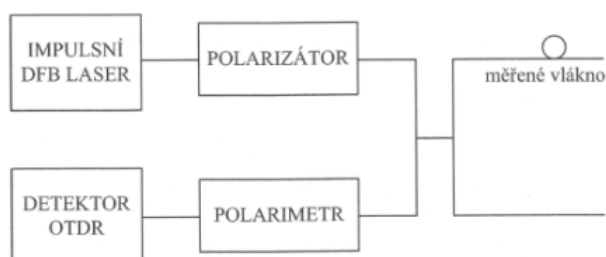
2.4.2 Metoda polarizovaného zpětného rozptylu

Tato metoda pracuje na podobném principu jako metoda měření útlumu metodou zpětného rozptylu. Hlavním rozdílem je, že nyní vyhodnocujeme reflektogram polarizovaně. Tato metoda je vhodná pro dlouhá vlákna a nabízí nám komplexní pohled na optickou trasu a průběh PMD, avšak vyhodnocení obdržných výsledků je poněkud obtížnější, neboť obdržíme několik křivek, z nichž každá má při určování průběhu PMD svůj význam.

Princip metody je tedy ten, že přivedeme do vlákna skupinu impulzů a z jejich zpětného rozptylu, který je opět způsoben Rayleighovým rozptylem, určit hodnotu PMD, která je dána vztahem

$$PMD = \beta\sqrt{lh}, \quad (2.8)$$

kde β je velikost dvojlomu, l je délka vlákna a h je vazební délka.



Obr. 2.7: Měření PMD pomocí stupně polarizace - blokové schéma [6].

Velikost dvojlomu ve vláknech je důležitá, protože má zásadní vliv na celkovou hodnotu PMD. V praxi lze říci, že čím menší hodnota dvojlomu, tím menší bude

hodnota PMD, protože velikost dvojlomu ovlivňuje stupeň polarizace. Pro analýzu je důležitá nejen velikost stupně polarizace, ale i rychlost jeho změn.

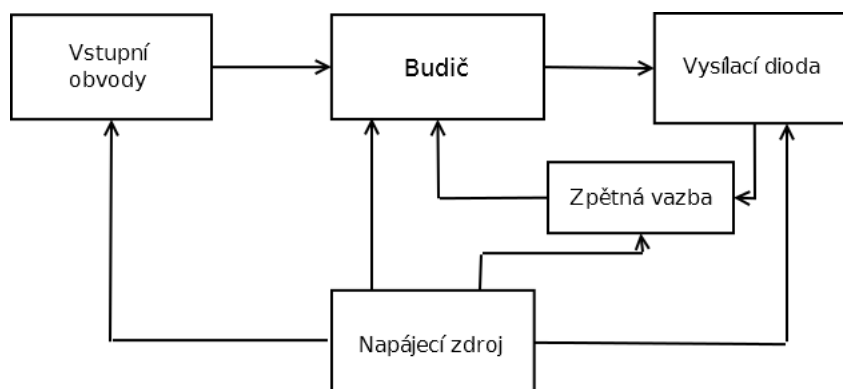
3 OPTICKÝ VYSÍLAČ A PŘIJÍMAČ

V předchozích dvou kapitolách byly ve stručnosti shrnuty teoretické poznatky o optických vláknech a jevech, které mají přímý dopad na přenášený signál. Následující kapitola je věnována návrhu optického vysílače a přijímače, které potřebuje, pokud máme realizovat buď přenos signálu nebo uskutečnit laboratorní měření parametrů optického spoje.

Před samotnou konstrukcí optického vysílače a přijímače musí být jasné, pro jakou aplikaci budou použity. U vysílače pro komunikační systém bude rozhodující přenosová rychlost a vlastní šумы ve vysílači. Naopak při konstrukci zařízení pro specifická laboratorní měření bude rozhodující například maximální kmitočet, který je vysílač či přijímač schopen zpracovat nebo konstrukční provedení konektorů pro připojení optických vláken.

3.1 Optický vysílač

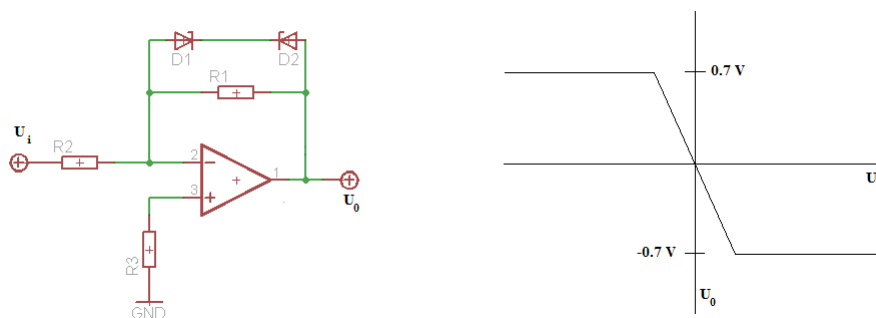
Optický vysílač se blokově skládá ze vstupních obvodů, budiče, vysílací diody, napájecího zdroje a případných dalších pomocných obvodů. Toto schéma je znázorněno na Obr. 3.1 a jednotlivé bloky budou dále vysvětleny.



Obr. 3.1: Blokové schéma optického vysílače

Vstupní obvody

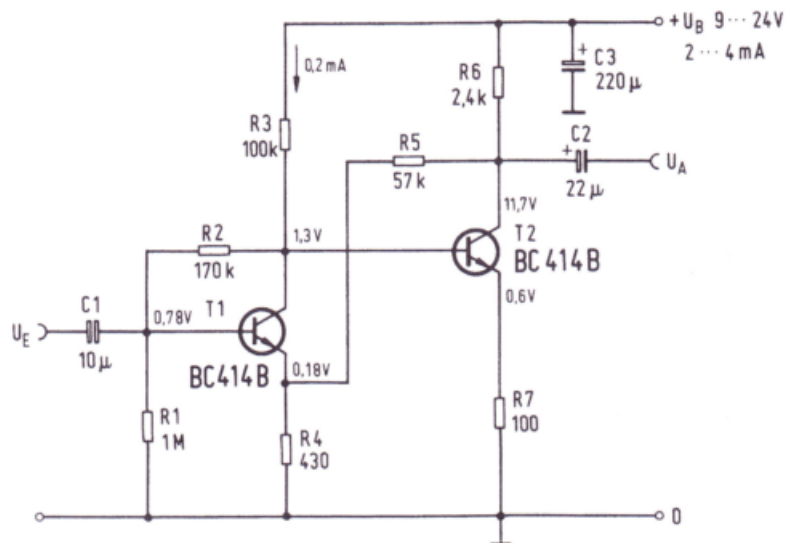
Vstupní obvody mají obecně za úkol upravit signál na požadovanou velikost a tvar pro následující budič. Omezení amplitudy příliš velkých signálů, které by mohly mít nežádoucí vliv na funkci budiče lze realizovat jednostranným nebo lépe oboustranným omezovačem amplitudy. Omezovače můžeme realizovat pomocí Zenerových diod zapojených tzv. „proti sobě“.



Obr. 3.2: Oboustranný omezovač amplitudy a jeho převodní charakteristika

Napětí, na které omezovač „ořeže“ amplitudu vstupního - zennerova napětí - signálu je podle zapojení na obrázku 3.2 asi $\pm 0,7 \text{ V}$. Pokud bychom potřebovali hodnotu tohoto napětí zvýšit, musíme k diodám připojit navíc ještě zdroj předpětí, kterým hodnotu zennerova napětí zvýšíme.

Při rozšíření vysílače o vstup pro mikrofon musíme do vstupních obvodů zařadit mikrofonní zesilovač, který je specifický tím, že musí zpracovat signály o velmi malé amplitudě - až desetiny milivoltů - a zesílit je na hodnoty typicky 1-100 mV.



Obr. 3.3: Dvoustupňový předzesilovač [15].

Takovýto mikrofonní předzesilovač je nakreslen na obrázku 3.3. Tranzistory v zapojení musí být použity nízkošumové a pro redukci nelineárního zkreslení je zde navíc zavedena záporná zpětná vazba z kolektoru tranzistoru T2 na emitor

tranzistoru T1 [15].

Kromě konstrukce s tranzistory jsou možné i konstrukční řešení využívající nízkošumových integrovaných obvodů, lze použít například obvod TL071.

U mikrofonního předzesilovače je důležité dbát na co nejnižší úroveň šumu, neboť vzhledem k nízké úrovni zpracovávaných signálů dochází snadno ke snížení odstupu signál/šum například vinou pronikání brumu z napájecího zdroje.

Mezi další vstupní obvody může patřit například indikace přebuzení vstupu, tedy situace, kdy omezovač začíná omezovat amplitudu vstupního signálu, čímž dochází ke zkreslení přenášeného signálu a na přijímací straně tak může dojít k chybnému příjmu.

Budič

Úkolem budiče (někdy také označovaného jako driver) je dodat dostatečný budicí proud pro zdroj světla - např. laserovou diodu. Budič lze realizovat některým ze známých zapojení využívající tranzistory, například diferenční zapojení tranzistorů nebo Darlingtonovo zapojení. Druhou možností realizace jsou moderní integrované obvody, velkou nabídku těchto obvodů lze najít například v nabídce firmy Maxim Integrated. V nabídce této firmy lze najít budiče pro LED (MAX3967A) i pro laserové diody (např. MAX3738).

Výhodou při použití integrovaných obvodů je především to, že odpadá potřeba navrhovat pomocné obvody jako je kompenzace teplotních vlivů, kontrola a regulace hodnoty výstupního proudu a další.

Příkladem konkrétních parametrů integrovaného budiče pro laserovou diodu může být výrobcem zveřejněný datasheet zmiňovaného obvodu MAX3738 [16]. Tento obvod umožňuje přenosovou rychlost od 155 Mbps do 4,25 Gbps, je schopen pracovat v provozních teplotách od -40°C do $+85^{\circ}\text{C}$, dodává modulační proud až 85 mA, je vybaven kontrolou klidového i modulačního proudu a teplotní kompenzací.

Parametry budičů LED jsou podobné, firma Maxim Integrated nabízí budič MAX3967A, což je budič určený pro přenosovou rychlost 270 Mbps, dle datasheetu může obvod dodat modulační proud při pokojové teplotě až 140 mA [17].

Zdroj záření

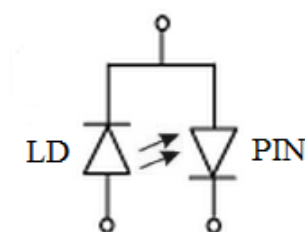
Jako zdroj záření můžeme použít laserovou diodu (LD) nebo LED. Dle zvoleného zdroje záření pak vybereme vhodný budič.

Při použití LD je nutné zajistit teplotní kompenzaci, neboť při změnách teploty dochází ke změnám hodnoty prahového proudu I_p , při kterém přechází LD do režimu stimulované emise. Hodnota prahového proudu vzrůstá s rostoucí teplotou.

Pro dosažení požadované teplotní stability se zavádí zpětná vazba - označovaná jako APC (Automatic Power Control). Jak již bylo v části o budičích uvedeno, integrované budiče mají určený vývod, na který se tato zpětná vazba přivádí a pomocí odporů se zvolí požadovaná teplotní stabilita. Např. pro obvod MAX3738 se

zpětná vazba připojuje na vývod ve schématu označeném jako „MD“ a dle hodnoty modulačního proudu je dosažitelná stabilita $\pm 125 - 600 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ [16].

Pro monitorování okamžitého optického výkonu LD se využívá skutečnosti, že laserová dioda nezáří pouze v přímém směru, ale malá část výkonu, asi 10 % je vyzářeno za čip LD. Co nejblíže zadní straně čipu laserové diody tak bývá umístěna monitorovací fotodioda, nejčastěji PIN. Díky tomuto uspořádání je možné regulovat napájecí proud laserové diody a zajistit tak konstantní optický výkon. Možné propojení laserové diody a monitorovací fotodiody je ilustrováno na Obr. 3.4.



Obr. 3.4: Možné propojení laserové diody a PIN diody

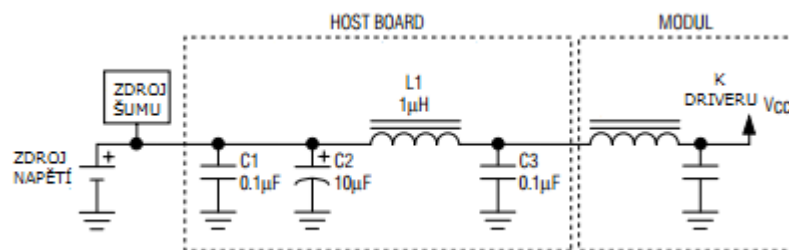
Napájecí zdroj

Otázka napájení je při snaze o konstrukci kvalitního (nejen) optického vysílače nezanedbatelnou částí návrhu. Napájecí zdroje mohou být často zdrojem rušení a to buď síťového o frekvenci 50 či 60 Hz nebo, v případě spínaných zdrojů, mohou být zdrojem vysokofrekvenčního rušení o kmitočtu až desítek kilohertzů. Při návrhu zdrojů tedy musíme věnovat také dostatečnou pozornost dodržení základních pravidel elektromagnetické kompatibility.

V případě výše naznačeného vysílače, který obsahuje mikrofonní předzesilovač, integrovaný budič a laserovou diodu budeme potřebovat různé napájecí zdroje.

Zdroj pro předzesilovač potřebuje pro svou činnost napájecí napětí 9 až 24 V. Je-li předzesilovač z hlediska dosažení co nejvyššího odstupu signál/šum klíčovým prvkem, napájecí zdroj tohoto předzesilovače musí být důkladně odstíněn a musí být zabráněno pronikání jakéhokoliv rušení do obvodu.

