

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

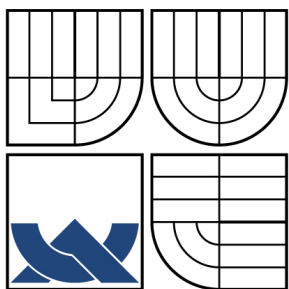
OPTICKÝ SPOJ PRO VNITŘNÍ BEZKABELOVOU SÍŤ

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

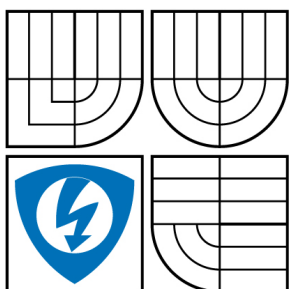
Bc. PETRA HRBÁČKOVÁ

BRNO 2010



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

OPTICKÝ SPOJ PRO VNITŘNÍ BEZKABELOVOU SÍŤ

OPTICAL LINK INTENDED FOR INDOOR NETWORK

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

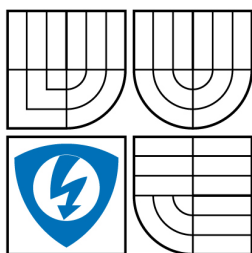
Bc. PETRA HRBÁČKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. OTAKAR WILFERT, CSc.

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Studentka: Bc. Petra Hrbáčková

ID: 74574

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Optický spoj pro vnitřní bezkabelovou síť

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou optických bezkabelových spojů určených pro vnitřní síť a nastudujte směrovou odrazivost povrchů. Sestavte výkonovou bilanční rovnici spoje. Vytvořte program pro modelování směrových odrazivých vlastností povrchů stěn místnosti a pro modelování výkonového úrovnového diagramu spoje. V experimentální části své práce navrhnete vysílací a přijímací část spoje. Navržený spoj sestavte a proveďte základní měření ověřující správnou funkci spoje.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Wireless LAN Systems. Ed: SANTAMARIA, A., LOPEZ-HERNANDEZ, F.J. London: Artech House, 1994.

[2] PUŽMANOVÁ, R. Moderní komunikační sítě. Praha: Computer Press, 1998.

[3] WILFERT, O., PROKEŠ, A. Měření efektivní odrazné plochy v pásmu 850 nm. In Radioelektronika 95, 2. díl. Brno: VUT v Brně, 2003, s. 239 - 242.

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 21.5.2010

Vedoucí práce: prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc.

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Diplomová práce rozebírá strukturu bezvláknové optické linky. Jako základní prvky optické linky jsou popsány optické vysílače, optické přijímače, jejich vlastnosti a princip zapojení. Uvedeny jsou charakteristiky čoček použitých ve vysílači a přijímači. Zvláštní kapitola je věnována směrové odrazivosti povrchů. Závěrečná část diplomové práce je zaměřena na konkrétní návrh bezvláknové optické linky a stanovení jejího úrovněvého diagramu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Bez kabelový optický spoj, optický přijímač, optický vysílač, směrová odrazivost povrchu, výkonový úrovněvý diagram.

ABSTRACT

This thesis deals with the structure of the optical wireless link intended for indoor applications. Optical transmitters and optical receivers as the basic elements of optical links and their characteristics and parameters are described. The characteristics of lenses used in the transmitter and receiver are presented. The special chapter is devoted to the directional reflectance properties of surfaces. The last part of the thesis is focused on a specific proposal of the wireless optical links and its power level diagram.

KEYWORDS

Wireless optical links, optical receiver, optical transmitter, directional reflectance of surface, power level diagram.

HRBÁČKOVÁ, Petra *Optický spoj pro vnitřní bezkabelovou síť*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2010. 83 s. Vedoucí práce byl prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Optický spoj pro vnitřní bezkabelovou síť“ jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a plně jsem si vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

Děkuji vedoucímu diplomové práce
prof. Ing. Otakaru Wilfertovi, CSc. za
účinnou metodickou, pedagogickou a
odbornou pomoc a za další cenné rady při
zpracování mé diplomové práce.

OBSAH

Úvod	14
1 Optické vnitřní bezdrátové sítě	15
1.1 Úvod do problematiky vnitřních bezdrátových sítí	15
1.2 Technologie vnitřních bezdrátových sítí	15
1.3 Základní rozdělení vnitřních bezdrátových sítí	17
1.4 Směrování diplomové práce	20
2 Optické vysílače pro vnitřní bezdrátové sítě	21
2.1 Laserové vysílače	21
2.2 LED vysílače	22
2.3 Optické čočky	23
2.4 Systémové řešení vysílače	27
3 Odrazné vlastnosti povrchů	30
3.1 Úvod do problematiky směrové odraznosti ploch	30
3.2 Model odrazných vlastností difúzních ploch	34
3.3 Experimentální měření odrazných ploch	37
3.3.1 Odrazná plocha - bílý matný povrch	38
3.3.2 Odrazná plocha - bílý lesklý povrch	40
3.3.3 Odrazná plocha - reflexní materiál	43
4 Optické přijímače pro vnitřní bezkabelovou síť	47
4.1 Fotodiody	47
4.1.1 PIN fotodiody	47
4.1.2 Lavinové fotodiody	47
4.2 Systémové řešení přijímače	48
5 Přenosové vlastnosti navrhovaného spoje	49
5.1 Obecné schéma optické bezkabelové sítě	49
5.2 Parametry optické bezkabelové sítě	50
5.3 Popis výkonového úrovněového diagramu	51
5.4 Návrh kvazidifúzní pasivní optické bezkabelové linky	56
5.4.1 Koncepce kvazidifúzní pasivní optické bezkabelové linky	56
5.4.2 Výkonový úrovněový diagram kvazidifúzní pasivní optické bezkabelové linky	59
5.5 Návrh kvazidifúzní aktivní optické bezkabelové linky	62
5.5.1 Koncepce kvazidifúzní aktivní optické bezkabelové linky	62

5.5.2	Výkonový úrovnňový diagram kvazidifúzní aktivní optické bez- kabelové linky	65
5.6	Bezpečnost bezdrátové optické komunikace	66
6	Závěr	67
	Literatura	68
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	70
	Seznam příloh	74
A	Návrhy desek plošných spojů	75
A.1	Deska plošných spojů pro optickou kvazidifúzní pasivní linku	75
A.2	Seznam součástek pro optickou kvazidifúzní pasivní linku	75
A.3	Desky plošných spojů pro optickou kvazidifúzní aktivní linku	76
A.4	Seznam součástek pro optickou kvazidifúzní aktivní linku	77
A.5	Průběhy z měření přenášených dat	79
A.6	Fotografie digitálního přijímače a vysílače	81
A.7	Přehled parametrů přijímače OPT 101	81
B	Simulační program matematického modelu odrazných ploch	83

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Vícecestná časová disperze.	16
1.2	Difúzní metoda vnitřní přenosové linky.	17
1.3	Kvazidifúzní metoda vnitřní přenosové linky.	18
1.4	Kvazidifúzní pasivní metoda vnitřní přenosové linky.	19
1.5	Kvazidifúzní aktivní metoda vnitřní přenosové linky.	19
2.1	Přechod p - n zapojený v propustném směru umožňuje přísun elektronů do materiálu typu n a děr do materiálu typu p (převzato z [3]).	21
2.2	Příčný řez diodou LED (převzato z [3]).	23
2.3	Různé typy optických soustav (převzato z [13]).	24
2.4	Přehled kolektivních optických soustav pro zobrazení konečných bodů (převzato z [13]).	25
2.5	Přehled kolektivních optických soustav pro zobrazení bodu v nekonečnu (převzato z [13]).	26
2.6	Přehled teleskopických soustav (převzato z [13]).	26
2.7	Princip Fresnelovy čočky - řez Fresnelovo (vlevo) a běžnou (vpravo) čočkou (převzato z [16])	26
2.8	Světelná charakteristika laserové a LED diody (převzato z [5]).	28
2.9	Tři základní varianty dvoustavových modulací. A, binární modulační signál PCM; B, signál ASK s klíčováním amplitudy; C, signál FSK s klíčováním frekvence; D, signál PSK s klíčováním fáze (převzato z [6]).	28
3.1	Různé způsoby odrazů na odrazné ploše (převzato z [7]).	30
3.2	Úhel polovičního jasu (převzato z [10]).	32
3.3	Koeficient rozptylu (převzato z [10]).	32
3.4	Charakteristika rozptylu pro Lambertovu odraznou plochu o velikosti $A_n = 1, n = 2$	34
3.5	Charakteristika rozptylu pro smíšenou odraznou plochu: $A_n = 1, n = 10$	35
3.6	Charakteristika rozptylu pro smíšenou odraznou plochu: $A_n = 1, n = 40$	35
3.7	Charakteristika rozptylu pro smíšenou odraznou plochu: $A_n = 1, n = 100$	35
3.8	2D charakteristika rozptylu vybrané plochy při osové kruhové symetrii pro $A_n = 1, n = 2; 10; 20; 40; 100$ (mimo koutového odražeče).	36
3.9	Měřicí komora.	37
3.10	Princip měření poměrné směrové odrazivosti.	38
3.11	Výsledná charakteristika optické relativní intenzity na Lambertově ploše.	39

3.12	Graf dopadajícího optického signálu na matici přijímačů z Lambertovy plochy. Vpravo - celoplošné zobrazení LED zdroje; vlevo - vybraná středová část LD zdroje.	39
3.13	Charakteristika odrazné Lambertovy plochy při změně směru zdroje záření. Červená křivka - bez použití Fresnelovy čočky; modrá křivka - s Fresnelovou čočkou; zelená křivka - simulovaná funkce cosinus (viz kapitola 3.2).	40
3.14	Výsledná charakteristika optické relativní intenzity na smíšené ploše.	41
3.15	Graf dopadajícího optického signálu na matici fotodetektorů ze smíšené plochy. Vpravo - celoplošné zobrazení LED; vlevo - vybraná středová část LD.	41
3.16	Charakteristika odrazné smíšené plochy (fotopapír) při změně směru zdroje záření. Červená křivka - bez použití Fresnelovy čočky; modrá křivka - s Fresnelovou čočkou; zelená křivka - simulovaná funkce cosinus (viz kapitola 3.2).	42
3.17	Principy reflexních ploch 3M Scotchlite (převzato z [14]).	43
3.18	Výsledná charakteristika optické relativní intenzity na reflexní ploše.	44
3.19	Graf dopadajícího optického signálu na matici fotodetektorů z reflexní plochy. Vpravo - celoplošné zobrazení LED; vlevo - vybraná středová část LD.	44
3.20	Charakteristika odrazné reflexní plochy při změně směru zdroje záření. Červená křivka - bez použití Fresnelovy čočky; modrá křivka - s Fresnelovou čočkou; zelená křivka - simulovaná funkce cosinus (viz kapitola 3.2).	45
3.21	Závislost zpětného odrazu na přijímaném úhlu (převzato z [15]).	46
3.22	Fotografie z měření odrazných ploch	46
5.1	Blokové schéma obecného komunikačního řetězce.	49
5.2	Obecný výkonový úrovnový diagram pro IWOL s využitím LD. (α_v - rozložení optického výkonu v kruhovém svazku, L_{vv} - útlum vazby na vysílací optické apertuře, L_p - útlum na odrazné ploše; L_o - útlum šířením; A_{vp} - zisk na přijímací optické apertuře; L_{vp} - útlum vazby na přijímací optické apertuře; P_{LD} - výkon laserové diody; P_s - saturační výkon; P_p - přijímaný výkon; P_o - citlivost přijímače; NEP - výkon ekvivalentní šumu; SNR - poměr signál/šum; ρ_{rez} - rezerva spoje; Δ - dynamika přijímače.)	51