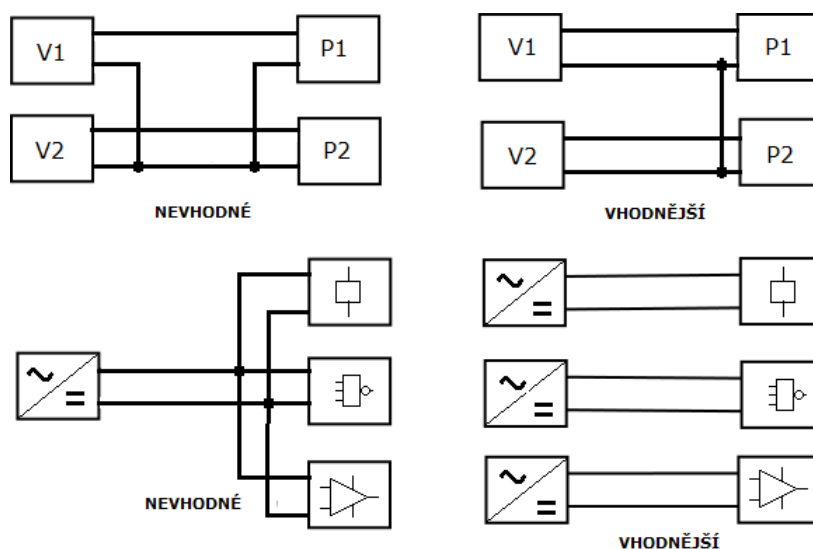
Obvody budiče zdroje záření vyžadují napájení typicky 3,3 V, proud se liší dle použitého zdroje záření, budič pro LED vyžaduje proud 30 mA, výše zmíněný obvod pro buzení LD má odběr o něco vyšší, asi 47 mA. V datasheetu obvodu MAX3738 [16] lze najít doporučené zapojení filtru, který je zapojen mezi napájecí zdroj a samotný obvod, jak je ukázáno na obr. 3.5.



Obr. 3.5: Doporučení zapojení filtru pro budič laserové diody

Zdroje světla - ať už LD nebo LED - vyžadují pro svůj provoz proudový zdroj, který dodává konstantní proud i při změnách zatěžovací impedance. Pokud budeme napájet diodu z napětového zdroje, musíme do série s touto diodou zařadit rezistor, který omezuje protékající proud a současně nastavuje klidový pracovní bod.

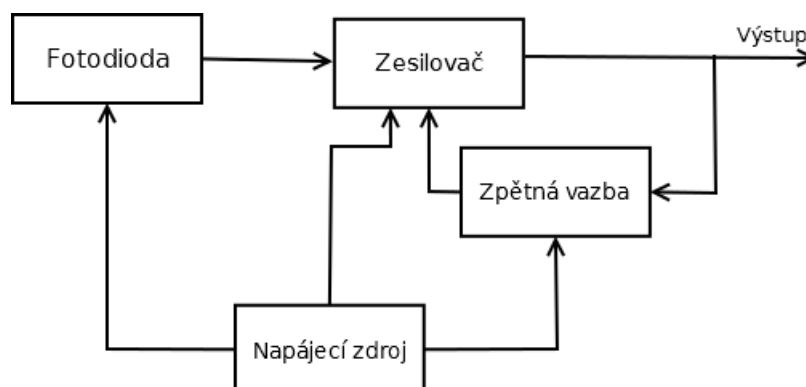
Při konečné konstrukci a propojování jednotlivých bloků a desek do celku je důležité dbát na správné zemnění celého systému, neboť v opačném případě by mohlo vznikat rušení způsobené galvanickou vazbou (vazbou společnou impedancí). V případě zemnění systému ve více bodech dochází ke vzniku rušivého napětí U_r , způsobené existencí bludných zemních proudů. Způsoby vhodného zemnění jsou naznačeny na obr. 3.6 [18].



Obr. 3.6: Příklady vhodného a nevhodného zemnění [22].

3.2 Optický přijímač

Optický přijímač má za úkol přijmout světelný signál z optického vlákna nebo volného prostoru, přeměnit optický signál na signál elektrický, následně jej zesílit a předat dalším obvodům, které tento signál zpracovávají.



Obr. 3.7: Blokové schéma optického přijímače.

Blokově lze optický přijímač popsat podle Obr. 3.7. Navíc může být doplněn dalšími obvody dle charakteru signálu, který má přijímač zpracovávat - např. demodulátor v případě příjmu modulovaného signálu nebo koncový audio zesilovač při zpracovávání audiosignálu.

Fotodetektor

Jako detektor záření lze použít lavinovou fotodiodu a nebo PIN fotodiodu. Princip funkce těchto fotodetektorů byl vysvětlen v kapitole 1.4 a výběr konkrétní součástky závisí na konkrétní aplikaci a požadavcích na optický přijímač.

Pokud bude přijímač zpracovávat širokopásmové signály nebo bude použit v komunikačním systému s velmi vysokou přenosovou rychlostí, je vhodné použít jako detektor lavinovou diodu APD. Kromě krátké doby odezvy se tato dioda také vyznačuje velkým ziskem, vysokou kvantovou účinností a nízkým šumem. Příkladem takové diody může být například APD dioda C30902E od firmy PerkinElmer [21]. Tato dioda má kvantovou účinnost 77% na vlnové délce 830 nm, dobu odezvy 0,5 ns, je schopna detekovat záření v rozsahu vlnových délek 400 až 1000 nm. Oproti fotodiodě PIN má však vyšší proud za tmy - asi 15 nA. Problémem při návrhu konkrétního fotodetektoru s APD je velká závislost zisku této diody na teplotě. Z tohoto důvodu musí být u fotodetektoru zavedena zpětná vazba, která reguluje závěrné napětí tak, aby bylo dosaženo konstantního zisku. K realizaci této zpětné vazby můžeme využít operační zesilovač nebo Peltiérův článek.

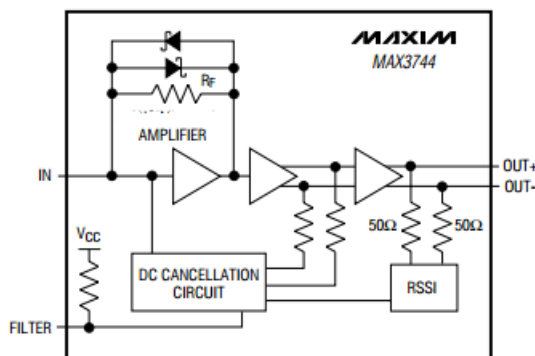
Naopak v jednodušších aplikacích a v systémech, v nichž nejsou požadovány vysoké přenosové rychlosti, můžeme použít jako detektor optického záření fotodiodu

PIN - například fotodetektor FDS100 od firmy Thorlabs [22]. Tato fotodioda je schopna detekovat záření o vlnových délkách 200 - 1100 nm, proud za tmy je typicky 0,5 nA, rozsah pracovních teplot je -40 až 100 °C. Doby časové odezvy je závislá na velikosti odporu R_L . Například při volbě odporu $R_L = 50 \Omega$ je časová odezva 5,27 ns.

Transimpedanční zesilovač a limiter

Transimpedanční zesilovač je převodník I/U, který současně proud generovaný fotodiodou zesiluje. Při konstrukci zesilovače můžeme buďto použít zapojení z klasických vývodových součástek nebo použít speciální integrovaný obvod. Úkolem limiteru je pak zajistit konstantní úroveň výstupního signálu bez ohledu na kolísání úrovně vstupního signálu. Limiter je častým obvodem i v jiných aplikacích, například audiozesilovačích a bývá označován jako AGC - Automatic Gain Control. Konstruován může být opět buďto pomocí tranzistorů či operačních zesilovačů nebo přímo jako integrovaný obvod.

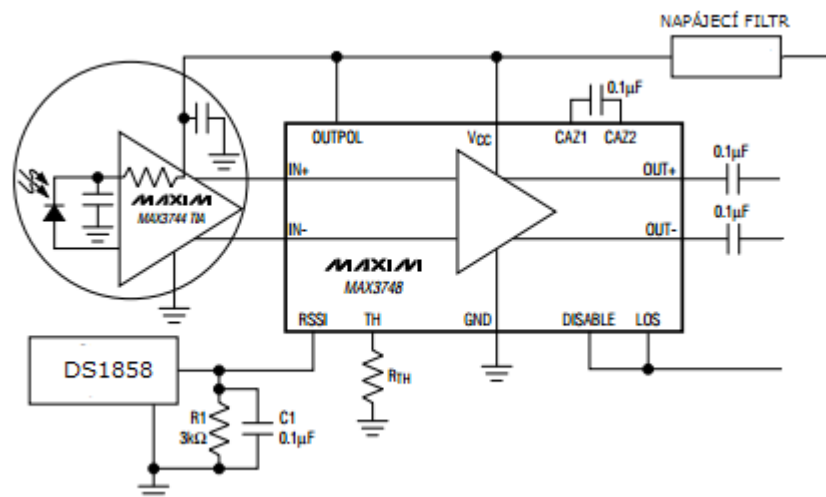
Příkladem řešení využívajícího integrované obvody mohou být opět produkty firmy Maxim Integrated. Obvod MAX3744 je transimpedančním zesilovačem určeným pro přenosové rychlosti až 2,7 Gbps. Na vstup může být připojena buďto PIN nebo lavinová dioda. Obvod lze zapojit tak, aby eliminoval stejnosměrnou složku signálu, architektura obvodu také obsahuje amplitudový omezovač na vstupu, čímž je zabráněno možnému zničení obvodu příliš vysokou úrovní signálu. Amplitudový omezovač zde tvoří dvojice rychlých Schottkyho diod [19].



Obr. 3.8: Architektura obvodu MAX3744 [19].

Blok RSSI (Received Signal Strength Indication) na Obr. 3.8 představuje blok indikátoru síly signálu, ke správné funkci tohoto indikátoru je nutné použít kompatibilní obvod limiteru - obvod MAX3748.

Propojení obvodu transimpedančního zesilovače a limiteru je znázorněno na Obr. 3.9. Symetrický výstupní signál ze zesilovače je veden na symetrický vstup



Obr. 3.9: Propojení obvodů MAX3744 a MAX3748 [20].

limiteru MAX3748. Limiter je schopen zpracovat úroveň vstupního signálu 5 až 1200 mV_{p-p}. Výstupní signál z limiteru je opět symetrický a je zesílen až o 53 dB. Kondenzátor připojený mezi piny CAZ1 a 2 slouží k nastavení časové konstanty korekce offsetu. Rezistor připojený na pin TH nastavuje úroveň, při které bude obvod signalizovat ztrátu signálu - funkce Loss of Signal. K vývodu RSSI je připojen obvod DS1858, což je zmiňovaný indikátor síly signálu. Napájení obou obvodů je společné, úroveň napájecího napětí je maximálně až 6 V [20].

3.3 Výukový soubor PROMAX EF-970

Výukový soubor PROMAX EF-970, u nás nabízený firmou Mikrokom, je sestava optického vysílače a přijímače určená především pro potřeby výuky na středních a vysokých školách. Přijímač i vysílač jsou konstruovány na jednostranné desce plošných spojů a jsou osazeny vývodovými součástkami. Vysílač i přijímač jsou dále vybaveny pomocnými obvody, jako jsou měřiče proudu a výkonu a generátor harmonických průběhů s nastavitelnou frekvencí. Navíc umožňují simulaci různých poruch na vysílání i přijímací straně přístroje.

Optický vysílač EF-970B/E

Tento optický vysílač obsahuje tři analogové a jeden digitální vstup a dále interní nízkofrekvenční generátor. Na výstupu vysílače je celkem pět zdrojů záření, mezi kterými lze přepínat. Jsou to čtyři diody LED - 526 nm, 590 nm, 660 nm a 850 nm - a laser o vlnové délce 650 nm (laserová dioda by pro zajištění správné funkce měla být provozována pouze při vstupním signálu na kanálu 2).

Vysílač je dvoukanálový a do uživatelem zvoleného kanálu se přivádí vstupní signál (analogový - AC nebo DC, případně signál z mikrofonu či interního generátoru; digitální - přímý nebo invertovaný, digitální signál o trvalé úrovni logické jedničky nebo uživatelem tvořený signál z TTL generátoru). Generátor je schopen generovat sinusový, trojúhelníkový nebo obdélníkový signál o kmitočtu 0,3 Hz až 18 kHz. Signál z generátoru lze rovněž využít k modulaci vysílaného signálu.

Digitální ampérmetr, který vysílač také obsahuje, umožňuje měření převodních výkonových charakteristik zdroje záření.

Optický vysílač je vybaven zpětnou vazbou, která, v případě že je zdrojem záření je laserová dioda, snižuje amplitudu signálu o šest decibelů, čímž je zvětšen dynamický rozsah vstupního signálu. Pomocí přepínače lze zvolit, zda má být laserová dioda provozována s nebo bez této zpětné vazby. V případě odpojení zpětné vazby však vlivem přílišného zesílení vstupního signálu předzesilovačem dochází ke zkreslení signálu již při nastavení velmi malých hodnot zisku předzesilovače, které se nastavuje příslušným potenciometrem. Toto zkreslení je indikováno rozsvícením červené LED s označením OVERLOAD. Obecně se tato indikační dioda rozsvítí vždy, pokud je amplituda signálu za zesilovačem vyšší než 3,3 V.

Celý vysílač je konstruován na jednostranné desce plošných spojů a osazen vývodovými součástkami. Horní kryt optického vysílače lze odklopit, čímž je umožněno uživateli podrobně se seznámit s funkcí jednotlivých bloků prostřednictvím řady testovacích bodů (označených TP - Test Point), ke kterým lze připojit mimo jiné sondu osciloskopu.

Optický přijímač EF-970B/R

Optický přijímač EF-970B/R má na svém vstupu čtyři různé fotodetektory mezi kterými lze opět přepínat. Jsou to tři fotodiody PIN z různých materiálů a různých velikostí - Si PIN 1 mm a 2,5 mm, InGaAs PIN 1 mm a jedna lavinová dioda z germania. Kromě těchto detektorů lze k přijímači připojit také detektor externí.

Přijímač je opět dvoukanálový a vybaven digitálním i analogovým vstupem. Navíc umožňuje současný příjem z obou kanálů.

Analogová část přijímače obsahuje zesilovač s nastavitelným ziskem až 40 dB, který lze v případě příjmu signálů o vysoké úrovni vypnout a umožňuje zvolit typ vazby - střídavou nebo stejnosměrnou.

Digitální část zajišťuje příslušnou filtraci přijímaného digitálního signálu a porovnávání přijímaného signálu s referenční úrovní, kterou lze volit mezi úrovní pro TTL logiku a úrovní RS-232.

Dále obsahuje optický přijímač vestavěný wattmetr, který lze provozovat ve čtyřech režimech (ANALOG, DIGITAL, DC a 1 kHz). Wattmetr je schopen rozlišit výkonové změny 0,1 dB (0,01 dB v režimu DC) a lze jej přepínat dle použité vlnové délky.

3.3.1 Simulátor chyb

Jak již bylo výše zmíněno, optický vysílač i přijímač z výukového souboru EF-970B obsahují simulátor chyb. Pomocí něj je možné simulovat různé poruchy ve vysílači či přijímači a pozorovat jejich dopad na signál. Díky tomu, že jsou desky plošných spojů přijímače a vysílače vybaveny velkým množstvím testovacích míst (označení TP na DPS), ke kterým lze připojit například osciloskop, je možné vyzkoušet si postup při hledání a odstraňování závad na skutečném elektronickém zařízení.

Chybové stavy optického vysílače

Optický vysílač je vybaven na své zadní straně osmi spínači, označenými čísly 1 až 8, jejichž vypnutím se zavádí chybové stavy. Jelikož je vysílač dvoukanálový, mají vždy dvojice spínačů stejnou funkci a liší se pouze v kanále, ve kterém se chyba projeví. Navíc jsou poslední dva spínače - 7 a 8 - nezapojeny, tudíž jejich sepnutí či rozepnutí nemá žádný vliv na funkci optického vysílače. V následujících odstavcích jsou popsány jednotlivé chyby. Všechny označení testovacích míst a součástek koresponduje s blokovým schématem na obrázku 3. 10.

Rozepnutím první dvojice spínačů (spínač 1 pro kanál 2, spínač 2 pro kanál 1) se simuluje porucha v oblasti zpracování vstupního signálu, konkrétněji v převodníku U/U_D . Projevem chyby je ztráta výstupního signálu. Měřením úrovně signálu na jednotlivých TP lze zjistit, že signál lze detekovat nejdále na TP13 resp. TP7 (podle toho, zda jsme rozpojili spínač 1 nebo 2). Tímto měřením lze zhruba detekovat oblast ve které se chyba vyskytuje a podrobnějším zkoumáním by bylo možno dojít k závěru, že závada se vyskytuje na integrovaném obvodu IC9 (IC5 pro kanál 1), jak uvádí dokumentace.

Spínače 3 a 4 ovlivňují správnou činnost vstupního dvacetidecibelového zesilovače. Při rozepnutí jednoho z dvojice spínačů zmizí výstupní signál a měřením úrovně signálu na jednotlivých TP lze opět dojít k závěru, že se chyba vyskytuje v okolí potenciometru GAIN, který ovládá zesílení signálu. Podrobnějším zkoumáním - měřením úrovně napětí na výstupních vývodech integrovaných obvodů IC7, IC8 a IC11 (IC1, IC2 a IC3 pro kanál 1) lze lokalizovat chybu na integrovaném obvodu IC8 (IC3).

Poslední funkční dvojice spínačů, spínače 5 a 6 způsobují poruchu v oblasti výběru vstupního signálu. Do vysílače může vstupovat signál z celkem osmi různých vstupů a výběr konkrétního vstupu je realizován příslušným ovládacím tlačítkem v přední části vysílače. Stiskem tlačítka se ovládá přepínač realizovaný integrovaným obvodem IC7 (IC1) a porucha tohoto spínače je simulována při rozepnutí spínače 5 resp. 6. Přesná lokalizace poruchy je opět možná kontrolou úrovně napětí na výstupních vývodech stejných integrovaných obvodů jako u předešlé chyby, tedy obvodů IC7, IC8 a IC11 (IC1, IC2 a IC3 pro kanál 1).

V Tab. 3.1 je uveden přehled chybových stavů. Ve sloupci „Lokalizace závady“ je uveden vždy poslední testovací bod, na kterém lze signál detekovat a dále uveden integrovaný obvod způsobující závadu.

Tab. 3.1: Přehled chybových stavů optického vysílače.

Číslo spínače	Kanál	Lokalizace závady	Popis
1	2	TP13 - IC9	Porucha v oblasti převodníku U/U_D , vadný IC9
2	1	TP7 - IC5	Porucha v oblasti převodníku U/U_D , vadný IC5
3	2	TP12 - IC8	Vadný integrovaný obvod zajišťující napájení zesilovače signálu, lze ověřit na 6. vývodu IO
4	1	TP6 - IC3	Vadný integrovaný obvod zajišťující napájení zesilovače signálu, lze ověřit na 6. vývodu IO
5	2	TP4 - IC7	Porucha selektoru vstupního signálu pro kanál 2
6	1	TP1 - IC1	Porucha selektoru vstupního signálu pro kanál 1
7			Spínač nezapojen
8			Spínač nezapojen

Chybové stavy optického přijímače

Optický přijímač má na své zadní straně opět osm spínačů, kterými je opět možno simulovat různé chybové stavy. U optického přijímače jsou funkční všechny spínače. Opět platí, že označení všech součástek a testovacích míst koresponduje s blokovým schématem na obrázku 3.11.

Rozepnutí spínače 1 způsobí ztrátu signálu na výstupu optického přijímače. Měřením úrovně napětí lze lokalizovat chybu mezi TP1 a TP5. mezi těmito kontrolními body se nachází integrovaný obvod 74HC4052E označený na DPS jako IC4. Jedná se o elektronický přepínač, který realizuje při stisku příslušného ovládacího tlačítka volbu vstupního kanálu. Právě tento obvod je při simulované poruše blokován. Spínač 2 realizuje stejnou chybu, tentokrát však pro digitální vstup. Blokuje tedy integrovaný obvod IC5, který plní funkci selektoru digitálního kanálu.

Spínač číslo tři ovládá správnou funkci integrovaného obvodu IC9, který za normálního stavu umožňuje odstranit ze signálu stejnosměrnou složku a navíc je signál z tohoto obvodu veden do předzesilovače. Rozpojením toho přijímače tak opět zmizí

Při popisu optického přijímače bylo uvedeno, že umožňuje měřit výkon v několika režimech. Při vstupním signálu o frekvenci 1 kHz lze měřit výkon signálu v přesném režimu s názvem „1 kHz“. V tomto režimu je vstupní signál zesílen předzesilovačem a dále veden do samostatného zesilovače, před kterým je zařazena pásmová propust naladěná na mezní kmitočet 1 kHz. Při rozepnutí spínače 4 se simuluje porucha právě v této oblasti - poruchy si tak uživatel nemusí všimnout při měření výkonu v jiném režimu než 1 kHz. Přesná lokalizace poruchy je integrovaný obvod IC26, což je integrovaný obvod zajišťující napájení zesilovače. Jeho funkčnost je ověřitelná pomocí voltmetru, za normálního provozu je mezi vývody 4 a 11 napětí 9 V, zatímco při simulované poruše jen asi 0,7 V.

Digitální kanál má také svůj vlastní zesilovač jehož poruchu lze simulovat rozepnutím spínače 5. Při lokalizaci chyby lze vycházet z toho, že signál se nachází na TP6 a na TP16 již není, zde se tedy nabízí pouze integrovaný obvod zajišťující samotné zesílení signálu.

Rozpojením spínače 6 dojde k simulované poruše výkonového zesilovače pro analogový kanál s nastavitelným zesílením až 20 dB. Pomocí osciloskopu lze při poruše detekovat signál na TP8, zatímco na TP9 již signál není. Podle dokumentace je závada v integrovaném obvodu AD829, který má na DPS označení IC18. Toto je možné ověřit přiložením sondy osciloskopu na šestý vývod integrovaného obvodu. Za normálního stavu je na tomto vývodu signál, jehož amplituda je závislá na nastaveném zesílení, při poruše nelze detekovat žádný signál.

Zpracování signálu analogového signálu v optickém přijímači se skládá z předzesílení signálu na požadovanou úroveň pro výkonový zesilovač s nastavitelným zesílením a za tímto zesilovačem je signál rozdělen do dvou větví - v první větvi je signál přiveden do audiozesilovače a dále na vestavěný reproduktor nebo na připojená sluchátka, ve druhé větvi se nachází filtr typu pásmové propusti, jehož mezní kmitočet můžeme ovlivňovat, případně můžeme filtr zcela vyřadit, následuje zesilovač s pevným zesílením 6 dB a signál prochází na výstup, kam můžeme připojit libovolné zařízení. Poruchu koncového zesilovače s pevným zesílením simuluje sedmá porucha. Za normálního provozu lze pozorovat na TP11 vstupní signál s amplitudou závislou na nastaveném zesílení na výkonovém zesilovači, při rozpojení sedmého spínače na tomto kontrolním bodu poklesne amplituda signálu a můžeme také pozorovat značné zkreslení signálu. Při kontrole funkce jednotlivých integrovaných obvodů dojdeme k závěru, že vadný je integrovaný obvod AD817 označený jako IC20 na jehož šestém vývodu při simulované poruše není žádný signál.

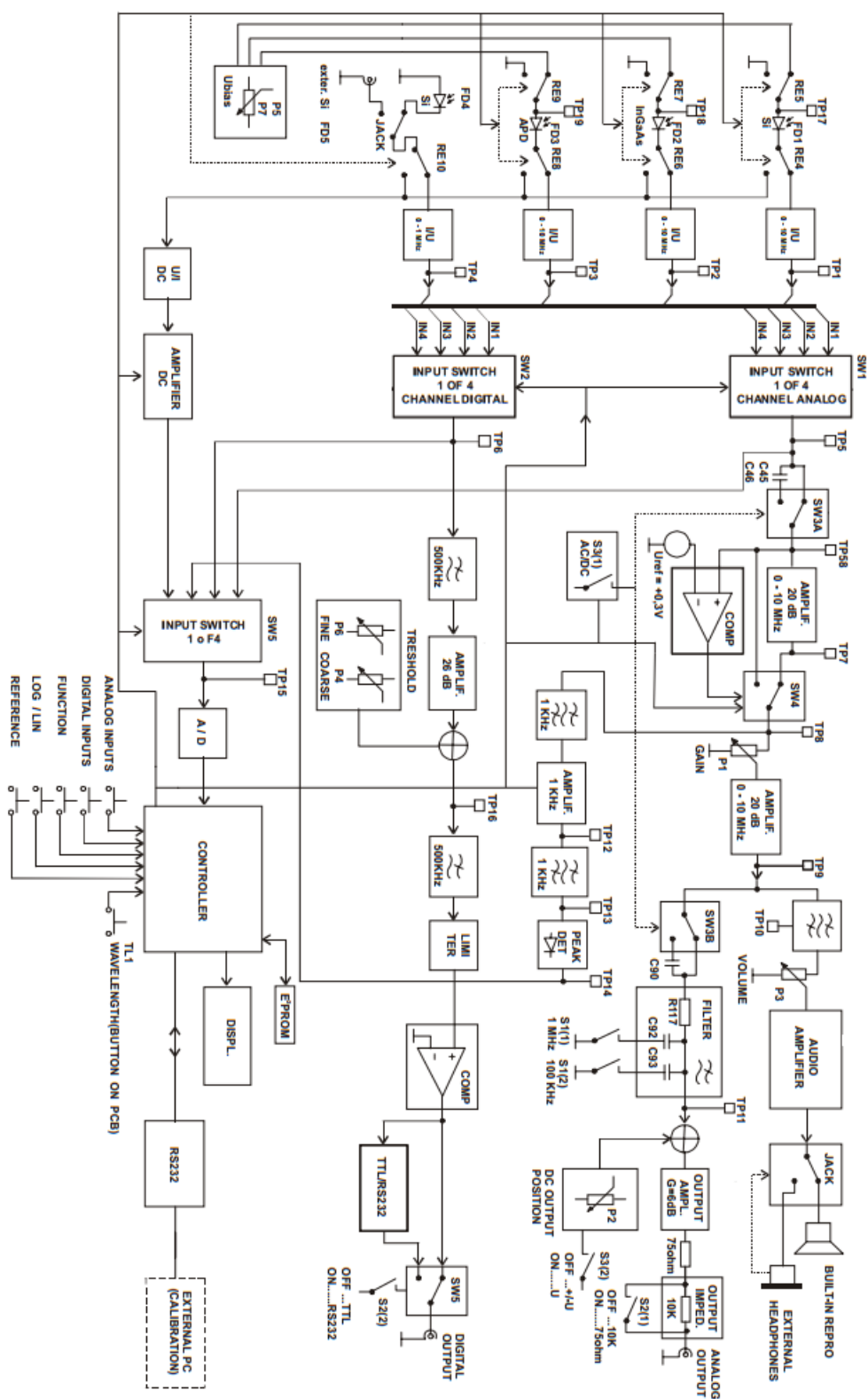
Poslední, osmá chyba vyřadí z funkce audiozesilovač, takže při nastavené nenulové hlasitosti na potenciometru P3 a vstupním signálu o kmitočtu ležícím v oblasti slyšitelných kmitočtů slyšíme za normálního stavu zvuk z reproduktoru, při poruše neuslyšíme nic. Vadným obvodem je integrovaný obvod LM386, označený jako IC22.

Na jeho pátém vývodu při vývodu zmizí signál.