5.3	Obecný výkonový úrovnový diagram pro IWOL s využitím LED. (α_v - rozložení optického výkonu v kruhovém svazku, L_{vv} - útlum vazby na vysílací optické apertuře, L_p - útlum na odrazné ploše; L_o - útlum šířením; A_{vp} - zisk na přijímací optické apertuře; L_{vp} - útlum vazby na přijímací optické apertuře; P_{LED} - výkon LED diody; P_s - saturační výkon; P_p - přijímaný výkon; P_o - citlivost přijímače; NEP - výkon ekvivalentní šumu; SNR - poměr signál/šum; ρ_{rez} - rezerva spoje; Δ - dynamika přijímače.)	52
5.4	Vlevo: Výkonový úrovnový diagram při příliš nízké hodnotě P_{LD} ; vpravo: Výkonový úrovnový diagram při příliš vysoké hodnotě P_{LD}	55
5.5	Blokové schéma kvazidifúzní pasivní optické bezkabelové linky. (VOS vysílací optická soustava, POS přijímací optická soustava.)	56
5.6	Schéma optického vysílače	57
5.7	Vlevo: Vyzařovací diagram IR diody LD 271; vpravo: Spektrální závislost IR diody LD 271 (převzato z [19])	57
5.8	Schéma optického přijímače	58
5.9	Fotografie optického přijímače	58
5.10	Výkonový úrovnový diagram optické kvazidifúzní pasivní linky s nekolimovaným zdrojem optického záření. (α_v - rozložení optického výkonu v kruhovém svazku, L_{vv} - útlum vazby na vysílací optické apertuře, L_p - útlum na odrazné ploše; L_o - útlum šířením; L_{vp} - útlum vazby na přijímací optické apertuře; P_{LED} - výkon LED diody; P_{sat} - saturační výkon; P_p - přijímaný výkon; P_o - citlivost přijímače; NEP - výkon ekvivalentní šumu.)	59
5.11	Výkonový úrovnový diagram optické kvazidifúzní pasivní linky s kolimovaným zdrojem optického záření bez použití Fresnelovy čočky. (α_v - rozložení optického výkonu v kruhovém svazku, L_{vv} - útlum vazby na vysílací optické apertuře, L_p - útlum na odrazné ploše; L_o - útlum šířením; L_{vp} - útlum vazby na přijímací optické apertuře; P_{LD} - výkon laserové diody; P_{sat} - saturační výkon; P_p - přijímaný výkon; P_o - citlivost přijímače; NEP - výkon ekvivalentní šumu.)	60
5.12	Výkonový úrovnový diagram optické kvazidifúzní pasivní linky s kolimovaným zdrojem optického záření a Fresnelovy čočky. (α_v - rozložení optického výkonu v kruhovém svazku, L_{vv} - útlum vazby na vysílací optické apertuře, L_p - útlum na odrazné ploše; L_o - útlum šířením; A_{vp} - zisk na přijímací optické apertuře; P_{LD} - výkon laserové diody; P_{sat} - saturační výkon; P_p - přijímaný výkon; P_o - citlivost přijímače; NEP - výkon ekvivalentní šumu.)	61

5.13	Blokové schéma kvazidifúzní aktivní optické bezkabelové linky. (<i>VOS</i> vysílací optická soustava, <i>POS</i> přijímací optická soustava.)	62
5.14	Schéma optického digitálního vysílače	63
5.15	Schéma optického digitálního přijímače	64
5.16	Fotografie optického digitálního vysílače a přijímače	64
5.17	Výkonový úrovnový diagram optické kvazidifúzní aktivní linky s nekolimovaným zdrojem optického záření. (α_v - rozložení optického výkonu v kruhovém svazku, L_{vv} - útlum vazby na vysílací optické apertuře, L_p - útlum na odrazné ploše; L_o - útlum šířením; L_{vp} - útlum vazby na přijímací optické apertuře; P_{LED} - výkon LED diody; P_{sat} - saturační výkon; P_p - přijímaný výkon; P_o - citlivost přijímače; NEP - výkon ekvivalentní šumu.)	65
A.1	Deska plošných spojů pro pasivní kvazidifúzní linku. Přijímač velikost 2:1	75
A.2	Deska plošných spojů pro aktivní kvazidifúzní linku. Digitální vysílač velikost 1,5:1	76
A.3	Deska plošných spojů pro aktivní kvazidifúzní linku. Digitální přijímač velikost 0,6:1	76
A.4	Časový průběh kódového slova IO MC 14506/27 (převzato z [20]).	79
A.5	Způsob kódování adresy IO MC 14506/27 (převzato z [20]).	79
A.6	Měřený časový průběh nastavené adresy	80
A.7	Měřený časový průběh vysílaných dat	80
A.8	Fotografie digitálního vysílače a přijímače	81
A.9	Vnitřní zapojení přijímače OPT 101 (převzato z [23])	82
A.10	Určení NEP přijímače OPT 101 (převzato z [23])	82

SEZNAM TABULEK

2.1	Přehled popisných parametrů pro zobrazovací systémy (převzato z [13]).	25
A.1	Seznam součástí pro analogový vysílač	75
A.2	Seznam součástí pro analogový přijímač	76
A.3	Seznam součástí pro digitální vysílač	77
A.4	Seznam součástí pro digitální vysílač	78
A.5	Přehled parametrů přijímače OPT 101	81
B.1	Výsledky směrové odrazivosti pro nelambertovské plochy ($n = 1 \div 10.$)	83

ÚVOD

Při optickém přenosu je nosičem informace optické záření. Změny jeho amplitudy, kmitočtu, fáze, polarizace a trvání mohou zobrazovat každá samostatně, nebo ve vhodné kombinaci přenášenou informaci. Pro optický přenos informace má význam oblast vlnových délek mezi 0,5 až 1,6 μm . Především oblast kolem 1,3 až 1,6 μm vykazuje menší ztráty Rayleighovým rozptylem, minimum hodnot absorpčních ztrát a minimum materiálové disperze. Pro tuto infračervenou oblast existují výkonné zdroje a detektory záření.

Světelným zdrojem bývá laser nebo luminiscenční dioda. Záření se moduluje v optickém modulátoru, nebo v případě polovodičového zdroje přímo změnou budícího proudu. Úkolem vysílací a přijímací části optického systému je převést optický signál s co nejnižšími ztrátami z vysílače do optického prostředí a dále na přijímací straně na fotodetektor. Přijímač přeměňuje světelný signál zpět na signál elektrický, přičemž přijímač musí zajistit optimální zpracování vzhledem k poměru signál - šum.

Optický spoj je ve své základní podobě tvořen modulovaným zdrojem záření, optickým prostředím a přijímačem záření. Vstupní a výstupní signál optického spoje je elektrický, a tak vysílací a přijímací část obsahuje kromě optoelektronických prvků a optických soustav také elektronické obvody pro zpracování vstupního a výstupního signálu.

Diplomová práce se zaměří na přenos optického výkonu z vysílače optického záření do přijímače optického záření bez pomoci optického vlákna. Tento přenos může být vhodně doplněn případnou optickou čočkou a toto zkvalitní přenášený světelný výkon. Budou studovány přenosové vlastnosti celku a řešeny případné změny optického výkonu při odlišných vlastnostech materiálů zdí a překážek v cestě optického svazku [1].

1 OPTICKÉ VNITŘNÍ BEZDRÁTOVÉ SÍTĚ

1.1 Úvod do problematiky vnitřních bezdrátových sítí

Optické sítě procházejí velkou revolucí, ať jsou to vláknové spoje na páteřních informačních sítích nebo bezvláknové směrové spoje v metropolitních sítích při přenosu informací z budovy na budovu. Optické sítě mohou dosahovat velmi vysokých přenosových rychlostí od desítek až po stovky Mbit/s. Optický signál oproti rádiovému signálu poskytuje větší šířku pásma pro přenos informace. Vnitřní optická bezdrátová síť využívá vlnovou délku světelného záření v infračervené oblasti. Světlo nemusí být směrováno přímo na přijímač infračerveného záření, ale může využívat ke svému přenosu odrazu paprsku od okolních překážek či stěn. Cílem práce je analýza vnitřní bezkabelové sítě provozované v rámci prostoru jedné místnosti.

Je studován vliv odrazných vlastností materiálů na přenášenou informaci a navrhován vhodný způsob přenosu informací v rámci jedné místnosti. Experimentálním postupem a srovnáváním výsledků je řešena vhodná distribuce signálu do prostoru, podmínky pro správný a bezchybný příjem signálu.

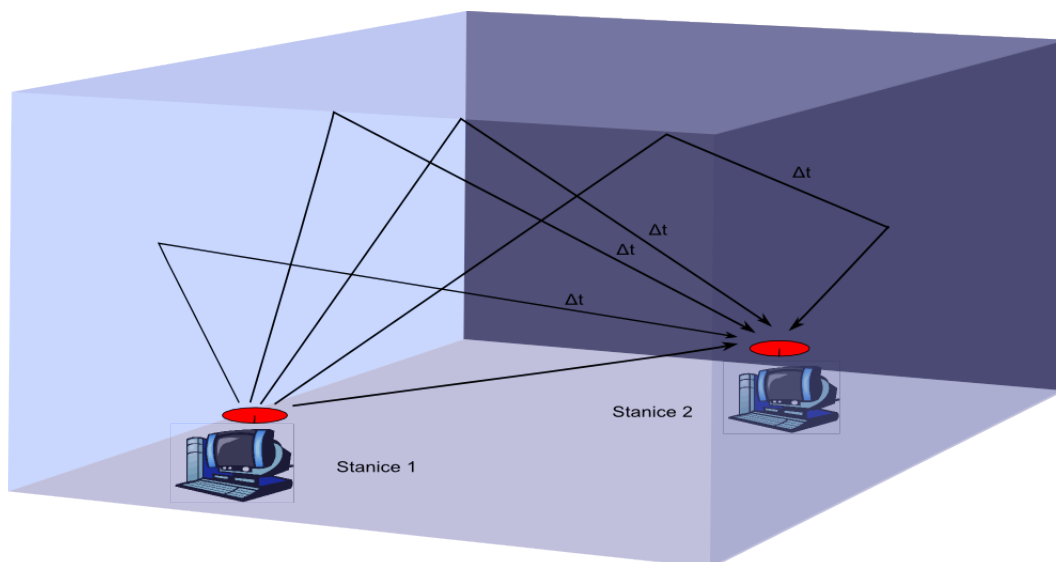
Závěr je zaměřen na jednoduchý návrh digitálního vysílače a digitálního přijímače pro linku, která využívá kodér a dekodér autonomní informace.

1.2 Technologie vnitřních bezdrátových sítí

Základní myšlenkou bezdrátové technologie WLAN je rozdělení budovy na buňky a navázání spojení buď mezi buňkami (cells), nebo uvnitř jedné buňky. Existuje několik způsobů, kterými je možné provést bezdrátové spojení mezi dvěma body, buď radiovým přenosem, nebo optickým signálem. Prozatím jenom tyto dva způsoby přenosu jsou schopny podporovat vysokorychlostní přenos ve vnitřních bezdrátových sítích mezi vysílačem a přijímačem a každá technologie má své specifické vlastnosti.

Pro bezdrátové systémy je nutné řešit tři různé problémy. V první řadě kmitočtové přidělení, problematiku rušení a bezpečnost obsluhy. Jelikož se tato práce zaměřuje pouze na přenos mezi dvěma body pomocí optického signálu, je uvažována problematika optických sítí. Mezi problémy, které vznikají u infračervených bezdrátových přenosů, patří velikost vysílaného výkonu, interferenční rušení ISI v místnosti a úroveň rušení okolními světelnými zdroji. Pro přenos se využívá buď úzkopásmových modulací, nebo širokopásmových modulací.

U úzkopásmových modulací je třeba vzít v úvahu častý vznik interferencí v průběhu přenosu (viz obr. 1.1), u širokopásmových modulací tento problém zaniká, ale stoupá obvodová náročnost vysílačích a přijímacích prvků.



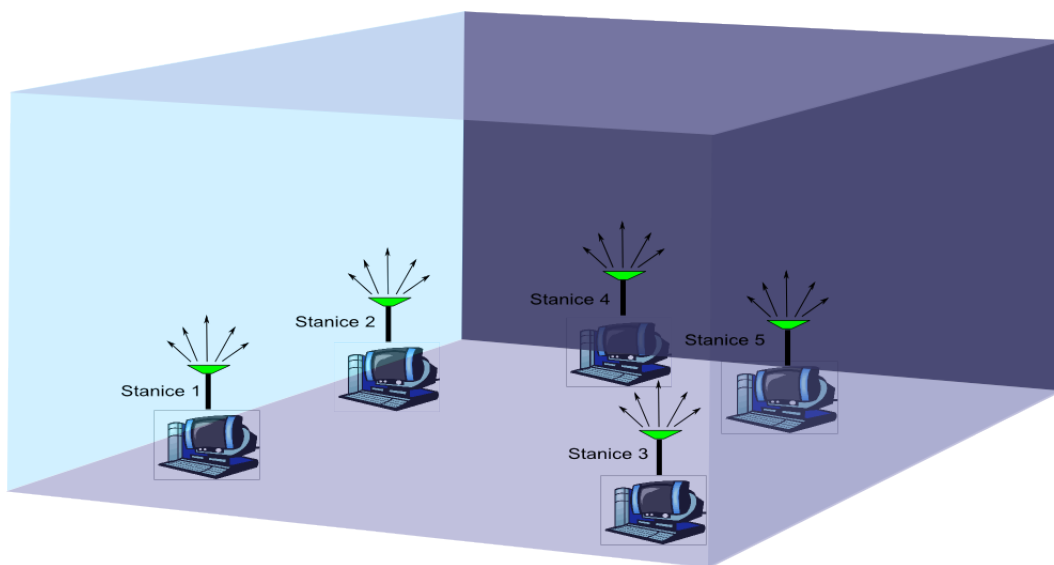
Obr. 1.1: Vícecestná časová disperze.

Další důležitou vlastností na straně přijímače je geometrická divergence záření. Existují mimo jiné dva druhy zdrojů záření, laserové diody LD a luminiscenční diody LED. Rozdělením a vlastnostmi optických zdrojů se zabývá úvodní část práce (viz kapitola 2). Podle způsobu koherence světelného záření dělíme optický přenosový spoj na *směrový* a *všesměrový* (difúzní). Pro použití ve vnitřních aplikacích nejsou vhodné laserové zdroje LD s velkým výkonem, ale mnohem častěji se používají LED diody. Pokud jsou použity, je velmi důležité z hlediska bezpečnosti zajistit bezpečnou mez optického záření, aby nedošlo k poškození sítnice oka obsluhy. LED diody jsou z hlediska výkonu optického záření bezpečnější než LD. Jejich výhodou jsou nízké náklady na pořízení. Nevýhodou je malá rychlost spínání při vysílání.

1.3 Základní rozdělení vnitřních bezdrátových sítí

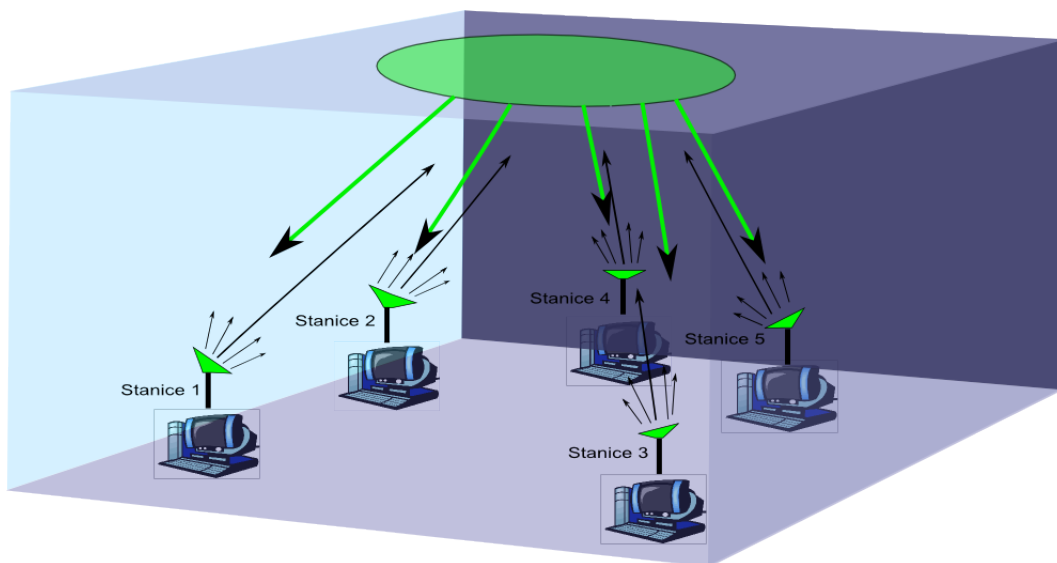
Při spojení *point to point* je hlavním problémem v sítích IR WLAN přenos optické informace v rámci místnosti k libovolně umístěným přijímačům. Pro tento způsob přenosu rozlišujeme dvě metody. První metoda přenosu optické informace se nazývá *difúzní* a druhá metoda se nazývá *kvazidifúzní* přenos.

V difúzní metodě je optické záření s velkou intenzitou vysíláno vysílačem do prostoru v širokém úhlu a pomocí několika odrazů na stěnách místnosti je převedeno na izotropní záření a doručeno do libovolně umístěného přijímače. Princip této metody je založen na odrazu optického signálu od *odrazné plochy*, tato plocha výrazně ovlivní přenosové parametry celého systému. Hlavní nevýhodou difúzní metody je výrazné omezení přenosové rychlosti informačního kanálu kvůli vícecestnému šíření. Tento jev je znám jako *vícecestná disperze*, která omezí přenosovou rychlost v závislosti na velikosti místnosti. Naopak velkou výhodou je poziční postavení vysílače a přijímače, kdy není nutná přímá viditelnost, tedy možná mobilita zařízení. Vhodné poziční rozvržení zařízení u difúzní metody je dobře viditelné na obr. (1.2).



Obr. 1.2: Difúzní metoda vnitřní přenosové linky.

Kvazidifúzní metoda je založena na nasměrování vysílačů na jedno určené místo a díky jeho rozptylujícím odrazovým vlastnostem vzniká pasivní spojení zpět k přijímači (viz obr. 1.3).

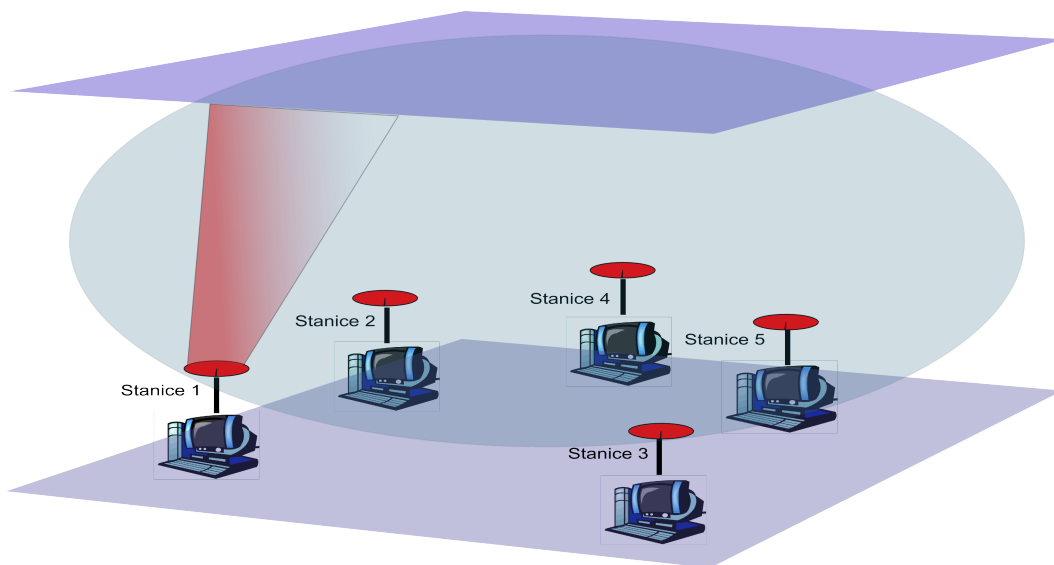


Obr. 1.3: Kvazidifúzní metoda vnitřní přenosové linky.

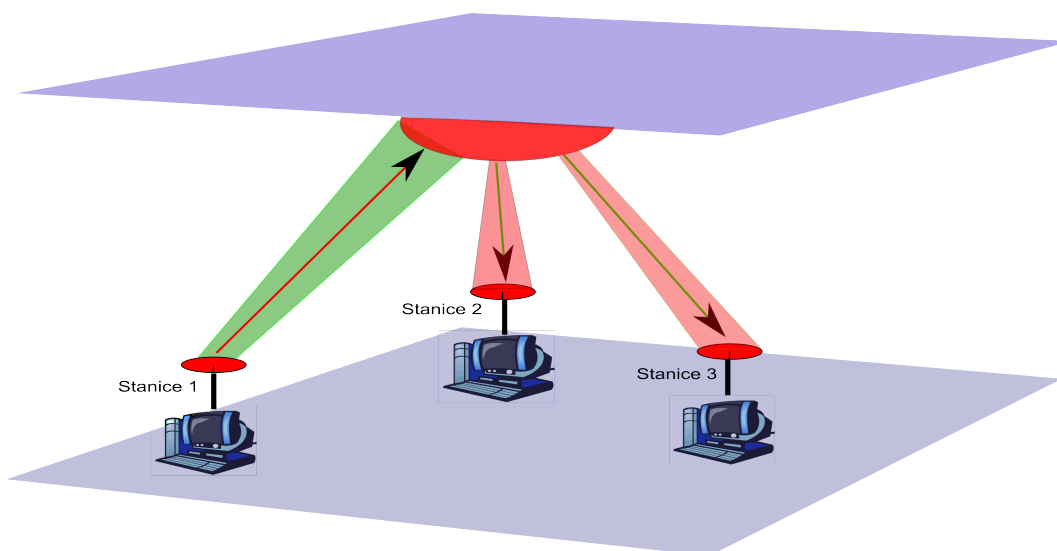
Při velkých útlumech je možné zařadit do spojového řetězce *retlansační prvek* v podobě opakovače obsahující LED či LD diodu a fotopřijímač. Základní myšlenkou je poslat tenký směrovaný optický paprsek světla na odraznou plochu, kde se paprsek světla odrazí k přijímači. Přijímač tento paprsek přijímá buď s pomocí optické *Fresnelovy* čočky, nebo bez ní. Zaměření tenkého směrovaného optického paprsku lze provést například *kolimátorem*.

Pro pokrytí větší místnosti je možné zvětšit odraznou plochu. Vzniká *pasivní kvazidifúzní* linka, která zabírá větší prostor pokrytí a tím aktivuje více přijímačů. Tímto řešením je zabráněno vícecestné disperzi a interferenčnímu rušení, protože vysílaný paprsek je zaměřený pouze na odraznou plochu a odpadá odraz od jednotlivých stěn. Výhodou je zajištěné pasivní zpracování optického signálu mezi jednotlivými přijímači a klesá náročnost na zaměření odraženého paprsku k přijímači. Pasivní kvazidifúzní metoda je dobře znázorněna na obr. (1.4), kde jeden vysílač směrovaným paprskem ozařuje větší plochu a v rámci této plochy dopadá odražená informace zpět k přijímači.

Dalším typem kvazidifúzní linky je *aktivní kvazidifúzní* linka (viz obr. 1.5). Zde se pomocí nasměrování odraženého paprsku aktivuje přesně ten přijímač, ke kterému jsou adresována příslušná data. Výhodou je přesné adresování dat k danému přijímači, tím zamezíme nežádoucímu odposlechu příslušného kanálu. Nevýhodou je náročnější technologické řešení vysílačů a přijímačů, které musí být schopny dekodovat příslušná data a jiná nežádoucí potlačit.



Obr. 1.4: Kvazidifuzní pasivní metoda vnitřní přenosové linky.



Obr. 1.5: Kvazidifuzní aktivní metoda vnitřní přenosové linky.