V Tab. 3.2 je opět uveden přehled všech chybových stavů. Opět platí, že čísla testovacích bodů jsou poslední body kde lze signál detekovat. U prvních dvou poruch jsou možné dva TP neboť konkrétní bod závisí na zvoleném detektoru.

Tab. 3.2: Přehled chybových stavů optického přijímače.

Číslo spínače	Kanál	Lokalizace závady	Popis
1	Analog	TP1, TP2 - IC4	Porucha obvodu zajišťující výběr fotodiody pro analogový kanál
2	Digital	TP1, TP2 - IC5	Porucha obvodu zajišťující výběr fotodiody pro digitální kanál
3	Analog	TP5 - IC9	Závada integrovaného obvodu zajišťujícího předzesílení vstupního signálu
4	Analog	TP8 - IC26	Zablokování IO zajišťujícího napájení zesilovače pro měření v režimu 1 kHz
5	Digital	TP6 - IC23	Porucha zesilovače pro digitální kanál
6	Analog	TP8 - IC18	Závada zesilovače analogového signálu
7	Analog	TP11 - IC20	Nefunkční koncový zesilovač
8	Analog	TP10 - IC23	Porucha zesilovače pro audiovýstup



Obr. 3.11: Blokové schéma optického přijímače EF-970B/R.

4 REALIZACE LABORATORNÍ ÚLOHY

Výsledkem této bakalářské práce má být realizace laboratorní úlohy pro měření kvalitativních parametrů optického vláknového spoje a jevů, které tyto parametry ovlivňují. Tato úloha nalezne uplatnění v laboratorních cvičeních předmětu Základy optických komunikací a optoelektronika (BOPE). Po zvážení všech možností byla navržena jedna nová úloha zaměřená na přenos digitální informace optickým vláknem a jedna stávající úloha byla pozměněna za účel hlubšího porozumění jednotlivým funkčním blokům optického vysílače a přijímače. Dalším textu jsou obě tyto úlohy popsány.

4.1 Laboratorní úloha Přenos informace optickým vláknem

Tato laboratorní úloha seznamuje studenty s přenosem analogového signálu optickým vláknem. Úloha se skládá z výše popisovaného výukového souboru PROMAX EF-970 a optického vlákna. Jako zdroj signálu slouží analogová kamera MINTR a mikrofon. Kamera je připojena k analogovému vstupu optického přijímače označeného DC a mikrofon se připojuje na vstup s označením MIC. V optickém vysílači je elektrický signál zpracován, převeden na optický a vyzářen do úseku optického vlákna. Druhý konec optického vlákna je připojen k optickému přijímači, který přijatý optický signál přemění zpět na elektrický, zesílí a přivede na výstupní svorky označené ANALOG. K analogovému výstupu optického přijímače je připojen jednak osciloskop Agilent Technologies DSO3102A, jednak TV přijímač Philips FlatTV.

Do optické trasy je také možno vložit proměnný atenuátor s nastavitelným útlumem čímž lze určit kritickou hodnotu útlumu, při které dochází ke ztrátě signálu. Ze znalosti této hodnoty a hodnoty útlumu optického vlákna je pak možné spočítat teoretickou maximální délku optické trasy.

Rozšíření této úlohy spočívá v použití výše popisovaného simulátoru chyb v optickém vysílači a přijímači. Studenti se tak před započítím samotného měření nejprve důkladně seznámí s jednotlivými funkčními bloky vysílače a přijímače a s použitím osciloskopu s průběhem signálu v jednotlivých částech zařízení. K tomu je možno využít zmiňovaných testovacích bodů nebo připojit sondu osciloskopu přímo k výstupním vývodům jednotlivých integrovaných obvodů (konfiguraci vývodů bude možné vyčíst z příložených datových listů). Po seznámení se s optickým přijímačem a vysílačem proběhne měření a zpracování úkolů zaměřených na přenos analogového audio a video signálu. Po skončení měření zavolají studenti vyučujícího, který na

optickém vysílači nebo přijímači nastaví určité chybové stavy a úkolem studentů bude tuto chybu lokalizovat, případně odhalit její konkrétní příčinu.

Volba konkrétních chybových stavů závisí jednak na volbě vyučujícího, jednak na konfiguraci zapojení. Pokud je vstupní signál přiváděn na kanál dvě optického vysílače, pak by i chyby měly být voleny v kanálu dva a naopak. U vysílače je nejsnadněji lokalizovatelnou chybou porucha výkonového zesilovače s nastavitelným zesílením, tedy spínače tři a čtyři.

U optického přijímače by měly být voleny chyby pouze v analogové oblasti. Dobře odhalitelná je například porucha výstupního audiozesilovače (přepínač 8) nebo poruchy výkonového zesilovače (přepínač 6). Naopak hůře odhalitelnou je porucha v oblasti výběru kanálu nebo porucha měřiče výkonu.

Vypracovaný vzorový protokol z této laboratorní úlohy je v příloze A.1. Rozdíl oproti stávající úloze je v přidání bodu zadání 2.5 a přidání stručného návodu k tomuto bodu. Při měření byly zavedeny poruchy současně do optického vysílače i přijímače, obě tyto poruchy se nacházely v oblasti zesílení signálu. Při hledání poruch je nutné dodržet logický postup od zdroje signálu k přijímači a potom hledání chyb nepředstavuje obtížný úkol.

V příloze A.2 jsou přiloženy výňatky z datových listů vybraných integrovaných obvodů. Jsou to obvody 74HC4052, což je analogový multiplexor/demultiplexor, který ve vysílači a přijímači slouží k výběru kanálu, dále potom datový list integrovaného obvodu AD829, který slouží v obvodech vysílače a přijímače k napájení zesilovačů signálu a jako poslední byl vybrán datový list obvodu LM386, který se nachází v obvodech optického přijímače a slouží k zesilování audiosignálu. Všechny tyto vybrané obvody mají přímou souvislost s některými poruchami vysílače či přijímače.

4.2 Laboratorní úloha Přenos TTL signálu optickým vláknem

V této laboratorní úloze bude využito možnosti přivést na vstup optického vysílače EF-970B/E uživatelem definovaný signál z TTL generátoru. Studenti se tak seznámí s přenosem digitálního signálu optickou trasou a budou moci porovnat parametry, výhody a nevýhody přenosu analogového signálu oproti signálu digitálnímu.

V první části laboratorní úlohy bude věnována pozornost samotnému optickému vysílači a přijímači. Nejprve si studenti zobrazí na osciloskopu průběh proudu zdrojem záření pro dvě možná nastavení logiky a to pro nastavení kladné a záporné. Dále je také patrné zkreslení průběhu proudu vlivem derivačního článku, který je na vstupu optického vysílače. Po zobrazení těchto průběhů zaměří studenti svoji

pozornost k optickému přijímači, na kterém si, opět pomocí osciloskopu, vyzkouší vliv zesílení vstupního signálu na dynamiku komparátoru, který je na výstupu optického přijímače. K návrhu této části měření bylo využito Závěrečné zprávy o řešení grantového projektu FRVŠ č. 2022/2012 „Inovace laboratorní výuky bakalářského předmětu Základy optických komunikací a optoelektronika“, jejímiž řešiteli byla Ing. Lucie Hudcová, Ph.D. a prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc.

Dále je možné změřit maximální délku optické trasy realizovatelné pomocí této sestavy optického vysílače a přijímače. Postup je podobný jako v úloze Přenos informace optickým vláknem, tedy do trasy mezi vysílač a přijímač bude vložen proměnný atenuátor a pomocí osciloskopu bude odečtena maximální hodnota útlumu, při které ještě nedojde k ztrátě signálu na výstupu přijímače.

Další část laboratorního měření je zaměřena na vliv rostoucího kmitočtu na TTL signál. Vlivem zvyšující se frekvence bude docházet k prodloužení náběžné hrany signálu. Maximální kmitočet digitálního signálu, který je schopný optický přijímač zpracovat je 500 kHz, pak je již signál frekvencečně omezen - viz Obr. 3. 11.

Posledním bodem zadání bude opět práce se simulátorem poruch. U optického vysílače není digitální signál veden samostatnou větví, proto může být volen kterýkoliv chybový stav popisovaný v kapitole 3.3.1. Naproti tomu u přijímače je digitální signál veden samostatně a je proto nutné volit pouze ty chybové stavy, které zasáhnou digitální část. Je to porucha číslo dvě, která vyřadí z funkce selektor digitálního kanálu a chyba číslo pět, která simuluje poruchu zesilovače digitálního signálu.

Vzorový protokol je v příloze B.1. V prvním bodě jsou zakresleny průběhy proudu zdrojem záření. Je zde patrné jednak zkreslení proudu derivačním článkem, jednak je patrný rozdíl mezi nastavením logiky „positiv“ a „negativ“. Po určení maximálního útlumu v optické trase byla spočítána teoretická maximální délka této trasy s výsledkem 24 km, což je méně než při přenosu analogového, sinusového signálu. Dále je na dalších dvou oscilogramech zaznamenán vliv rostoucího kmitočtu na tvar výstupního signálu a v posledním bodě vyzkoušen simulátor chyb.

5 ZÁVĚR

Dle zadání měla být pozornost věnována obecné problematice šíření signálů optickým vláknem a různým jevům, které ve vlákně vznikají a mají dopad na kvalitu přenášeného signálu. Z tohoto důvodu byla tato problematika podrobně popsána v prvních dvou kapitolách této práce, kdy první kapitola se věnuje problematice šíření světla vláknem z pohledu geometrické optiky a příčinám vzniku útlumu a disperze v optickém vlákně, druhá kapitola se věnuje přehledu některých metod pro měření těchto parazitních jevů. I když tyto kapitoly jsou vlastně shrnutím známých poznatků, jsou důležité pro pochopení problematiky.

Dále je v práci probírán návrh jednoduchého optického vysílače a přijímače, jakožto nutných zařízení pro každý komunikační systém využívající pro přenos informací optických vláken. V příslušné kapitole jsou doporučení pro úspěšný návrh zařízení a je zde také krátce nastíněna problematika vzniku rušivých napětí vlivem nesprávného zemnění. Pozornost je také věnována výukovému souboru PROMAX EF-970, který byl zakoupen do laboratoře Optických komunikací a který se skládá z optického vysílače, optického přijímače, sady optických vláken a sady pro čištění optických vláken. Tento výukový soubor je konstruován tak, aby umožnil co nejbližší seznámení obsluhy s jednotlivými funkčními bloky přístroje. Navíc vysílač i přijímač obsahují simulátor poruch, který je v práci podrobně rozebírán a kterého je následně využito při návrhu laboratorních úloh.

Byly navrhnuty dvě laboratorní měření. První je pouze doplnění stávající laboratorní úlohy o aplikaci zmiňovaného simulátoru chyb, druhá úloha se zaměřuje na přenos TTL signálu optickým vláknem, opět za využití souboru PROMAX EF-970. I v této úloze je využito chybového simulátoru.

Spojení obou úloh do jedné by bylo možné, ovšem takto vzniklá úloha by byla časově náročná a pravděpodobně by nebylo možné ji ve vymezeném čase stihnout.

Úlohu číslo pět by bylo možné ještě dále rozšířit o přenos modulovaného vstupního signálu, neboť optický vysílač obsahuje vnitřní nastavitelný generátor, který je možno využít právě pro modulaci vstupního signálu z vnějšího zdroje.

LITERATURA

- [1] KAO, K. C., HOCKHAM, G. A. *Dielectric-Fibre surface waveguides for optical frequencies*. Proceedings IEE, vol. 113, 1151-1158, July 1966
- [2] *The Nobel Prize in Physics 2009*. In: [online] [cit. 2012-09-30]. Dostupné z URL: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2009/kao-lecture.html
- [3] *Ultrafast fibre optics set new speed record*. In: [online]. č. 2809 [cit. 2012-10-07]. Dostupné z URL: <http://www.newscientist.com/article/mg21028095.500-ultrafast-fibre-optics-set-new-speed-record.html>
- [4] FILKA, M. *Přenosová média*. Skripta. VUT FEKT, Brno 2003
- [5] WILFERT, Otakar. *Optoelektronika*. Skripta. VUT FEKT, Brno, s. 120 - 121
- [6] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Vyd. 1. Brno: Miloslav Filka, 2009, s. 30 - 319. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [7] *G.695 : Optical interfaces for coarse wavelength division multiplexing applications: Recommendation G.695 (02/04)*. In: [online]. [cit. 2012-11-17]. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.695-200402-S/en>
- [8] *Porovnání metod kompenzace chromatické disperze u klasického optického jednovodového vlákna*. In: Access Server. [online]. 2010 [cit. 2012-11-18]. ISSN 1214-9675. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2010020001>
- [9] HÁJEK, Martin a Petr HOLOMEČEK. *Chromatická disperze jednovodových optických vláken a její měření*. In: [online]. s. 1-3 [cit. 2012-11-18]. Dostupné z: <http://www.mikrokom.eu/cz/pdf/chrom-disperze.pdf>
- [10] TSUDA, T., Y. AKASAKA, S. SENTSU, K. AISO, Y. SUZUKI a T. KAMIYA. *Broad band dispersion slope compensation of dispersion shifted fiber using negative slope fiber* [online]. 1998 [cit. 2012-11-18]. DOI: 10.1109.
- [11] ŤUPA, Martin, Miloslav FILKA a Otto DOSTÁL. *Polarizační vidová disperze – PMD*. In: [online]. 2012 [cit. 2012-11-24]. ISSN 1213-1539. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/komunikacni-technologie/0/polarizacni-vidova-disperze---pmd/>
- [12] SHIN SUMIDA, H. MURATA a Y. KATSUYAMA. *A new method of optical fiber loss measurement by the side-illumination technique*. In: [online]. 1984 [cit. 2012-11-28]. DOI: 10.1109/JLT.1984.1073670.