Jak již bylo uvedeno, jiné světelné rušení by mělo být vhodně potlačeno. Tím vzniká náročnost na větší poměr signál - šum, který zajistí menší pravděpodobnost vzniku chyb během přenosu. K tomuto účelu jsou často používané moderní modulační techniky jako frekvenční modulace rozprostřeného spektra DSSS nebo kodový multiplex CDMA. Vysílač je limitován rychlostí spínání, např. u LED vysílačů. K vhodným modulacím je možné zařadit intenzitní, impulsovou modulaci, modulaci amplitudovým zdvihem ASK, frekvenčním klíčováním FSK či klíčování fázovým zdvihem FSK.

Důležitým prvkem v přenosovém řetězci je *přijímač*. Jako přijímací optický prvek se používá *fotodioda*, která určuje celkovou účinnost a výkonnost optického systému. Existují dva základní typy fotodiody: *fotodioda PIN* a *fotodioda APD*. Obvykle je velkým problémem pokrytí místnosti signálem s dostatečným výkonem. Vznikající stín vyplývající z pohybu lidí, či z rozmístěného nábytku vkládá do přenosu velký útlum. Je tedy vhodné správně rozmístit vysílače a přijímače či odraznou plochu. Přes tyto nevýhody mají optické spoje celkovou imunitu vůči elektromagnetickému rušení EMI a jsou podstatně levnější než rádiový přenos [2].

1.4 Směrování diplomové práce

V první kapitole byla stručně rozebrána celková koncepce optických vnitřních sítí a jejich skladba. V dalších částech této diplomové práce budou podrobně probrány všechny dílčí části přenosového řetězce, tedy zdroje optického záření, možné zaměření optického signálu pomocí optických čoček, odrazivé plochy, které budou podrobněji studovány a porovnávány s matematickou simulací vytvořenou v programu MATHCAD 14, a konečně optické přijímače. Podstatnou částí bude studie *energetického úrovněového diagramu* ideálního stavu optického přenosového řetězce, který názorně popisuje všechny možné energetické změny v optické části přenosové linky a srovnání s energetickými úrovněovými diagramy.

2 OPTICKÉ VYSÍLAČE PRO VNITŘNÍ BEZ-DRÁTOVÉ SÍTĚ

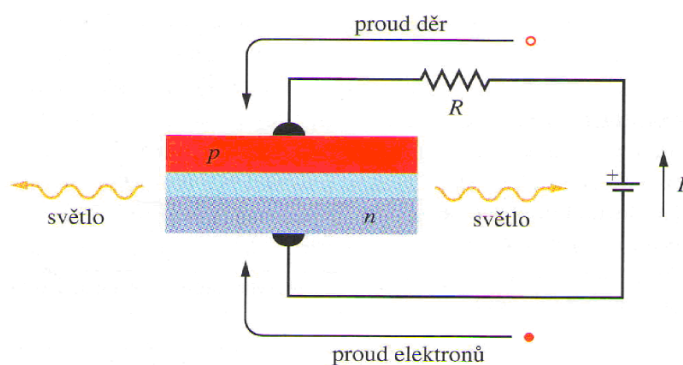
V následujícím textu jsou představeny některé druhy možných *vysílačů* pro vnitřní optický bezkabelový spoj (IWOL); (Indoor Wireless Optical Links). V průběhu této kapitoly budou stručně popsány jejich výhody a nevýhody pro naše použití.

2.1 Laserové vysílače

Laserové světlo je emitováno tehdy, přechází-li atom z kvantového stavu s vyšší energií do kvantového stavu s nižší energií. Laserový vysílač má vlastnosti, které jsou pro náš optický bezkabelový spoj výhodné. Laserové světlo je *koherentní*, *směrové* a lze je ostře *fokusovat*. Laserový vysílač je náročné zařízení, které je nutné provozovat za velmi přísných bezpečnostních podmínek.

Laserová dioda

V polovodičové struktuře (viz obr. 2.1) je velká koncentrace elektronů ve vodivostním pásu materiálu typu n a děr ve valenčním pásu materiálu typu p . Dochází zde k inverzi populace pro elektrony, kdy se více elektronů nachází na hladinách s vyšší energií než na hladinách s nižší energií. Toto je obvykle nutná, ale ne postačující podmínka pro činnost laseru.



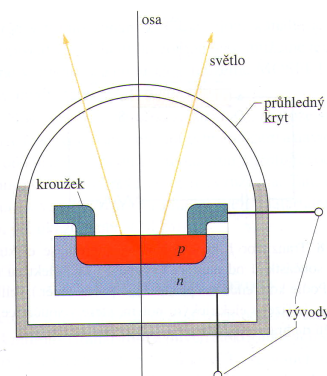
Obr. 2.1: Přechod p - n zapojený v propustném směru umožňuje přísun elektronů do materiálu typu n a děr do materiálu typu p (převzato z [3]).

Když elektron přeskočí z *vodivostního* pásu do *valenčního* pásu, může uvolnit svou energii ve formě *fotonu*. Tento foton může stimulovat přechod dalšího elektronu do valenčního pásu a tak vytvořit druhý foton *stimulovanou emisí*. Je-li proud v přechodu *p-n* dostatečně veliký, může dojít k řetězové reakci v procesu stimulované emise a tím k vytvoření laserového světla. Pro udržení tohoto děje musí být protilehlé roviny krystalu s přechodem *p-n* rovinné, rovnoběžné a opatřené zrcadly, aby se světlo uvnitř krystalu mohlo mnohonásobně odrazet. Přechod *p-n* tedy může pracovat jako *laserová dioda*, jejíž výstupní světlo je vysoce koherentní s vlnovou délkou v mnohem užším intervalu, než je tomu u světla z diody LED. Laserové diody se často používají v optických komunikačních systémech s optickými vlákny i bez nich. Laserové diody mají velmi nepatrné rozměry. Jsou obvykle navrženy tak, aby pracovaly v infračervené oblasti elektromagnetického spektra, protože optická vlákna mají v této oblasti tři okna (pro $\lambda = 0,85 \mu\text{m}$, $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$ a $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$), kde má vlákno minimální absorpci signálu. Laserové diody je možné rozdělit do dvou základních skupin *hranolové* vyzařující lasery a *plošné* vyzařující lasery [3] [4].

2.2 LED vysílače

Světlo vyzařující dioda LED je elektronická polovodičová součástka obsahující přechod *p-n*. Prochází-li přechodem elektrický proud v propustném směru, přechod *emituje* nekoherentní světlo s širším spektrem než u laserových vysílačů. Pásmo spektra záření diody je závislé na chemickém složení použitého polovodiče. LED diody jsou vyráběny s pásmy vyzařování od ultrafialových, přes různé barvy viditelného spektra, až po infračervené pásmo. Pro světlo, které je emitováno přechodem *p-n* v LED diodě, je zapotřebí polovodičový materiál s velmi vysokou koncentrací elektronů ve vodivostním pásu a současně s odpovídajícím množstvím děr ve valenčním pásu. Tato situace nastane, když je přiloženo velké napětí v propustném směru na vysoce dotovaný přechod *p-n* (viz obr. 2.1). V tomto uspořádání zabezpečuje proud I procházející součástkou přísun elektronů do materiálu typu *n* a přísun děr do materiálu typu *p*. Jestliže je dotování dostatečně vysoké a proud dostatečně velký, je ochuzená zóna velmi úzká (několik mikrometrů). Výsledkem je, že velké množství elektronů v materiálu typu *n* je odděleno od obdobně velkého množství děr v materiálu typu *p* pouze úzkou ochuzenou zónou. Protože je velká hustota elektronů a děr, dochází k velkému počtu jejich rekombinací a to způsobuje emisi světla z této zóny. Obrázek (viz obr. 2.2) ukazuje konstrukci skutečné diody LED. LED diody se podle směru záření dělí na SLED a ELED. SLED se chovají jako *Lambertovy zdroje* světla.

Typickým rysem Lambertova zářiče je, že polovina výkonu se nachází v kuželu o vrcholovém úhlu 120° . SLED mají symetrickou stopu a používají se k buzení MM vláken. Další skupinou jsou hranově (stranově) emitující ELED, které mají asymetrickou stopu. Používají se k buzení SM vláken. V zásadě pro optické vysílače můžeme tedy použít jak laserové diody LD, tak diody LED [4].



Obr. 2.2: Příčný řez diodou LED (převzato z [3]).

2.3 Optické čočky

Čočka je *transparentní* těleso se dvěma lámavými plochami, jejichž centrální osy splývají. Společná centrální osa je centrální osou čočky. Je-li čočka obklopena vzduchem, láme se světlo ze vzduchu do čočky, prochází čočkou a znovu se láme do vzduchu. Při každém lomu se může změnit směr chodu světla. Čočku, která způsobí, že paprsky původně rovnoběžné s centrální osou se sbíhají, nazveme *spojkou*, neboli spojnou konvergentní čočkou. Jestliže čočka místo toho způsobí, že takové paprsky se rozbíhají, jde o *rozptylku*, neboli čočku rozptylnou divergentní. Umístníme-li předmět před čočky obou typů, mohou lomené světelné paprsky vytvořit obraz tohoto předmětu [13].

Specifikace optických čoček

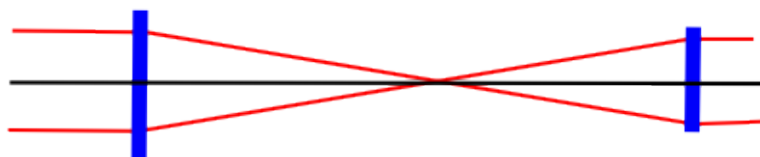
Prvním krokem k návrhu optické úlohy je posoudit, jaké zobrazení bude pro náš projekt vyhovující a podle něj vhodně volit funkční parametry čoček. V naší práci je vhodné zvážit tyto vlastnosti čoček: disperzi, velikost čočky, kolimaci světla a osvětlení bezvláknového spoje zdrojem světla.

Hlavní parametry optického systému jsou:

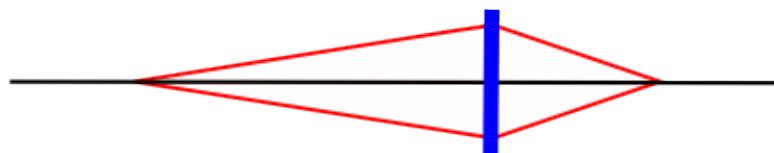
1. **Potřebná vzdálenost** - vyjadřující vzdálenost objektivu od zdroje záření a vzdálenost objektivu od obrazu.
2. **Numerická apertura NA** a **ohnisková vzdálenost f** - jsou měřítkem kužele světla, které je přijímáno nebo vysíláno systémem čoček.
3. **Optická mohutnost** - vyjadřuje převrácenou hodnotu obrazové ohniskové vzdálenosti čočky.
4. **Rozlišení a velikost objektu** - rozlišovací schopnost zobrazovacího systému.

Převážnou většinu aplikací lze rozdělit na optické soustavy *teleskopické* a *kolektivní* (viz obr. 2.3). Kolektivní optická soustava se dělí na *zobrazení konečných bodů* a *zobrazení bodu v nekonečnu*. Konečné zobrazení zaměřuje světlo ze zdroje na bod. Nejvíce se uplatňuje u videotechniky, kde se obraz konečné vzdálenosti zaměřuje na CCD prvek. Nekonečné zobrazení formuje paprsek příchozího světla v závislosti na zvětšení a kolimuje požadovaný paprsek.

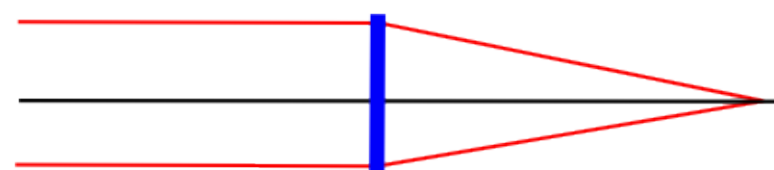
Teleskopický zobrazovací systém



Kolektivní zobrazovací systém- zobrazení konečných bodů



Kolektivní zobrazovací systém- zobrazení bodu v nekonečnu



Obr. 2.3: Různé typy optických soustav (převzato z [13]).

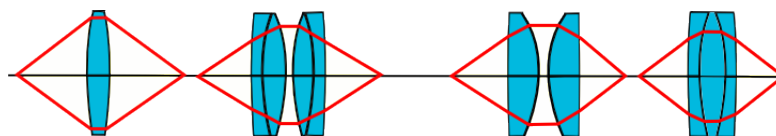
V tabulce (2.1) bude uveden přehled parametrů, které se uvádí v problematice optických komponentů.

Tab. 2.1: Přehled popisných parametrů pro zobrazovací systémy (převzato z [13]).

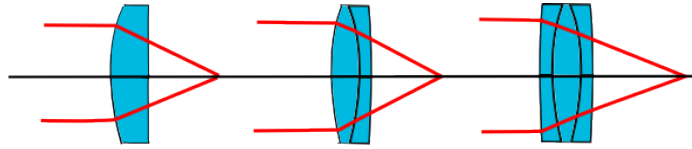
Název parametru	Popis významu parametru
H_i, H_o	Výška objektu, představuje polovinu skutečné velikosti obrazu a objektu.
I, O	Vzdálenost obrazu a objektu od objektivu.
f_i, f_o	Ohnisková vzdálenost objektivu nejbližší k obrazu či objektu.
f	Účinná ohnisková vzdálenost objektivu celého systému.
M	Zvětšení.
d	Vzdálenost mezi dvěma prvky.
θ	Celkový úhel kužele světla přijímaného nebo vysílaného systémem.
a_i, a_o	Poloviční zorné úhlové pole.
T, P	Schopnost výkonového převodu světla.
D	Průměr objektivu.

Kolektivní optická soustava

Kolektivní optická soustava se dělí na konečný systém s jediným prvkem, který efektivní ohniskovou vzdáleností odpovídá ohniskové vzdálenosti objektivu. Výhodou této konstrukce je její jednoduchost a efektivita nákladů. V systému je možné kombinovat různé prvky, které mohou dosáhnout efektivní ohniskové vzdálenosti a zároveň velmi zvýší kvalitu zobrazení. Přehled možností zobrazení (viz obr. 2.4). Druhým systémem je zobrazení bodu v nekonečnu, který má propustnost optického světelného výkonu na detektor. Přehled možností zobrazení (viz obr. 2.5).



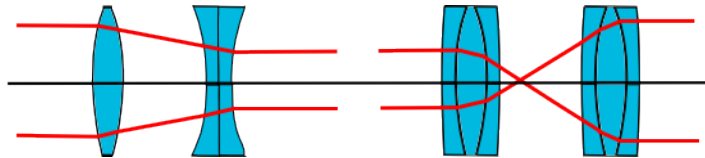
Obr. 2.4: Přehled kolektivních optických soustav pro zobrazení konečných bodů (převzato z [13]).



Obr. 2.5: Přehled kolektivních optických soustav pro zobrazení bodu v nekonečnu (převzato z [13]).

Teleskopická optická soustava

Při použití dvou prvků v systému je možné zobrazovat průběžný paprsek. Pro expanzi paprsku z laseru nebo jiného optického zdroje záření se využívá systému s jedním spojným prvkem a jedním rozptylným prvkem. Přehled možností zobrazení (viz obr. 2.6).



Obr. 2.6: Přehled teleskopických soustav (převzato z [13]).

Fresnelova čočka

Tento typ čočky se převážně používá ke zvětšení divergence v paraxiálním prostoru. Paraxiální paprsky svírají s hlavní osou optické soustavy úhly menší než 2° . Velmi známé použití Fresnelovy čočky je ve výstražných majácích či detektorech pohybu v zabezpečovacích systémech nebo v televizních technice. Fresnelova čočka (viz obr. 2.7) má prstencové zóny, zpravidla lisované z organických skel. V naší práci bude využívána v opačné úloze, kdy bude vysílané paprsky z prostoru směřovat na plochu fotodetektoru.



Obr. 2.7: Princip Fresnelovy čočky - řez Fresnelovo (vlevo) a běžnou (vpravo) čočkou (převzato z [16])

Kolimátor

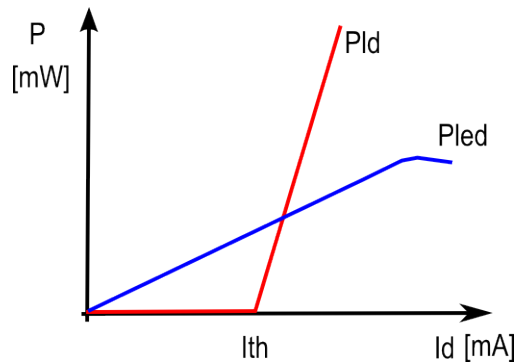
Optické kolimátory se skládají obvykle ze soustavy zrcadel nebo čoček. Soustřeďují světlo do přesně směřového svazku, který neztrácí intenzitu ani na velké vzdálenosti. Kolimátory se v tomto smyslu používají pro měření, kalibraci jiných optických zařízení [17].

2.4 Systémové řešení vysílače

Laserové diody vyzařují optický výkon z relativně malé plošky eliptického tvaru. Lineární rozměry této plošky jsou řádu 10^{-6}m^2 , poměr hlavní a vedlejší poloosy bývá 4:1. Vyzařovaný svazek má eliptickou stopu s různou úhlovou šířkou svazku v rovině hlavní a vedlejší poloosy. V rovině vedlejší poloosy je úhlová šířka svazku větší než v rovině hlavní poloosy a je rovna přibližně 30° . Polovodičové lasery (laserové diody, LD) jsou na optickém výstupu pouzdra opatřeny buď okénkem (pro záření do volného prostoru) nebo (jsou-li určeny pro záření do vlákna) tzv. *pigtailem* - kouskem optického vlákna, do kterého je výkon LD s určitými ztrátami zaveden. LD mohou pracovat v *kontinuálním* nebo v *impulsním* režimu. Pracuje-li LD v kontinuálním režimu, bývá hodnota optického výkonu 0,1mW až 100mW. V impulsním režimu lze dosáhnout výkonu řádové hodnoty 100W při šířce impulsu 100ns. Prahová hodnota budícího proudu např. u kontinuálně pracující LD s optickým výkonem 10mW je přibližně 40mA. Doba náběhu komunikačních LD bývá menší než 1ns. Velmi významné je použití LD v komunikacích. LD pracují v typických spektrálních oknech: 850nm, 1300nm a 1550nm. Hlavní výhody LD spočívají v jejich snadné přímé modulaci budícím proudem. Šířka pásma přenosu může dosáhnout řádové hodnoty několik GHz [5].

Parametry a charakteristiky optických zdrojů:

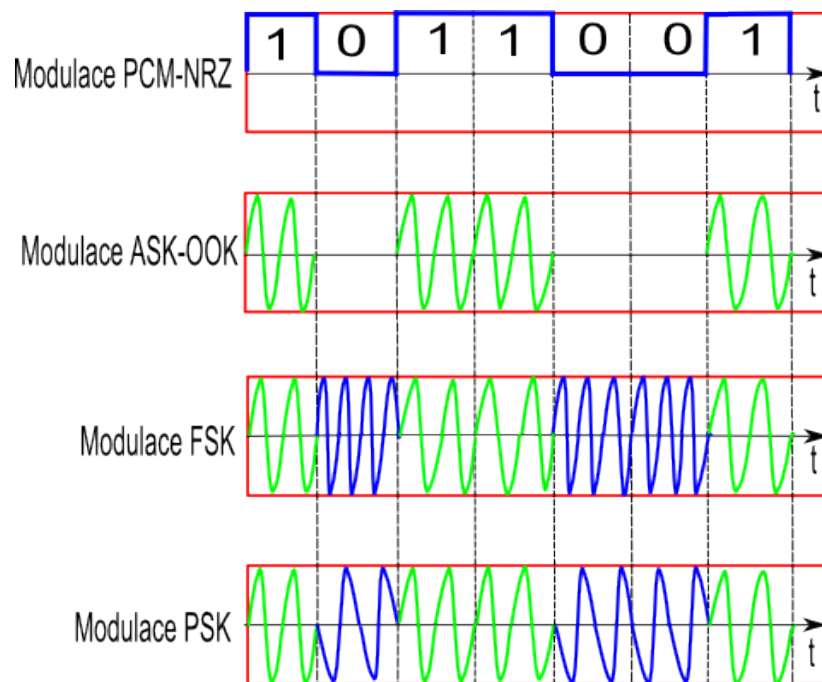
1. Výkon P_{LD}
2. Spektrální oblast
3. Svítivost I
4. Prahová hodnota budícího proudu I_{TH}
5. Světelná charakteristika $P_{LD} = f(I_d)$, (viz obr. 2.8)



Obr. 2.8: Světelná charakteristika laserové a LED diody (převzato z [5]).

Modulační techniky

Nejrozšířenějším typem kódové modulace v základním pásmu je *impulzová kódovaná modulace* PCM (viz obr. 2.9).



Obr. 2.9: Tři základní varianty dvoustavových modulací. A, binární modulační signál PCM; B, signál ASK s klíčováním amplitudy; C, signál FSK s klíčováním frekvence; D, signál PSK s klíčováním fáze (převzato z [6]).

Ta se vytváří tak, že se analogový modulační signál nejprve přemění na signál v podobě sekvence v čase nespojitých impulzů PAM, jejichž amplitudy kopírují průběh analogového modulačního signálu. Signál PAM podrobíme kvantizaci. Kvantovaný signál PAM se dále kóduje. Kódováním se rozumí převod jeho skutečné velikosti, obvykle vyjádřené v desítkové soustavě, do soustavy binární (nebo jiné). Tím se vytvoří signál s modulací PCM. Další diskretní modulace využívají jako modulační signál právě modulaci PCM (viz obr. 2.9).

Kapitola pojednává o intenzitní modulaci optického záření. Binárním modulačním signálem je možné modulovat amplitudu, frekvenci či fázi nosné vlny. U *dvoustavových modulací* se modulovaný parametr této vlny mění pouze mezi dvěma diskretními stavy, z nichž jeden odpovídá modulačnímu bitu 0 a druhý modulačnímu bitu 1. Tyto diskretní stavy nosné vlny se u digitálních modulací označují termínem *symboly*. Pro uvažované digitální modulace se používá také termín *klíčování*, tedy změny nosné vlny mezi několika diskretními stavy. Je-li modulovaným parametrem amplituda nosné vlny, získá se dvoustavové klíčování amplitudovým zdvihem 2ASK. Podobně při klíčování frekvence se vytváří dvoustavové klíčování frekvenčním zdvihem 2FSK. Konečně při klíčování fáze vzniká dvoustavové klíčování fázovým zdvihem 2PSK, pro který se dnes používá označení BPSK. Binární modulační signál a příslušné časové průběhy tří uvažovaných základních modulačních způsobů jsou znázorněny na obr. (2.9).

U všech zobrazených průběhů je záměrně dosaženo synchronizace mezi bitovou frekvencí f_b modulačního signálu a frekvencí f_c nosné vlny, takže ke změnám modulačních bitů dochází přesně v okamžicích, kdy nosná vlna prochází nulou. Zobrazený průběh modulace ASK má speciální průběh OOK, při němž modulačnímu bitu 0 odpovídá nulová nosná vlna. Spektrum modulace OOK má obálku funkce *sync*, přičemž základní nosná frekvence má menší velikost než spektrální čára první harmonické složky. Tato jednoduchá modulační technika je využívána v digitálním vysílači v této diplomové práci.