- [13] SUNAK, H.R.D., H. MURATA a Y. KATSUYAMA. *Single-mode fiber measurements*. In: [online]. 1984 [cit. 2012-11-28]. DOI: 10.1109/19.9812.
- [14] COSTA, B., D. MAZZONI, M. PULEO a E. VEZZONI. *Phase shift technique for the measurement of chromatic dispersion in optical fibers using LED's*. In: [online]. [cit. 2012-11-29].
- [15] WIRSUM, Siegfried. *Abeceda NF techniky*. Vyd. 1. BEN - technická literatura Praha 1998, s. 57 - 60. ISBN 80-86056-26-0.
- [16] *155Mbps to 4.25Gbps SFF/SFP Laser Driver with Extinction Ratio Control*. In: [online]. [cit. 2013-02-16]. Dostupné z: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX3738.pdf>
- [17] *270Mbps SFP LED Driver*. In: [online]. [cit. 2013-02-17]. Dostupné z: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX3967A.pdf>
- [18] DŘÍNOVSKÝ, Jiří. *Elektromagnetická kompatibilita: přednášky*. Vyd. 1. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2010, 229 s. ISBN 978-80-214-4202-3.
- [19] *2.7Gbps SFP Transimpedance Amplifiers with RSSI*. In: [online]. [cit. 2013-02-22]. Dostupné z: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX3744-MAX3745.pdf>
- [20] *Compact 155Mbps to 4.25Gbps Limiting Amplifier*. In: [online]. [cit. 2013-02-22]. Dostupné z: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX3748.pdf>
- [21] *Silicon Avalanche Photodiodes C30902E*. In: [online]. [cit. 2013-03-12]. Dostupné z: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/perkinelmer/C30902E.pdf>
- [22] *Photodiode FDS100: Specifications and Documentation*. In: [online]. [cit. 2012-12-10]. Dostupné z: <http://www.thorlabs.de/Thorcat/0600/FDS100-SpecSheet.pdf>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

AGD	Automatic Gain Control
AKO	Astabilní klopný obvod
APC	Automatic Power Control
APD	Avalanche Photodiode
DCF	Dispersion Compensation Fiber
DFF	Dispersion Flattened Fiber
DGD	Differential Group Delay
DSF	Dispersion Shifted Fiber
FWM	Four-Wave Mixing
IC	Integrated Circuit
ITU	International Telecommunication Union
LD	Laser Diode
LAN	Local Area Network
LED	Light Emitting Diode
NA	Numerická apertura
OP	Optický přijímač
OV	Optické vlákno
OZ	Optický zdroj
PMD	Polarisation Mode Dispersion
RSSI	Received Signal Strength Indication
TP	Test Point
VJ	Vysílací jednotka
c	Rychlost světla ve vakuu
D_{chr}	Koeficient chromatické disperze

D_{mat}	Koeficient materiálové disperze
D_{vln}	Koeficient vlnovodné disperze
E_c	Energie valenčního pásu
E_v	Energie vodivostního pásu
F_c	Fermiho-Diracova rozdělovací funkce pro valenční pás
F_v	Fermiho-Diracova rozdělovací funkce pro vodivostní pás
bps	bitová rychlost
h	Planckova konstanta
n	Index lomu
n_c	Hustota stavů ve valenčním pásu
n_v	Hustota stavů ve vodivostním pásu
R	Odrazivost plochy
R_L	Zatěžovací odpor
v	Rychlost
U_r	Rušivé napětí
V_O	Výstupní napětí
W_{F_c}	Zdánlivá Fermiho-Diracova hladina pro valenční pás
W_{F_v}	Zdánlivá Fermiho-Diracova hladina pro vodivostní pás
α	Koeficient útlumu
λ	Vlnová délka

SEZNAM PŘÍLOH

A	Přenos informace optickým vláknem	59
A.1	Vzorový protokol	59
A.2	Datové listy vybraných obvodů	67
B	Přenos TTL signálu optickým vláknem	72
B.1	Vzorový protokol	72

A PŘENOS INFORMACE OPTICKÝM VLÁKNEM

A.1 Vzorový protokol

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně		Předmět: Optoelektronika	
Jméno studenta:	Skupina:	Dne:	
Číslo a název úlohy: 5. PŘENOS INFORMACE OPTICKÝM VLÁKNEM			

1. Teoretické poznatky

Optická vlákna jsou skleněná nebo plastová vlákna, která mají schopnost vést optické záření s relativně malým útlumem. Tohoto faktu se využívá při přenosu optického signálu. Jako zdroj signálu využíváme modulovaný optický svazek generovaný LED, laserovou diodou nebo laserem. Jako přijímač optického signálu využíváme fotodetektor (např. PIN, APD). Optický signál lze pomocí vláken přenášet na krátké i velmi dlouhé vzdálenosti. Důležitými parametry pro ohodnocení jejich přenosových vlastností jsou zejména spektrální závislost disperze a útlumu. Velkou výhodou vláknových přenosových systému je galvanické oddělení, vysoká přenosová rychlost, velmi vysoká spolehlivost a možnost multiplexace signálů.

Cílem cvičení je obeznámení se se stavebními bloky vysílačů a přijímačů optického signálu, s principy přenosu analogového signálu optickým vláknem a s různými typy optovláknových součástek. Kromě samotného přenosu signálu je pozorován vliv přídavného útlumu v optické trase. Důraz je také kladen na seznámení studentů se základy práce s optickými vlákny, které jsou citlivé především na mechanické poškození.

K přenosu signálů jsou využity přípravky z řady EF-970B určených pro výuku optických komunikací a optoelektronických přenosů. Soubor obsahuje multifunkční optický vysílač a přijímač, sadu optických modulů, optickou trasu, konektorové spojky a příslušenství pro čištění optických vláken.

Úloha je časově náročná, proto je doporučeno řádné prostudování si návodu k obsluze multifunkčního vysílače a přijímače.

2. Zadání

- 2.1 Seznamte se s multifunkčním optickým vysílačem a přijímačem, pomocí kterých budete pozorovat přenos nf a video signálu. Pomocí osciloskopu a přiložených datových listů pozorujte průběh signálu v optickém vysílači i přijímači v jednotlivých jeho funkčních blocích.
- 2.2 Realizujte přenos nf signálu optickým vláknem. Pro generování nf signálu využijte příslušný blok vysílače. Po správném nastavení pracovního bodu přenášený signál poslouchajte sluchátky a pozorujte na obrazovce osciloskopu. Změnou kmitočtu pozorujte a na závěr shrňte změnu přenosových vlastností přijímače. Do optické trasy vložte útlumový článek a pozorujte vliv útlumu optického signálu na kvalitu přenosu.
- 2.3 Realizujte přenos audio signálu optickým vláknem. Pro zachycení zvukového signálu využijte mikrofón, přenášený zvuk pak poslouchajte sluchátky a pozorujte na obrazovce osciloskopu. Do optické trasy vložte útlumový článek a pozorujte vliv útlumu optického signálu na kvalitu přenosu.
- 2.4 Obdobně realizujte přenos analogového video signálu. Video signál získáte pomocí kamery, video informace bude na výstupu zobrazená TV přijímačem a zároveň

osciloskopem v režimu TV. Do optické trasy vložte útlumový článek a pozorujte vliv útlumu optického signálu na kvalitu přenosu.

- 2.5 Na základě seznámení se s optickým vysílačem a přijímačem z bodu 2.1 lokalizujte poruchu v optickém vysílači/přijímači, která bude realizována pomocí simulátoru chyb.

3. Použité přístroje

- Multifunkční optický vysílač EF-970B/E
- Multifunkční optický přijímač EF-970B/R
- Osciloskop Agilent Technologies DSO3102A
- Mikrofon
- Sluchátka
- Propojovací optické kabely
- Video generátor – kamera MINTR
- TV přijímač – Philips FlatTV
- Proměnný atenuátor s nastavitelným útlumem

4. Pracovní postup

Zvažte charakter signálu, který se přivádí na vstup optické linky (časový průběh, frekvenční charakter, úroveň). Ujasněte si definici vybraných veličin a změřte je. Seznamte se s fotodokumentací (dodáno spolu se zařízením firmou Mikrokomp), ve které naleznete popis jednotlivých bloků multifunkčního optického vysílače EF-970B/E a přijímače EF-970B/R. B

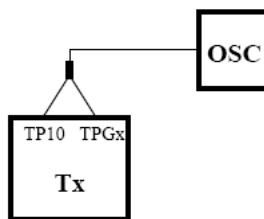
Blíže k bodu 2.1:

Po seznámení se s fotodokumentací nastavte vysílač i přijímač podle **bodu 2.2**. Dále aktivujte na osciloskopu měření napětí a pomocí sondy osciloskopu pozorujte tvar a amplitudu signálu na jednotlivých kontrolních bodech, na desce plošných spojů označených jako TP. Kromě testovacích bodů můžete připojit sondu osciloskopu i na výstupní vývody vybraných integrovaných obvodů. Rozložení jejich vývodů naleznete v příložených datových listech. Dále zkoušejte, na čem je velikost signálu na jednotlivých TP závislá.

Blíže k bodu 2.2:

Pro **přenos nf signálu** nastavte **vysílač** následovně: *Vstup*: GEN na kanálu CH1; *Průběh*: sin, 1 kHz; *mA měření*: CH1; *Optický výstup*: zdroj č. 4 (LED 850 nm) na CH1. **Přijímač** nastavte následovně: *Funkce*: ANALOG měření; *Optický vstup*: fotodetektor č. 1 (Si 1mm); *Zapojení*: AC(S1(1)); *Vstupní impedance*: 75 Ohm.

Připojte jeden kanál osciloskopu k měřicímu bodu TP10 a GND vysílače pro zobrazení proudu protékajícího zdrojem záření podle obr.1.



Obr.1. Připojení vysílače k osciloskopu – zobrazení budícího proudu.

Nastavte na vysílači proud (I_{BIAS}) potenciometrem P2 přibližně do poloviny rozsahu. Potenciometr P1 (GAIN) nastavte tak, aby nedocházelo ke zkreslení signálu. Propojte pomocí propojovacího optického kabelu výstup vysílače s odpovídajícím vstupem přijímače. Aktivujte 100kHz filtr na přijímači. Druhý kanál osciloskopu připojte k analogovému výstupu přijímače. Pomocí osciloskopu nastavte potenciometrem P1 na přijímači zesílení tak, aby signál nebyl zkreslen.

Postupně měňte kmitočet nf generátoru a pozorujte změnu přenosových vlastností optického řetězce. Uvedený postup opakujte pro druhý vstup přijímače (fotodetektor č. 2; Si 2,5 mm).

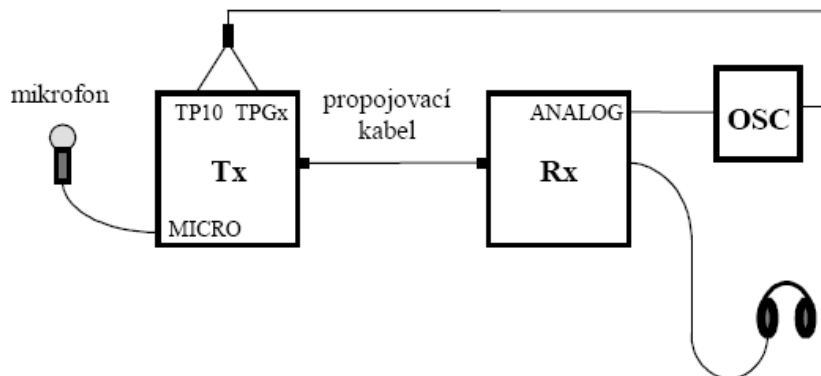
Otázka: Jaké jsou výhody a nevýhody v použití fotodetektorů s různými aktivními plochami?

Blíže k bodu 2.3:

Pro přenos audio signálu nastavte vysílač následovně: *Vstup*: Mikrofon na kanálu CH1; *mA měření*: CH1; *Optický vstup*: zdroj č. 4 (LED 850 nm) na CH1. Přijímač nastavte následovně: *Funkce*: ANALOG měření; *Optický vstup*: fotodetektor č. 1 (Si 1mm); *Zapojení*: AC(S1(1)); *Vstupní impedance*: 75 Ohm.

Připojte jeden kanál osciloskopu k měřicímu bodu TP10 a GND vysílače pro zobrazení proudu protékajícího zdrojem záření podle obr.1.

Nastavte na vysílači proud (I_{BIAS}) potenciometrem P2 přibližně do poloviny rozsahu. Potenciometr P1 (GAIN) nastavte tak, aby při maximálním vybuzení vstupu mikrofonom nedošlo ke zkreslení signálu. Propojte pomocí propojovacího optického kabelu výstup vysílače s odpovídajícím vstupem přijímače. Aktivujte 100kHz filtr na přijímači. Druhý kanál osciloskopu připojte k analogovému výstupu přijímače. Pomocí osciloskopu nastavte na přijímači zesílení tak, aby signál nebyl zkreslen ani při největším buzení mikrofonom.



Obr.2. Zapojení pracoviště pro přenos audio signálu.

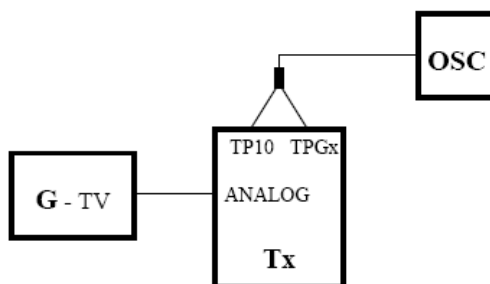
Pozorujte na osciloskopu přenášený audio signál. Poslouchejte audio signál z reproduktoru na přijímači, resp. pomocí sluchátek připojených k příslušnému výstupu přijímače.

Odpojte propojovací optický kabel od přijímače a připojte jej k proměnnému atenuátoru. Na druhý konec atenuátoru připojte další optický kabel, který následně připojte k optickému přijímači. Postupně navyšujte hodnotu vložného útlumu a sledujte kvalitu přijímaného signálu.