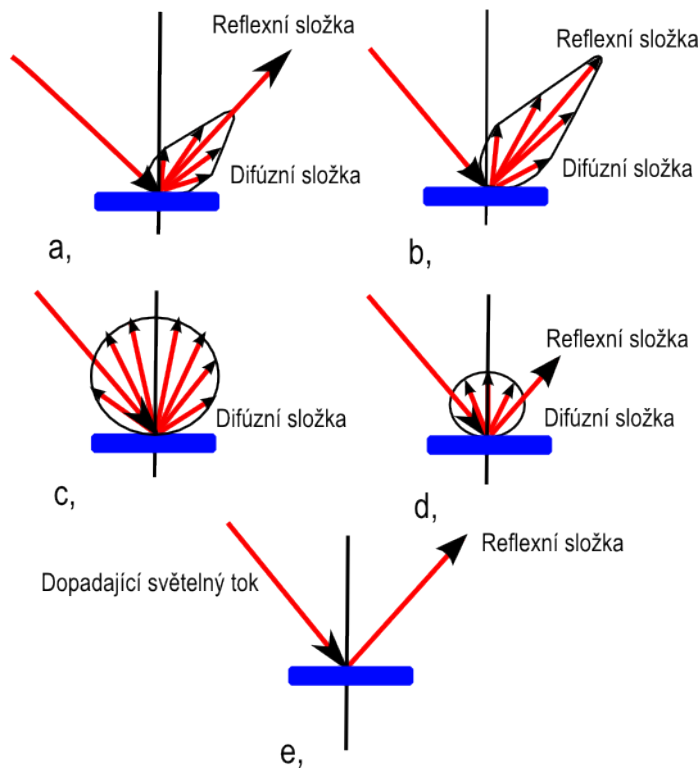
U dvoustavových modulací odpovídá každý modulační stav modulované nosné vlny jedinému bitu modulačního signálu PCM. Snaha po zvětšení přenosové kapacity digitálních modulací však vedla k rychlému rozvoji *vícestavových diskretních modulací*, u nichž každý stav modulované nosné vlny přenáší nejméně dva, nebo více bitů. Rychlost, se kterou se mění diskretní stavy nosné vlny, se nazývá *symbolová rychlost* f_s . V dnešní době se začínají rozvíjet modulační formáty s více nosnými vlnami MCM, na nichž se rovněž přenáší jeden modulační signál. Nejstarší systém MCM vychází z klasického frekvenčního multiplexování FDM. Výrazný pokrok přichází s použitím subnosných vln, které vytvářejí ortogonální soustavu. U těchto modulací, které se nazývají OFDM, nedochází k vzájemným interferencím mezi nosnými vlnami ISI [6].

3 ODRAZNÉ VLASTNOSTI POVRCHŮ

Tato kapitola je věnovaná studiu odrazných ploch a jejich vlastností. Budou studovány tři typy odrazných ploch. Odrazné plochy budou experimentálně přeměřeny a výsledky měření budou porovnány s matematickým modelem. Matematický model, který zde bude využit, byl navržen v rámci semestrálního projektu a je uveden v příloze.

3.1 Úvod do problematiky směrové odraznosti ploch

Optické záření dopadající na plochu stěny nebo překážky se podřizuje fyzikálním zákonům *odrazu* a *lom* světla, případně *absorpci* a *rozptylu*. Tyto jevy světla nastávají při šíření světla dvěma vzájemně odlišnými prostředími. Lom je popsán *Snellovým zákonem*. Odraz na rozhraní dvou prostředí může být rozptylový (*difúzní*), nebo zrcadlový (*reflexní*). Zvláštním případem je odraz *úplný*. Přesné výpočty odrazu a lomu světla o dané polarizaci se řeší pomocí *Maxwellových* rovnic a z nich odvozených *Fresnelových* vztahů. Varianty odrazů na různých materiálech jsou znázorněny na obr. (3.1) [8].



Obr. 3.1: Různé způsoby odrazů na odrazné ploše (převzato z [7]).

Při průchodu světla prostředím nastává jeho útlum. Příčinou může být pohlcování nebo rozptyl světelné energie spojené s přeměnou energie na záření, nebo na jiné druhy energie. Rozptyl světla se projevuje šířením původně rovnoběžného optického paprsku do všech možných směrů. Směr šíření paprsků je rozptylován vlivem drobných částic a optických nehomogenit prostředí, jejichž rozměry jsou srovnatelné s vlnovou délkou dopadajícího optického záření (Raileighův rozptyl), nebo jsou větší než vlnová délka (Mieův rozptyl). V praxi platí, že pro různé odrazné plochy je třeba znát *odrazivost*. Odrazivost se značí ρ , pohybuje se v rozmezí $\in < 0; 1 >$ a řeší se (3.1):

$$\rho = \frac{\phi_o}{\phi}; [-], \quad (3.1)$$

kde ϕ_o je odražený světelný tok a ϕ je světelný tok dopadající na odraznou plochu. Je důležité vědět, jak se světlo po odrazu od plochy vrací zpět do prostředí, ze kterého přichází. Nejjednodušším případem odrazu světla je zrcadlový odraz (viz obr. 3.1 e), odrazná plocha, která se projevuje zrcadlovým odrazem, se vyznačuje vysokým koeficientem směrovosti v navrženém matematickém modelu (viz obr. 3.2).

Odraz světla do různých směrů, při kterém nevzniká zrcadlový odraz, je nazýván rozptylovým či difúzním odrazem (3.1 b, c). Povrch, který se vyznačuje rozptylovým odrazem, se řídí tzv. *Lambertovým zákonem* a je *matný*. Lambertův zákon se vyjadřuje (3.2):

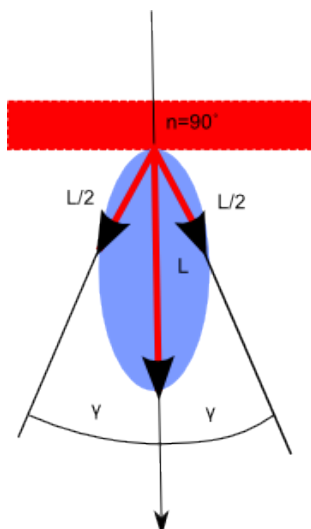
$$I_\gamma = I_o \cdot \cos(\gamma); [cd], \quad (3.2)$$

kde I_o je svítivost ve směru normály na odraznou plochu. To znamená, že hodnota svítivosti rovinného plošného zdroje v každém jeho bodě klesá s kosinem odklonu γ od kolmice, k ploše zdroje. Zářiče, které září podle Lambertova zákona se nazývají kosinové [12]. Jas plochy, která rozptyluje dopadající světelný paprsek vyjadřuje vztah (3.3):

$$L = \frac{\rho \cdot E}{\pi}; [cd/m^2], \quad (3.3)$$

kde L je jas a E je intenzita osvětlení. U většiny povrchů vzniká *smíšený* odraz (viz obr. 3.1 a, b). Smíšeným odrazem je nazývaná kombinace zrcadlového i rozptylového odrazu. Při smíšeném odrazu je možné činitele smíšeného odrazu rozdělit na činitele zrcadlového odrazu a činitele rozptylového odrazu. Odrazná plocha, která se vyznačuje smíšeným odrazem se nazývá *polomatná*.

Těleso, které mění rozložení světelného toku převážně rozptylem, se nazývá *difuzér*. Popis vlastností difuzéru, či odrazné plochy, která se vyznačuje matným povrchem, jsou *úhel polovičního jasu* a *koeficient rozptylu*. Na následující obrázku (viz obr. 3.2) je úhel odraženého záření γ , který svírá normála plochy se směrem, ve kterém je jas poloviční. Přičemž je plocha osvětlená kolmo [10].

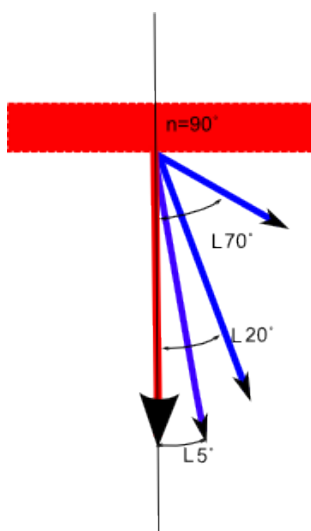


Obr. 3.2: Úhel polovičního jasu (převzato z [10]).

Příklad míry rozptylu σ na smíšené ploše je na obr. (3.3). V návaznosti na obr.(3.3) je rovnice (3.4), která udává podíl aritmetického průměru hodnot jasů, měřených pod určitými úhly (20° , 70°) a jasu pod úhlem (5°) od normály, při kolmém dopadu světla. Platí:

$$\sigma = \frac{L_{20} + L_{70}}{2L_5}; [-]. \quad (3.4)$$

Hodnotu rovnou jedné má dohodnutý činitel rozptylu pro *rovnoměrný difuzér*. Jas rovnoměrného difuzéru je ve všech směrech stejný, a to v jakémkoliv směru dopadu světla. Příkladem rovnoměrného difuzéru je Lambertova plocha (křída), která má $\rho=1$, $\sigma=1$.



Obr. 3.3: Koeficient rozptylu (převzato z [10]).

Zajímavým případem jsou plochy vyznačující se *mnohonásobným* odrazem. Činitel mnohonásobného odrazu závisí na tvaru odrážející plochy a na odrazivosti ρ . Jedním ze zástupců mnohonásobného odražeče je *koutový odražeč*, případně soustava koutových odražečů. Pro fyzikální modelování reflexních a difúzních vlastností optických ploch byla zvolena metoda *energetické bilance*, to znamená, že se měří dopadající světelný tok. Předpokládá se, že odrazná plocha je rovinná se smíšenou charakteristikou a že je ozařovaná optickou vlnou. Její směrové reflexní a difúzní účinky lze měřit tzv. poměrnou směrovou odrazivostí povrchů PSO. PSO určitého místa povrchu je definovaná jako zář reálného povrchu, dělená září ideální difúzní plochy, ozařovaná stejnou intenzitou optického záření jako reálná plocha. Vzhledem k charakteru ideální difúzní plochy je pak možno PSO vyjádřit následujícím způsobem (3.5), [9].

$$PSO = \frac{L_r}{L_l}; [-], \quad (3.5)$$

kde L_r je zář reálné odrazné plochy a L_l je zář Lambertovy plochy s jednotkovou odrazivostí. Po dosazení (3.3) do (3.5) bude pro PSO platit vztah (3.6), [9]:

$$PSO = \frac{L_r \cdot \pi}{E}; [-], \quad (3.6)$$

kde L_r je zář reálné odrazné plochy a E je intenzita záření, dopadající na reálnou odraznou plochu. Směrová odrazivost pro nelambertovské odrazné plochy se symetrickým rozptylem je definována jako (3.7):

$$\tilde{\rho} = A_n \cdot \cos^n(\gamma); [-], \quad (3.7)$$

kde velikost A_n je definována v modelu odrazivých ploch v příloze (B). Koefficient směrovosti n je závislý na velikosti koeficientu odrazivosti A_n . Vztahy (3.5), (3.6), (3.7) jsou vodítkem pro určení poměrné směrové odrazivosti nelambertovských ploch a jsou využity pro hledání funkce modelu odrazných vlastností difúzních ploch v následující kapitole (3.2).

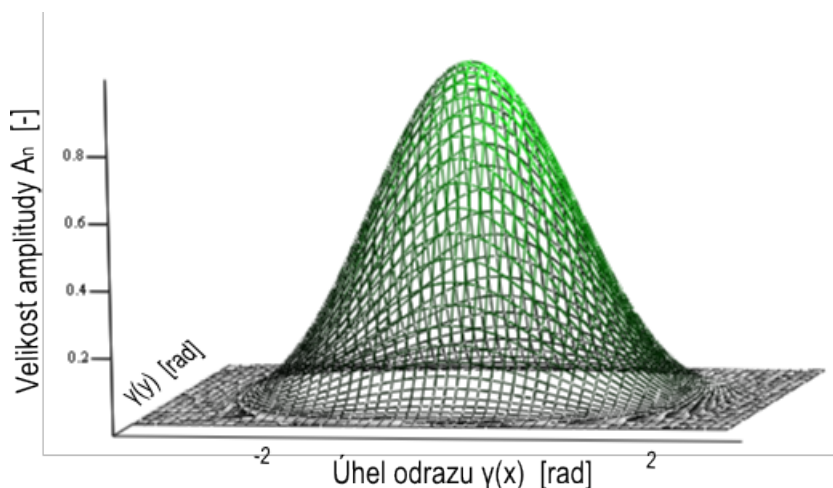
3.2 Model odrazných vlastností difúzních ploch

Pro modelování směrových vlastností odrazných ploch byla v rámci semestrálního projektu hledána funkce, která simuluje vlastnost poměrné směrové odrazivosti ploch PSO. Je vycházeno z Lambertova zákona, který byl objasněn ve vztahu (3.2). Z jeho definice vyplývá, že dopadající záření na odraznou plochu se odráží zpět do prostoru v závislosti na parametrech odrazné plochy a parametrech dopadající světelné vlny. Jeho šíření zpět do prostoru simuluje matematická funkce kosinus. Pro modelování odrazné plochy je vhodné určit podmínky dopadu optické vlny. Kruhově symetrický optický svazek dopadá na odraznou plochu kolmo. Velikost záře odrazné plochy je možno určit pomocí funkce (3.8):

$$PSO(A_n, n, \gamma) = A_n \cdot \left[\frac{1 + \cos(\gamma)}{2} \right]^n ; [-], \quad (3.8)$$

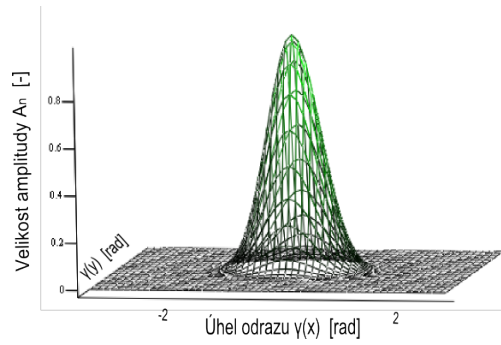
kde γ je úhel směru pozorování, A_n a n jsou koeficienty směrovosti a odrazivosti. Strmost křivky je určena velikostí koeficientu směrovosti n a velikost koeficientu odrazivosti A_n je určena modelem nalambertovských ploch (B). Na následujícím obrázku (3.4) je vidět simulovaná funkce (3.8).

Obrázek (viz obr. 3.4) modeluje charakteristiku rozptylu pro vybranou plochu o velikosti $A_n = 1$, $n = 2$. Zobrazená charakteristika je srovnatelná s difúzní odraznou plochou.

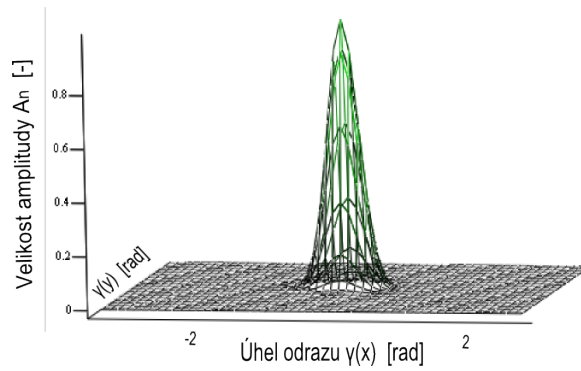


Obr. 3.4: Charakteristika rozptylu pro Lambertovu odraznou plochu o velikosti $A_n = 1$, $n = 2$.

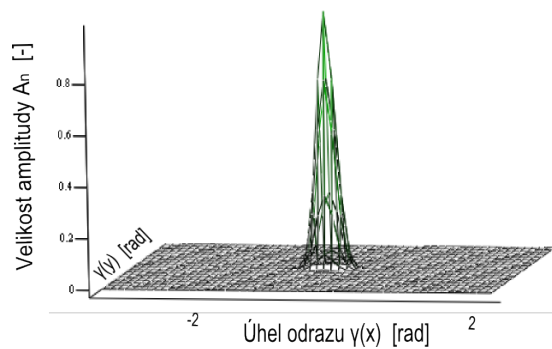
Za předpokladu kolmého ozařování odrazné plochy bude její zář maximální ve směru osy z .



Obr. 3.5: Charakteristika rozptylu pro smíšenou odraznou plochu: $A_n = 1$, $n = 10$.

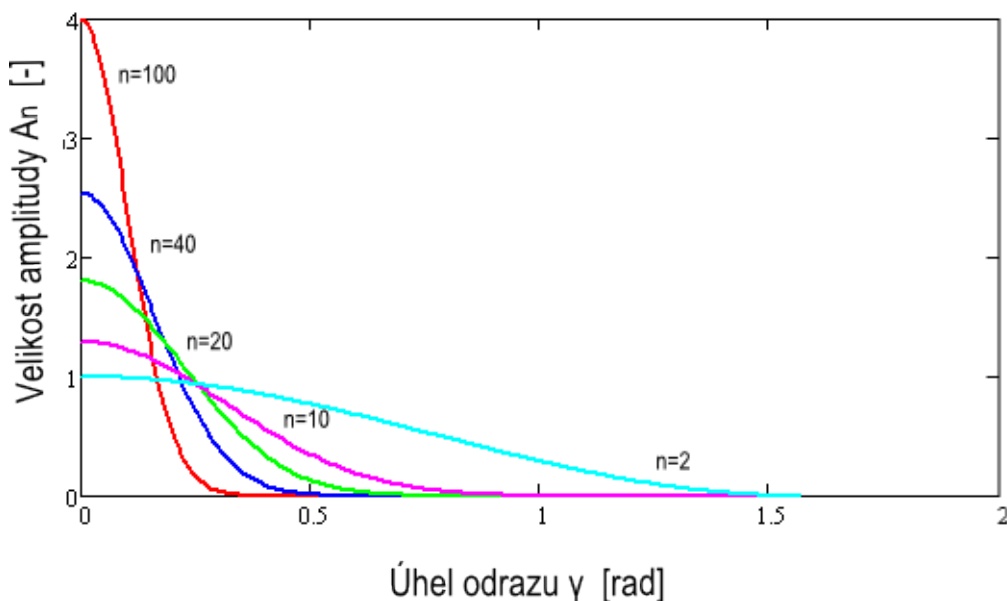


Obr. 3.6: Charakteristika rozptylu pro smíšenou odraznou plochu: $A_n = 1$, $n = 40$.



Obr. 3.7: Charakteristika rozptylu pro smíšenou odraznou plochu: $A_n = 1$, $n = 100$.

U některých speciálních ploch (reflexní pruhy na ochranné vestě apod.) je preferovaná složka rozptýleného záření pro úhel $\gamma = \beta$, $\gamma_x = \beta_x$, $\gamma_y = \beta_y$, kde β ; β_x ; β_y jsou směrové úhly dopadajícího optického záření. Míru rozptýleného záření lze měnit koeficientem odrazivosti A_n a šířka charakteristiky rozptylu je závislá na koeficientu směrovosti n (viz obr. 3.4, obr. 3.5, obr. 3.6, obr. 3.7, obr. 3.8). Na následujících obrázcích (obr. 3.5), (obr. 3.6), je názorná ukázka simulované funkce pro smíšenou plochu a pro reflexní plochu. Graf (viz obr. 3.8) je dvourozměrná verze velikosti amplitudy v závislosti na úhlu pozorování. V příloze je uveden simulační program pro možnost definování různých vlastností odrazné plochy.



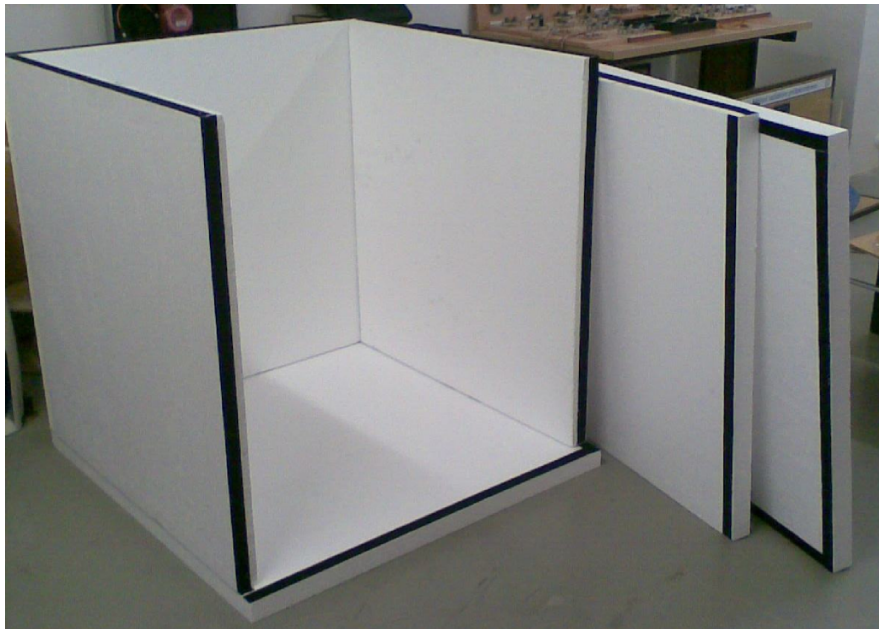
Obr. 3.8: 2D charakteristika rozptylu vybrané plochy při osové kruhové symetrii pro $A_n = 1$, $n = 2; 10; 20; 40; 100$ (mimo koutového odražeče).

V případě difúzní odrazné plochy (bílý matný papír, Lambertova plocha) je odražená optická zář modelována nižším koeficientem směrovosti n (přibližně $n = 2, 3, 4$) (viz obr. 3.4). Pokud je odrazná plocha smíšená (bílý lesklý papír, odrazka), ovlivní se tvar její směrové charakteristiky. Má vyšší koeficient směrovosti v rozmezí $\in < 5; \infty >$, (viz obr. 3.6), (viz obr. 3.7), (viz obr. 3.8).

Zvláštním případem je koutový odražeč, jeho směrová analýza odražené záře je uměle rozptylována do úhlů blízkých jeho ose záření. V další podkapitole (3.3) jsou podrobněji rozebírány naměřené hodnoty tří odrazných ploch, zobrazených v grafických souhrnech s matematickou analyzovanou funkcí.

3.3 Experimentální měření odrazných ploch

Pro experimentální měření byla vytvořena měřicí komora o rozměrech $1m.1m$ (viz obr. 3.9). Celý systém je umístěn v modelu místnosti.

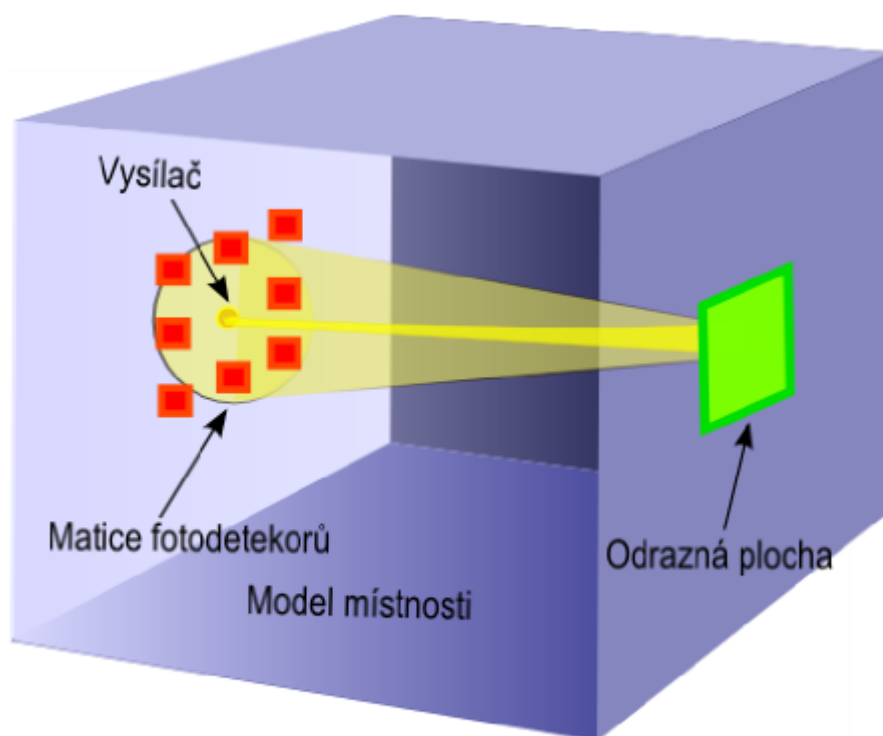


Obr. 3.9: Měřicí komora.