Pomocí měřiče optického výkonu změřte hodnoty přijatého výkonu přímým spojením vysílače a přijímače optickým vláknem a přijatý výkon při vloženém útlumu. Porovnáním hodnot určíte nejvyšší možný akceptovatelný vložný útlum v optické trase. Za předpokladu hodnoty útlumu optického vlákna $\alpha_{OV} = 0,5 \text{ dB/km}$ stanovte maximální dosah optovláknového spoje.

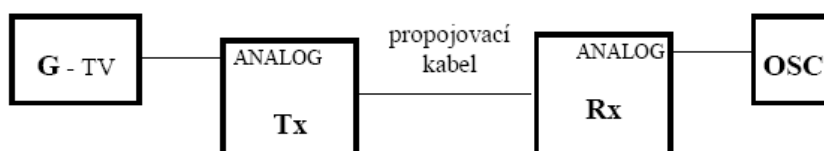
Blíže k bodu 2.4:

Pro přenos video signálu nastavte vysílač následovně: *Vstup*: DC na kanálu CH1; *mA měření*: CH1; *Optický vstup*: zdroj č. 4 (LED850 nm) na CH1. Přijímač nastavte následovně: *Funkce*: ANALOG měření; *Optický vstup*: fotodetektor č. 1 (Si 1mm); *Zapojení*: AC(S1(1)); *Vstupní impedance*: 75 Ohm. Připojte analogovou CCD kameru k analogovému DC vstupu vysílače. Připojte jeden kanál osciloskopu s TP10 a GND vysílače pro pozorování protékajícího proudu zdrojem záření.



Obr.3. Připojení vysílače k osciloskopu – zobrazení proudu protékajícího zdrojem záření

Nastavte na vysílači proud (I_{BIAS}) potenciometrem P2 přibližně na 9 mA. Potenciometr P1 (GAIN) nastavte pomocí osciloskopu tak, aby nebyl synchronizační puls zkreslen (nebyl omezen). Pokud je to nezbytné, přizpůsobte potenciometr P2 (I_{BIAS}). Na přijímači nastavte pomocí potenciometrů P5 a P7 závěrné napětí fotodetektoru na maximum (pozn.: po celou dobu měření jsou oba filtry na přijímači (100kHz a 1 MHz) nezapojené). Spojte propojovacím optickým kabelem výstup vysílače s odpovídajícím vstupem přijímače. Připojte osciloskop k analogovému výstupu přijímače (75 Ohm).



Obr.4. Přenosový řetězec s osciloskopem na výstupu.

Na přijímači nastavte potenciometrem P1 zesílení analogového kanálu tak, aby napětí špička – špička synchronizačního pulsu bylo 1V. Odpojte osciloskop od analogového výstupu a připojte k němu TV přijímač. Na TV přijímači pozorujte přenášený video signál. Porovnejte

tento signál po přenosu optickým vláknem se signálem zobrazeným přímo zapojením TV přijímače k CCD kameře.

Odpojte propojovací optický kabel od přijímače a připojte jej k proměnnému atenuátoru. Na druhý konec atenuátoru připojte další optický kabel, který následně připojte k optickému přijímači. Postupně navyšujte hodnotu vložného útlumu a sledujte kvalitu přijímaného signálu.

Pomocí měřiče optického výkonu změřte hodnoty přijatého výkonu přímým spojením vysílače a přijímače optickým vláknem a přijatý výkon při vloženém útlumu. Porovnáním hodnot určíte nejvyšší možný akceptovatelný vložný útlum v optické trase. Za předpokladu hodnoty útlumu optického vlákna $\alpha_{OV} = 0,5 \text{ dB/km}$ stanovte maximální dosah optovláknového spoje.

Blíže k bodu 2.5:

Optický vysílač i přijímač jsou vybaveny simulátorem chyb, který představuje pole osmi spínačů, jejichž rozpojením se v obvodech vysílače/přijímače objeví jisté, přesně definované, poruchy. Rozpojení konkrétních spínačů provede vyučující.

Při lokalizaci poruchy je nejvhodnější postupovat od zdroje signálu směrem k výstupu – u optického vysílače tedy postupujte směrem od zdroje signálu ke zdroji záření, u optického přijímače postupujte od vstupních obvodů k výstupu. Je vhodné využívat kontrolních bodů – závada se vyskytuje v oblasti dvou sousedních kontrolních bodů, kdy na jednom se signál ze vstupu ještě stále nachází a na druhém již není. Na blokovém schématu optického vysílače a přijímače je dobře vidět souvislost jednotlivých kontrolních bodů a funkčních bloků zařízení. Závady se vždy vyskytují na integrovaných obvodech, proto neuvažujte možné poruchy ostatních součástek (odporů, kondenzátorů). Pokud naleznete oblast poruchy zařízení, můžete se pokusit poruchu přesněji lokalizovat kontrolou funkce jednotlivých integrovaných obvodů za využití přiložených datových listů.

5. Zpracování

5.1 Seznámení se s optickým přijímačem a vysílačem

5.2 Přenos nf signálu optickým vláknem

Po nastavení optického vysílače a přijímače dle pokynů v zadání byl výkon P měřený na optickém přijímači, při kterém ještě nedocházelo ke zkreslení signálu, roven -12,5 dBm při kmitočtu 1 kHz.

Při změně frekvence signálu je přijatý výkon při použití fotodetektoru č.1 stabilní a výrazněji začne klesat až od velmi nízkých frekvencí – 5Hz a méně. Změny výkonu při změně frekvence jsou patrnější u fotodetektoru č. 2, kde dochází k poklesu přijatého výkonu už od hodnoty asi 80Hz. Naopak při zvyšování frekvence klesá přijatý výkon u obou detektorů pomaleji.

Fotodetektor č.2 (Si PIN fotodioda 2,5 mm) vykazoval vyšší přijatý výkon ve stejném pracovním bodě než fotodetektor č 1(Si PIN 1 mm). Čím větší aktivní plocha fotodetektoru je, tím vyšší výkon přijímá ovšem za cenu nárůstu časové konstanty τ , která je definována jako

$$\tau = w/v_T,$$

kde w je tloušťka vrstvy „I“ a v_T je rychlost nosičů náboje.

5.3 Přenos audio signálu

Pro simulaci přenosu audiosignálu byl použit sinusový průběh o kmitočtu 1 kHz. Nastavení bylo opět obdobné, jako v předchozím bodě, indikovaný přijímaný výkon bez vloženého útlumu byl $P = -12,3$ dBm. Do trasy byl vložen proměnný atenuátor, postupně jsme zvyšovali jeho výkon a pozorovali vliv útlumu na kvalitu přenosu.

Při vloženém útlumu 22 dB bylo pozorovatelné značné zdeformování signálu a i na poslech byl signál velmi špatný.

Pokud budeme uvažovat útlum optického vlákna $\alpha_{OV} = 0,5$ dB/km a zanedbáme útlum konektorů, dostáváme pro maximální možnou délku optického spoje:

$$l_{MAX} = \alpha_{vloz}/\alpha_{OV} = 22/0,5 = 44 \text{ km},$$

kde α_{vloz} je vložený útlum a α_{OV} je útlum optického vlákna.

5.4 Přenos video signálu

Nastavení optického vysílače i přijímače zůstávají stejné.

Při nulovém vloženém útlumu indikuje měřidlo přijímaný výkon $P = -21,1$ dBm. S rostoucím vloženým útlumem dochází nejprve k pozvolnému ztmavování obrazu, následně se ztrácí detaily a v obrazu přibývá černých ploch, s pokračujícím narůstajícím útlumem jsou na obrazovce patrné jen nejsvětlejší oblasti snímané scény a nakonec dojde k úplné ztrátě obrazu. Jako mezní hodnotu vloženého útlumu jsme zvolili hodnotu 9,2 dB, což je hodnota, při které je obraz viditelný sice špatně, ale ještě nedochází k úplné ztrátě synchronizace.

Podobně jako v předchozím bodě můžeme spočítat maximální délku trasy optického spoje

$$l_{\text{MAX}} = \alpha_{\text{vloz}} / \alpha_{\text{OV}} = 9,2 / 0,5 = 18,4 \text{ km},$$

kde α_{vloz} je vložený útlum a α_{OV} je útlum optického vlákna.

5.5. Simulace chyb

Zavedením poruchy na optickém vysílači a přijímači se ztratil signál na výstupu vysílače a tím i signál na výstupu optického přijímače. Pomocí sondy osciloskopu jsme zjistili, že signál, který do vysílače přivádíme na druhý kanál lze detekovat na TP1 a na dalším nejbližším TP, tedy na TP12 již signál není. Porucha se tak pravděpodobně nachází mezi těmito dvěma testovacími body. Pokud nebudeme uvažovat poruchy jiných součástek než integrovaných obvodů, je porucha možná u tří IO: IC7, IC8 a IC11. Pomocí měření na příslušných vývodech jednotlivých IO jsme odhalili, že integrovaný obvod IC8 (AD829) je vadný.

Po opravě závady na vysílači již vysílač vysílá signál, který přivádíme na jeho vstup, nicméně na výstupu přijímače stále není signál. Opět jsme tedy hledali testovací bod, na kterém ještě je signál. Tímto byl TP8. Na dalším nejbližším testovacím bodě, TP9 signál není, závada je tak zřejmě v oblasti zesilování signálu. Zde v úvahu připadají dva integrované obvody, IC17 a IC18. Po kontrole přítomnosti signálu na výstupních vývodech těchto integrovaných obvodů jsme odhalili, že je vadným IC18.

6. Závěr

Ze změřených hodnot je vidět, že při stejném nastavení optického vysílače a přijímače je maximální délka optovláknového spoje více než dvojnásobná při přenosu audiosignálu než při přenosu videosignálu. Při přenosu audiosignálu přenášíme signál o mnohem menší šířce pásma a proto může být v optické trase vyšší útlum.

Zavedené chyby se nám podařilo odhalit. U vysílače i přijímače se simulované chyby nacházely v oblasti zesílení signálu.

Jednotlivé body jsou dále podrobněji popsány výše.

A.2 Datové listy vybraných obvodů



High Speed, Low Noise Video Op Amp

AD829

FEATURES

High Speed

120 MHz Bandwidth, Gain = -1

230 V/ μ s Slew Rate

90 ns Settling Time to 0.1%

Ideal for Video Applications

0.02% Differential Gain

0.04° Differential Phase

Low Noise

1.7 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ Input Voltage Noise

1.5 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ Input Current Noise

Excellent DC Precision

1 mV max Input Offset Voltage (Over Temp)

0.3 μ V/ $^{\circ}\text{C}$ Input Offset Drift

Flexible Operation

Specified for ± 5 V to ± 15 V Operation

± 3 V Output Swing into a 150 Ω Load

External Compensation for Gains 1 to 20

5 mA Supply Current

Available in Tape and Reel in Accordance with

EIA-481A Standard

PRODUCT DESCRIPTION

The AD829 is a low noise (1.7 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$), high speed op amp with custom compensation that provides the user with gains from ± 1 to ± 20 while maintaining a bandwidth greater than 50 MHz. The AD829's 0.04° differential phase and 0.02% differential gain performance at 3.58 MHz and 4.43 MHz, driving reverse-terminated 50 Ω or 75 Ω cables, makes it ideally suited for professional video applications. The AD829 achieves its 230 V/ μ s uncompensated slew rate and 750 MHz gain bandwidth product while requiring only 5 mA of current from the power supplies.

The AD829's external compensation pin gives it exceptional versatility. For example, compensation can be selected to optimize the bandwidth for a given load and power supply voltage. As a gain-of-two line driver, the -3 dB bandwidth can be increased to 95 MHz at the expense of 1 dB of peaking. In addition, the AD829's output can also be clamped at its external compensation pin.

The AD829 has excellent dc performance. It offers a minimum open-loop gain of 30 V/mV into loads as low as 500 Ω , low input voltage noise of 1.7 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$, and a low input offset voltage of 1 mV maximum. Common-mode rejection and power supply rejection ratios are both 120 dB.

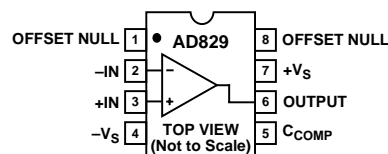
The AD829 is also useful in multichannel, high speed data conversion where its fast (90 ns to 0.1%) settling time is of importance. In such applications, the AD829 serves as an input buffer for 8-to-10-bit A/D converters and as an output I/V converter for high speed D/A converters.

REV. D

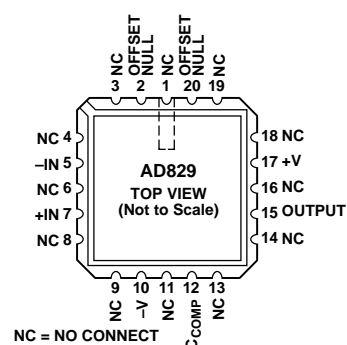
Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices.

CONNECTION DIAGRAMS

8-Lead Plastic Mini-DIP (N),
Cerdip (Q) and SOIC (R) Packages



20-Lead LCC Pinout



The AD829 provides many of the same advantages that a transimpedance amplifier offers, while operating as a traditional voltage feedback amplifier. A bandwidth greater than 50 MHz can be maintained for a range of gains by changing the external compensation capacitor. The AD829 and the transimpedance amplifier are both unity gain stable and provide similar voltage noise performance (1.7 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$). However, the current noise of the AD829 (1.5 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$) is less than 10% of the noise of transimpedance amps. Furthermore, the inputs of the AD829 are symmetrical.

PRODUCT HIGHLIGHTS

1. Input voltage noise of 2 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$, current noise of 1.5 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ and 50 MHz bandwidth, for gains of 1 to 20, make the AD829 an ideal preamp.
2. Differential phase error of 0.04° and a 0.02% differential gain error, at the 3.58 MHz NTSC and 4.43 MHz PAL and SECAM color subcarrier frequencies, make it an outstanding video performer for driving reverse-terminated 50 Ω and 75 Ω cables to ± 1 V (at their terminated end).
3. The AD829 can drive heavy capacitive loads.
4. Performance is fully specified for operation from ± 5 V to ± 15 V supplies.
5. Available in plastic, cerdip, and small outline packages. Chips and MIL-STD-883B parts are also available.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.
Tel: 781/329-4700 World Wide Web Site: <http://www.analog.com>
Fax: 781/326-8703 © Analog Devices, Inc., 1998

LM386

Low Voltage Audio Power Amplifier

General Description

The LM386 is a power amplifier designed for use in low voltage consumer applications. The gain is internally set to 20 to keep external part count low, but the addition of an external resistor and capacitor between pins 1 and 8 will increase the gain to any value up to 200.

The inputs are ground referenced while the output is automatically biased to one half the supply voltage. The quiescent power drain is only 24 milliwatts when operating from a 6 volt supply, making the LM386 ideal for battery operation.

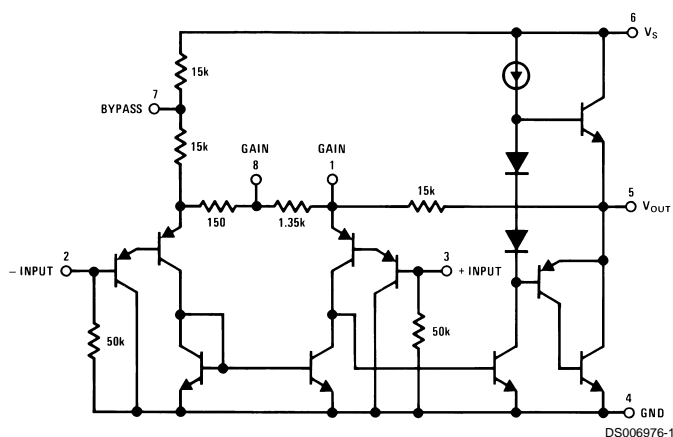
Features

- Battery operation
- Minimum external parts
- Wide supply voltage range: 4V–12V or 5V–18V
- Low quiescent current drain: 4 mA
- Voltage gains from 20 to 200
- Ground referenced input
- Self-centering output quiescent voltage
- Low distortion
- Available in 8 pin MSOP package

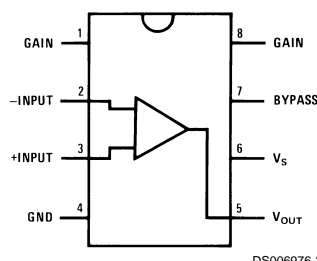
Applications

- AM-FM radio amplifiers
- Portable tape player amplifiers
- Intercoms
- TV sound systems
- Line drivers
- Ultrasonic drivers
- Small servo drivers
- Power converters

Equivalent Schematic and Connection Diagrams



**Small Outline,
Molded Mini Small Outline,
and Dual-In-Line Packages**



Top View

Order Number LM386M-1,
LM386MM-1, LM386N-1,
LM386N-3 or LM386N-4
See NS Package Number
M08A, MUA08A or N08E

74HC4052; 74HCT4052

Dual 4-channel analog multiplexer/demultiplexer

Rev. 10 — 19 July 2012

Product data sheet

1. General description

The 74HC4052; 74HCT4052 is a high-speed Si-gate CMOS device and is pin compatible with the HEF4052B. The device is specified in compliance with JEDEC standard no. 7A.

The 74HC4052; 74HCT4052 is a dual 4-channel analog multiplexer/demultiplexer with common select logic. Each multiplexer has four independent inputs/outputs (pins nY0 to nY3) and a common input/output (pin nZ). The common channel select logics include two digital select inputs (pins S0 and S1) and an active LOW enable input (pin \bar{E}). When pin \bar{E} = LOW, one of the four switches is selected (low-impedance ON-state) with pins S0 and S1. When pin \bar{E} = HIGH, all switches are in the high-impedance OFF-state, independent of pins S0 and S1.

V_{CC} and GND are the supply voltage pins for the digital control inputs (pins S0, S1 and \bar{E}). The V_{CC} to GND ranges are 2.0 V to 10.0 V for the 74HC4052 and 4.5 V to 5.5 V for the 74HCT4052. The analog inputs/outputs (pins nY0 to nY3 and nZ) can swing between V_{CC} as a positive limit and V_{EE} as a negative limit. $V_{CC} - V_{EE}$ may not exceed 10.0 V.

For operation as a digital multiplexer/demultiplexer, V_{EE} is connected to GND (typically ground).

2. Features and benefits

- Wide analog input voltage range from -5 V to +5 V
- Low ON resistance:
 - ◆ 80 Ω (typical) at $V_{CC} - V_{EE} = 4.5$ V
 - ◆ 70 Ω (typical) at $V_{CC} - V_{EE} = 6.0$ V
 - ◆ 60 Ω (typical) at $V_{CC} - V_{EE} = 9.0$ V
- Logic level translation: to enable 5 V logic to communicate with ± 5 V analog signals
- Typical 'break before make' built-in
- Complies with JEDEC standard no. 7A
- ESD protection:
 - ◆ HBM JESD22-A114F exceeds 2000 V
 - ◆ MM JESD22-A115-A exceeds 200 V
 - ◆ CDM JESD22-C101E exceeds 1000 V
- Specified from -40 °C to +85 °C and -40 °C to +125 °C



5. Functional diagram

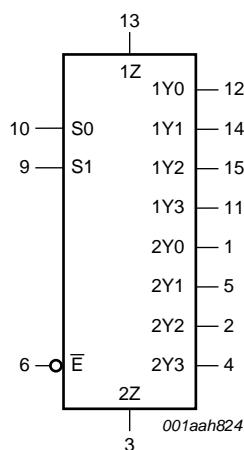


Fig 1. Logic symbol

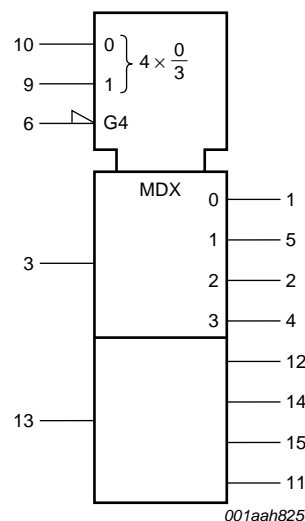


Fig 2. IEC logic symbol

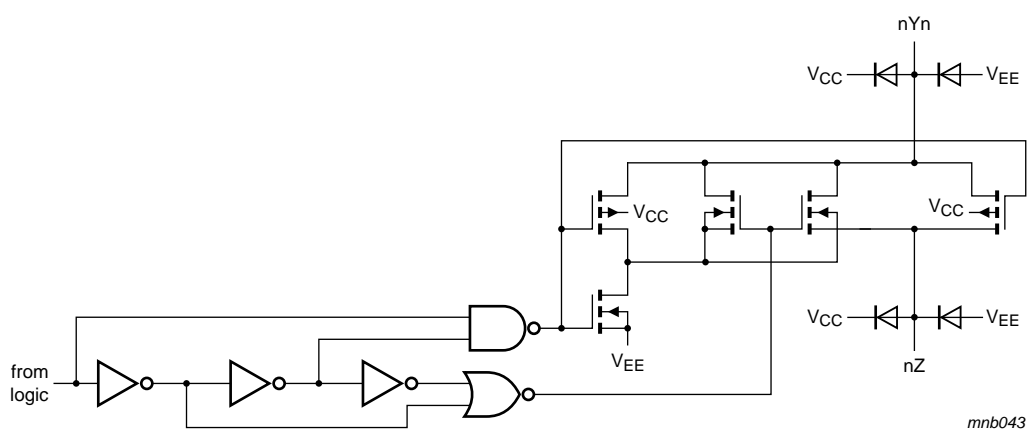


Fig 3. Schematic diagram (one switch)

B PŘENOS TTL SIGNÁLU OPTICKÝM VLÁKNEM

B.1 Vzorový protokol

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně		Předmět: Optoelektronika	
Jméno studenta:		Skupina:	Dne:
Číslo a název úlohy: 6. PŘENOS TTL SIGNÁLU OPTICKÝM VLÁKNEM			

1. Teoretické poznatky

TTL signál je binární signál založený na standartu TTL (transistor-to-transistor logic). Úroveň logické nuly je 0 V – 0,8 V, úroveň logické jedničky je 2 V až 5 V. Napětí ležící mezi 0,8 V až 2 V leží v tzv. zakázaném pásmu. TTL signál je běžně používán pro přenos informací a dat uvnitř elektrického zařízení.

Ve cvičení se studenti seznámí s funkčními bloky, ze kterých se skládá optický vysílač i přijímač pro přenos digitálních signálů a rovněž bude ukázán vliv útlumu, nedokonalého spojení optických vláken a změn frekvence na užitečný signál. Po absolvování této úlohy by měly být studenti schopni vyjádřit se k výhodám a nevýhodám přenosu digitálního signálu oproti signálu analogovému.

2. Zadání

2.1 Seznamte se s optickým vysílačem a přijímačem, pomocí kterých budete přenos TTL signálu realizovat. Pomocí osciloskopu zobrazte průběh proudu zátěží pro různá nastavení logiky vysílače. U optického přijímače experimentujte s nastavením rozhodovací úrovně komparátoru a s vlivem zesílení vstupního signálu na jeho dynamiku.

2.2 Do optické trasy vložte proměnný atenuátor a určete maximální hodnotu útlumu, pro který ještě nedojde ke ztrátě signálu na výstupu optického přijímače. Ze změřené hodnoty mezního útlumu určete maximální teoretickou délku optické trasy.

2.3 Pozorujte vliv rostoucí frekvence na tvar signálu na výstupu optického přijímače.

2.4 Lokalizujte poruchu v optickém vysílači/přijímači, která bude realizována pomocí simulátoru chyb.

3. Použité přístroje

- Multifunkční optický vysílač EF-970B/E
- Multifunkční optický přijímač EF-970B/R
- Osciloskop Agilent Technologies DSO3102A
- Propojovací optické kabely
- Proměnný atenuátor s nastavitelným útlumem

4. Pracovní postup

Blíže k bodu 2.1:

Optický vysílač nastavte následovně: vstup DIGITAL (positive); kanál CH1; výstup: zdroj č.5 (laser 850 nm); **Optický přijímač** nastavte následovně: kanál DIGITAL; vstup: fotodetektor č.1. **Nastavení generátoru:** průběh: square; frekvence 1 kHz; amplituda 3,3 V;

offset +1,65 V; duty cycle 50%. Nastavený TTL generátor připojte k digitálnímu vstupu optického vysílače a k prvnímu kanálu osciloskopu. Druhý kanál osciloskopu připojte na TP10, čímž zobrazíte proud zátěží. Na vysílači nastavte maximální amplitudu signálu, při které ještě nedojde ke zkreslení průběhu proudu. Na vysílači změňte logiku z pozitivní na negativní a pozorujte změny průběhu proudu. Zaznamenejte průběhy pro pozitivní i negativní nastavení logiky a průběhy komentujte.

Propojte optický vysílač a přijímač. První kanál osciloskopu ponechte na vstupu optického vysílače a druhý kanál umístěte na TP16 optického přijímače. Rozhodovací úroveň komparátoru na výstupu přijímače lze měnit potenciometry P4 a P6. Experimentujte s jejich nastavením. Najděte optimální nastavení rozhodovací úrovně komparátoru a na optickém vysílači změňte hodnotu zesílení vstupního signálu. Pozorujte vliv této změny na dynamiku komparátoru.

Blíže k bodu 2.2:

Do optické trasy umístěte proměnný attenuátor, s jehož pomocí určete mezní hodnotu útlumu, kdy ještě nedojde ke ztrátě výstupního signálu. Pro uvažovaný útlum optického vlákna $\alpha_{OV} = 0,5\text{dB/km}$ určete maximální teoretickou délku optické trasy. Útlum konektorů zanedbejte.

Blíže k bodu 2.3:

Z optické trasy vyjměte attenuátor a na generátoru zvyšujte frekvenci TTL signálu. Zakreslete výstupní průběh signálu z optického přijímače pro frekvenci 1 kHz a dále pro zvolenou vyšší frekvenci, na které budou patrné změny ve tvaru signálu.

Blíže k bodu 2.4:

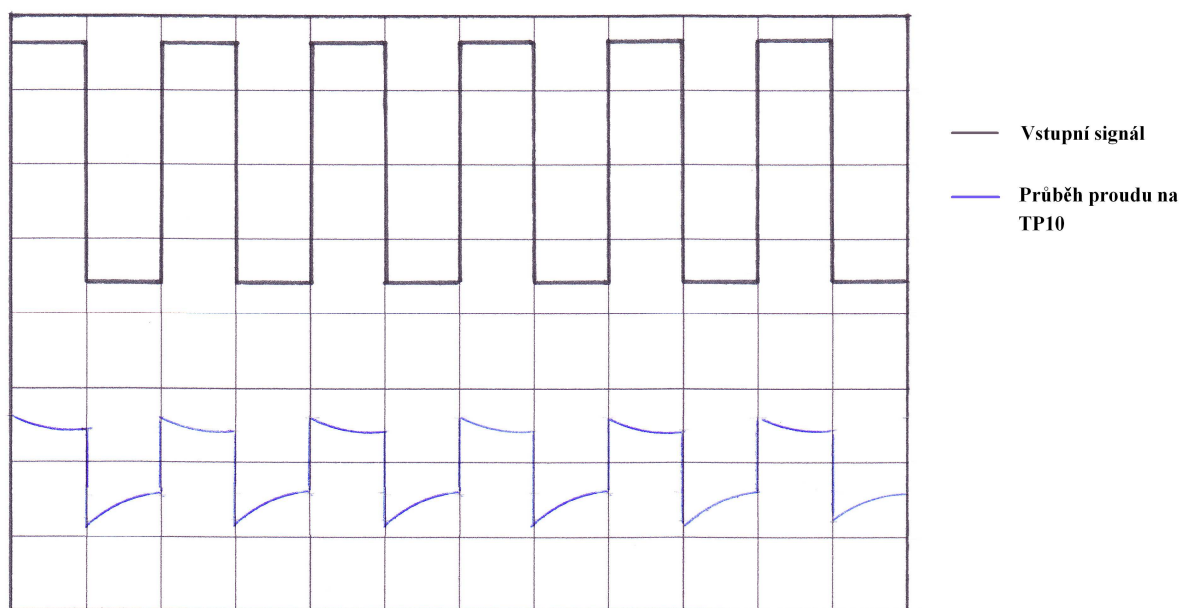
Optický vysílač i přijímač jsou vybaveny simulátorem chyb, který představuje pole osmi spínačů, jejichž rozpojením se v obvodech vysílače/přijímače objeví jisté, přesně definované, poruchy. Rozpojení konkrétních spínačů provede vyučující.

Při lokalizaci poruchy je nejvhodnější postupovat od zdroje signálu směrem k výstupu – u optického vysílače tedy postupujte směrem od zdroje signálu ke zdroji záření, u optického přijímače postupujte od vstupních obvodů k výstupu. Je vhodné využívat kontrolních bodů – závada se vyskytuje v oblasti dvou sousedních kontrolních bodů, kdy na jednom se signál ze vstupu ještě stále nachází a na druhém již není. Na blokovém schématu optického vysílače a přijímače je dobře vidět souvislost jednotlivých kontrolních bodů a funkčních bloků zařízení. Závady se vždy vyskytují na integrovaných obvodech, proto neuvažujte možné poruchy ostatních součástek (odporů, kondenzátorů).

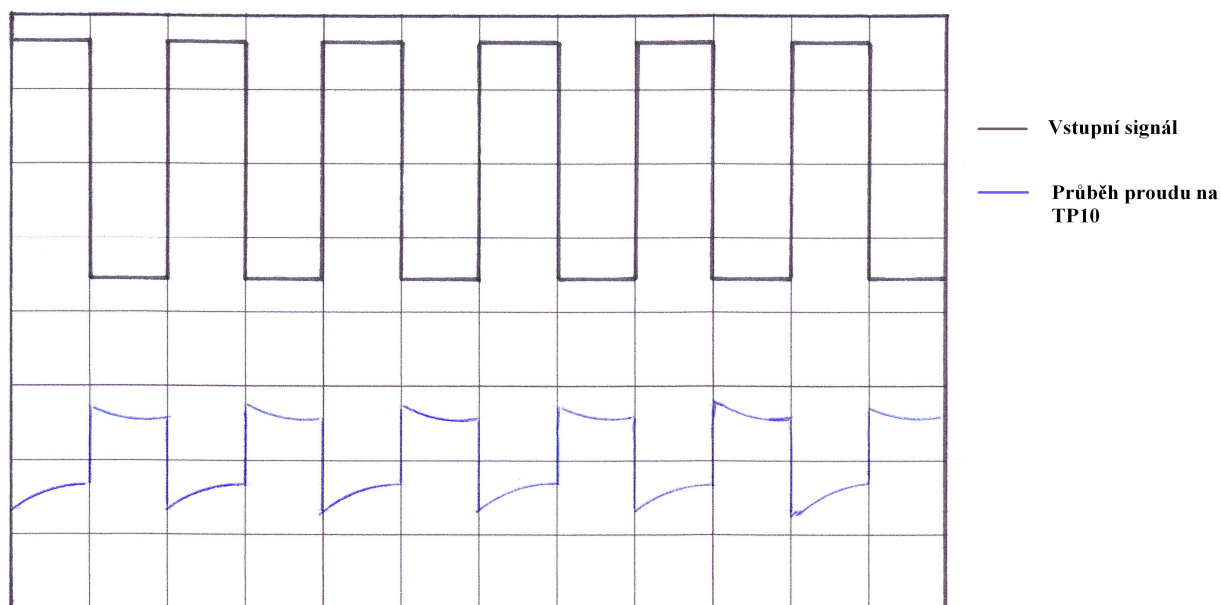
5. Zpracování

5.1 Průběh proudu zátěží a rozhodovací úrovně komparátoru

Při nastavení optického vysílače, přijímače a generátor podle pokynů jsme zakreslili dva oscilogramy. Na Obr.1 je oscilogram pro nastavení logiky na „positive”. Průběh proudu zátěží kopíruje průběh vstupního signálu. Nastavení osciloskopu bylo následující: nastavení časové základny: 500 $\mu\text{s/d}$; CH1: 2 V/d; CH2: 10 mV/d.



Obr.1: Oscilogram průběhu vstupního signálu a proudu zátěží pro nastavení „positive”



Obr.2: Oscilogram průběhu vstupního signálu a proudu zátěží pro nastavení „negative”

Na Obr.2 je zaznamenán průběh proudu zátěží pro nastavení „negative”. Úrovně průběhu proudu jsou opačné vzhledem k úrovním vstupního signálu. Nastavení osciloskopu bylo stejné jako při zaznamenání prvního obrázku, tedy nastavení časové základny: $500\mu\text{s/d}$; CH1: 2 V/d ; CH2: 10 mV/d .

Dále jsme propojili optický vysílač a přijímač a provedli optimální nastavení rozhodovací úrovně komparátoru. Pokud nyní změníme zesílení signálu potenciometrem P1 na vysílači, úroveň výstupního signálu zůstane nezměněná, avšak při současném měnění rozhodovací úrovně zjistíme, že se mění dynamický rozsah pro nastavení rozhodovací úrovně. Pokud snižujeme zisk na vysílači, klesá i dynamický rozsah komparátoru přijímače.

5.2 Útlum optické trasy

Při tomto měření vložíme mezi optický vysílač a přijímač proměnný attenuátor, postupně zvyšujeme vložený útlum α a odečítáme hodnotu přijímaného výkonu P na miliwattmetru nastaveném v režimu digital.

α	P
[dB]	[dBm]
0	-13,80
10	-24,00
12	-25,70

Tab.1: Měření přijímaného výkonu v závislosti na vloženém útlumu.

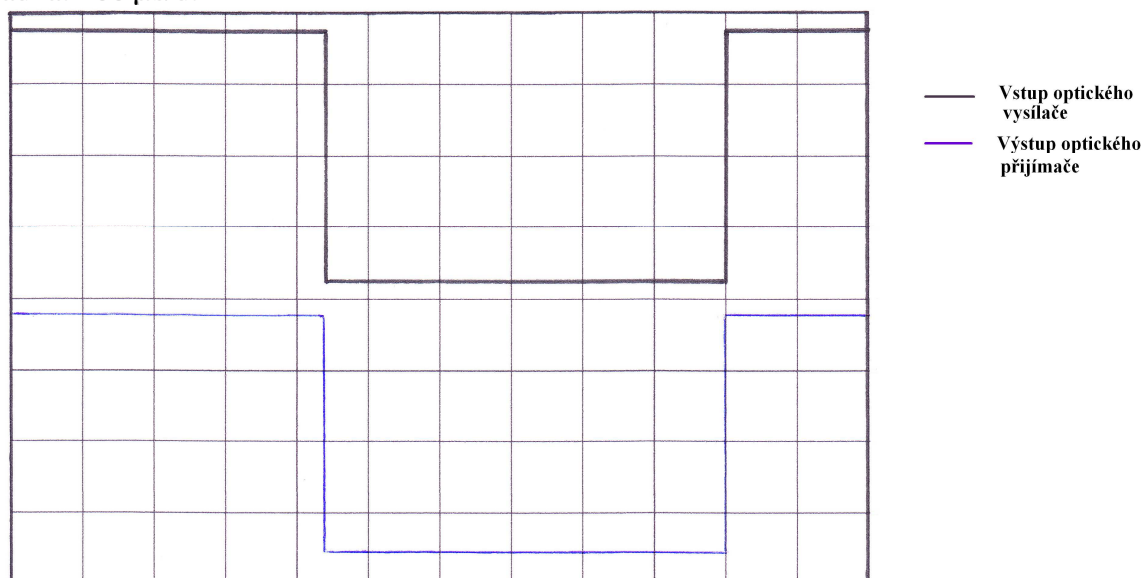
Hodnota vloženého útlumu 12 dB je mezní hodnota, při které ještě nedošlo ke ztrátě signálu, při dalším navyšování útlumu již nebyl signál detekovatelný. Pokud chceme znát maximální délku trasy, kterou lze za těchto podmínek realizovat, musíme znát útlum vlákna. V současné době se útlum u křemíkových vláken pohybuje v desetinách decibelu na kilometr, budeme tedy uvažovat útlum 0,5 dB/km.

$$l_{\text{MAX}} = 12/0,5 = 24 \text{ km.}$$

5.3 Vliv rostoucího kmitočtu na tvar TTL signálu

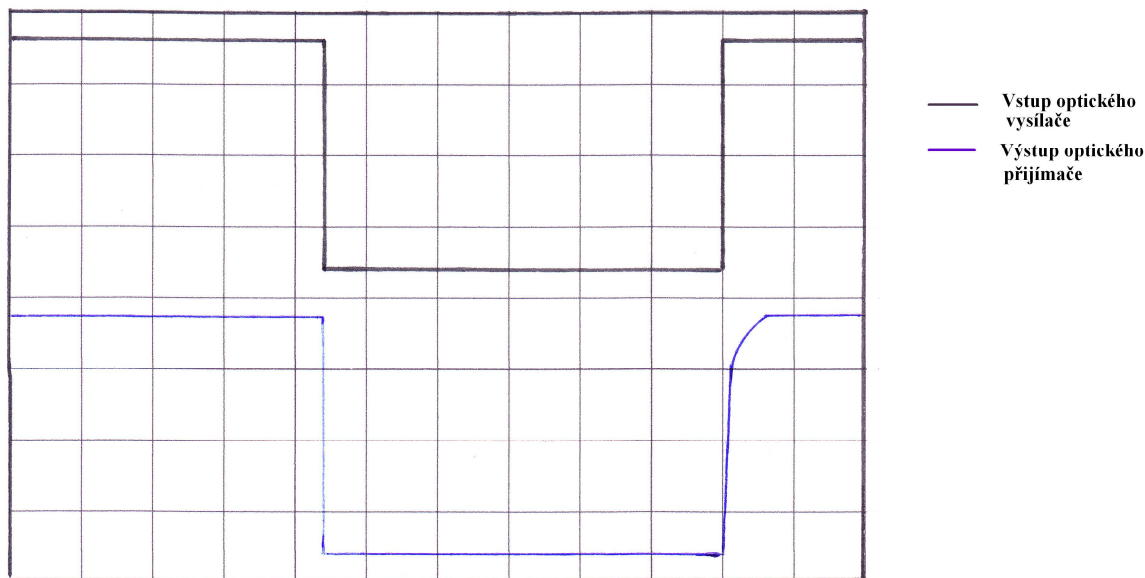
S rostoucím kmitočtem vstupního TTL signálu dochází ke zkreslení náběžné hrany TTL signálu, což je ilustrováno na následujících dvou oscilogramech.

Na obr.3 je zachycen vstupní signál do optické vysílače a výstupní signál z přijímače při kmitočtu 1 kHz. Nastavení osciloskopu bylo následující: CH1: 2 V/d, CH2: 2 V/d, časová základna: 100 $\mu\text{s}/\text{d}$.



Obr.3: Vstupní signál do optického vysílače a výstupní signál z optického přijímače při frekvenci 1 kHz.

Na Obr.4 jsou zaznamenány ty samé průběhy při frekvenci 18 kHz. Již při této frekvenci je patrné zkreslení náběžné hrany signal z optického přijímače. Měřením na osciloskopu pomocí kurzorů jsme zjistili, že se náběžná hrana prodloužila o 800 ns. Nastavení osciloskopu bylo následující: CH1: 2 V/d, CH2: 2 V/d, časová základna: 5 μ s/d.



Obr.4: Vstupní signál do optického vysílače a výstupní signál z optického přijímače při frekvenci 18 kHz.

5.4 Simulátor poruch

Po zavedení poruch vyučujícím došlo ke ztrátě signal na výstupu optického vysílače, stejně jako i přijímače. Na obou přístrojích rovněž přestala fungovat měřidla.

Jako první jsme se soustředili na optický vysílač. Pomocí sondy osciloskopu jsme ověřili, že na vstupu vysílače je signál, dále jsme postupovali po jednotlivých TP a kontrolovali přítomnost signálu. Tímto postupem jsme lokalizovali chybu mezi TP7 a TP11. Mezi těmito kontrolními body se nachází IC5 – 74HC4052. Jde o multiplexor/demultiplexor, který zajišťuje výběr kanálu a příslušného vstupu.

Po odstranění této závady jsme již získali signal na výstupu optického vysílače, nicméně na výstupu přijímače se signál stále nenacházel. Podobným postupem jako u hledání poruchy u vysílače jsme lokalizovali poruchu mezi TP6 a TP16, kde se nachází integrovaný obvod zajišťující zesílení digitálního signálu.

6. Závěr

Průběh proudu zátěží a vliv zesílení vstupního signálu na rozhodovací úroveň komparátoru je popsán v bode 5.1.

Maximální délka optické trasy při zanedbání útlumu konektorů nám vyšla 24 kilometrů. Je to méně, než při přenosu analogového signálu z úlohy číslo 5, protože obdélníkový signál má větší šířku pásma než signál sinusový.

Rostoucí kmitočet způsobuje prodloužení náběžné hrany signálu. Dle přiloženého blokového schemata je maximální kmitočet digitálního signálu 500 kHz, což je mezní kmitočet pásmových propustí zařazených před zesilovačem signálu a před komparátorem.

Do optického vysílače a přijímače byly zavedeny vyučujícím dvě poruchy. Porucha vysílače se nacházela v oblasti výběru kanálu a porucha v přijímači vyřadila z činnosti zesilovač přijímaného signálu.