Model je postaven pomocí polystyrénových stěn. Volba polystyrénu jako materiálu bočních stěn, stropu a podlahy má čistě praktický charakter. Model je lehce přenosný a je zde jednoduchá variabilita upevnění vysílacích a přijímacích modulů. Vnitřní zapojení komponentů v měřicí komoře bylo řešeno dvěma způsoby měření. První způsob měření probíhal v rámci kontinuálního osvětlení odrazné plochy infra LED diodou o vlnové délce $\lambda = 950\text{nm}$, její vyzařovací charakteristika nebyla kolimovaná žádnou optickou soustavou.

Druhý způsob měření probíhal s laserovou diodou o vlnové délce $\lambda = 808\text{nm}$, která také byla buzena kontinuálně. Laserová dioda typu L808P010 byla použita v kompletu s kolimátorem. Do kolimátoru je navázán optický signál z budiče pomocí optického vlákna. Pro přijímač byl použit integrovaný obvod OPT 101, což je integrovaná fotodiody s operačním zesilovačem. Přesné parametry těchto prvků budou uvedeny v kapitole (5.1), nebo v údajích od výrobce.

Výsledné elektrické napětí je mírou přijímaného optického výkonu a velikosti aktivní plochy fotodiody nebo přijímací optické apertury. Princip uspořádání v měřicí komoře je názorný na obr. (3.10).

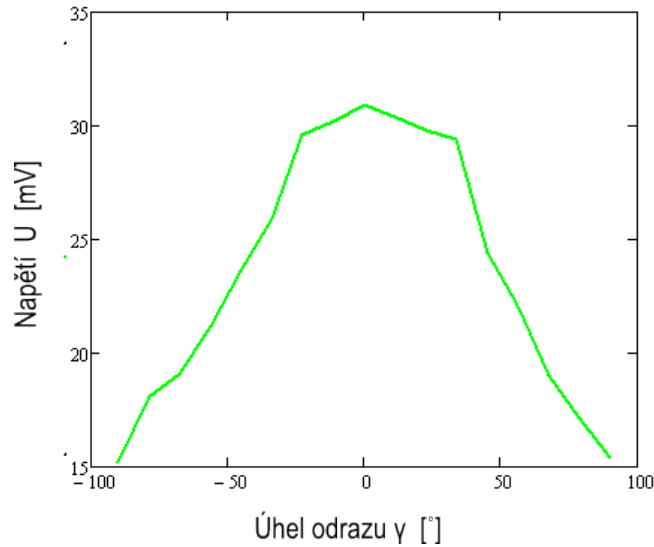


Obr. 3.10: Princip měření poměrné směrové odrazivosti.

3.3.1 Odrazná plocha - bílý matný povrch

První měřenou odraznou plochou byl bílý matný povrch, který zastupuje Lambertovu plochu s odrazivostí $\rho = 1$. Měření probíhalo ve dvou etapách. V první etapě se na Lambertovu plochu vysílal optický nekolimovaný signál z LED diody LD271 o vlnové délce $\lambda = 950\text{nm}$ s výkonem 130 mW v kontinuálním režimu. Optický svazek dopadal na odraznou plochu kolmo ze vzdálenosti jednoho metru. Jako přijímací fotoprvek byl použit integrovaný obvod OPT 101. Výsledný graf z celé měřené plochy je na obr. (3.11).

Ve druhé etapě měření byla použita laserová dioda L808P010, která vysílá kolimovaný optický paprsek s výkonem 3 mW o vlnové délce $\lambda = 808\text{nm}$. Optický signál dopadal na odraznou plochu kolmo a poté v různých směrech. Výsledné plošné grafy jsou k porovnání na obr. (3.12), pravý zobrazuje dopadající optický nekolimovaný signál na celou plochu stěny a levý zobrazuje dopadající kolimovaný optický signál pouze v prostoru středu o rozměrech $12,1\text{ mm}^2$ pro kolmý dopad.

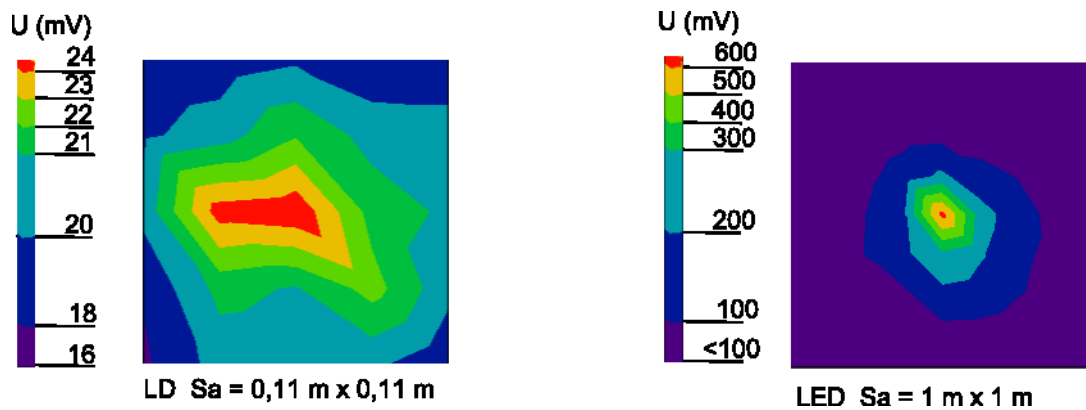


Obr. 3.11: Výsledná charakteristika optické relativní intenzity na Lambertově ploše.

Pro určení velikosti relativní optické intenzity platí vztahy (3.9):

$$I = \frac{P_p}{S_a}; [W/m^2], S_U = \frac{U}{P_p}; [V/W], \quad (3.9)$$

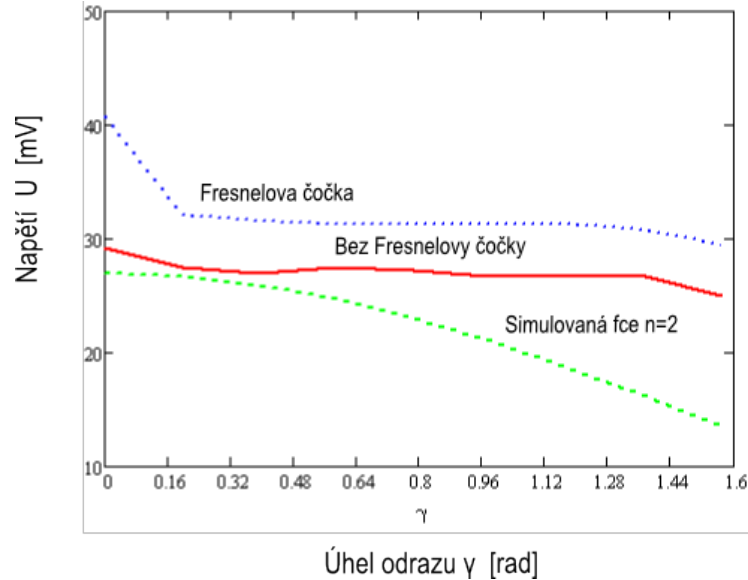
kde I je optická intenzita, S_U napěťová citlivost, U změřené elektrické napětí, P_p je přijímaný výkon a S_a je obsah aktivní plochy fotodiody. Parametry fotodiody jsou uvedeny v (A.7). Stejně vztahy platí i pro graf na obr. (3.12).



Obr. 3.12: Graf dopadajícího optického signálu na matici přijímačů z Lambertovy plochy. Vpravo - celoplošné zobrazení LED zdroje; vlevo - vybraná středová část LD zdroje.

Při změně směru dopadajícího záření β ($\beta_x; \beta_y$) od 0° , po 10° , až do 90° , je charakteristika odrazné Lambertovy plochy podle obr. (3.13).

V měření je použita také Fresnelova čočka, která lépe soustředí dopadající optickou intenzitu na plochu fotodetektoru. Na obrázku je pro porovnání měřených hodnot zelenou křivkou vyznačen simulovaný model Lambertovy plochy (3.2).

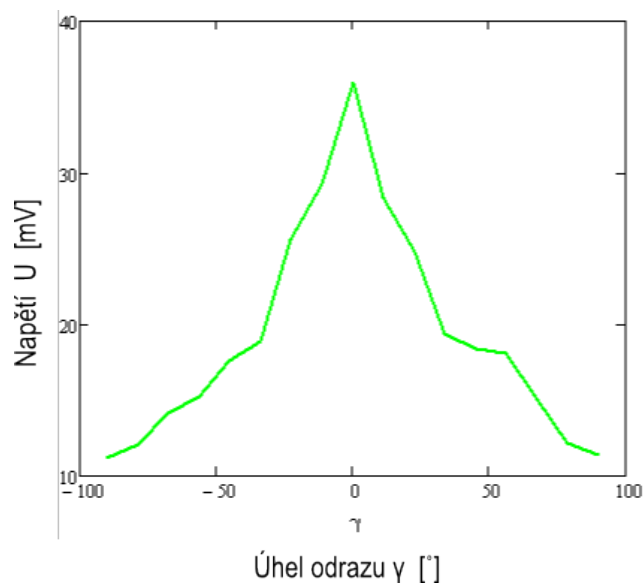


Obr. 3.13: Charakteristika odrazné Lambertovy plochy při změně směru zdroje záření. Červená křivka - bez použití Fresnelovy čočky; modrá křivka - s Fresnelovou čočkou; zelená křivka - simulovaná funkce cosinus (viz kapitola 3.2).

Míru přijatého optického výkonu vyjadřuje velikost napětí na straně přijímače. Na jedné straně modelu bylo umístěno pět přijímacích fotodiod společně s LED, LD diodou. Na protější straně byla odrazná Lambertova plocha. Úhel polovičního jasu je přibližně roven 50° , koeficient rozptylu $\sigma = 0,74$ a koeficient směrovosti je $n = 1$. Odrazná plocha typu Lambertového odražeče je vhodná z energetického hlediska pro návrh optické bezkabelové kvazidifúzní pasivní linky.

3.3.2 Odrazná plocha - bílý lesklý povrch

Druhou měřenou odraznou plochou byl bílý lesklý fotopapír. Jeho rozptylová charakteristika je smíšený odraz, ale přibližuje se k odrazu zrcadlovému. Očekává se tedy charakteristika více strmá a matematický model s vyšším koeficientem směrovosti. První měření s nekolimovaným optickým signálem má rozptylovou charakteristiku na obr. (3.14). Výsledné grafy jsou na obr. (3.15), kde jsou v porovnání dva optické zdroje, pravý nekolimovaný a levý kolimovaný optický signál.

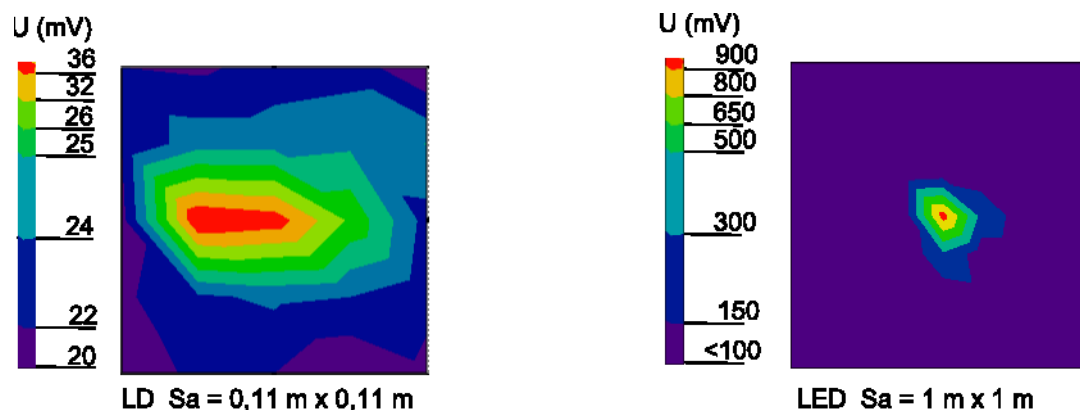


Obr. 3.14: Výsledná charakteristika optické relativní intenzity na smíšené ploše.

Pro určení velikosti relativní optické intenzity platí vztahy (3.10):

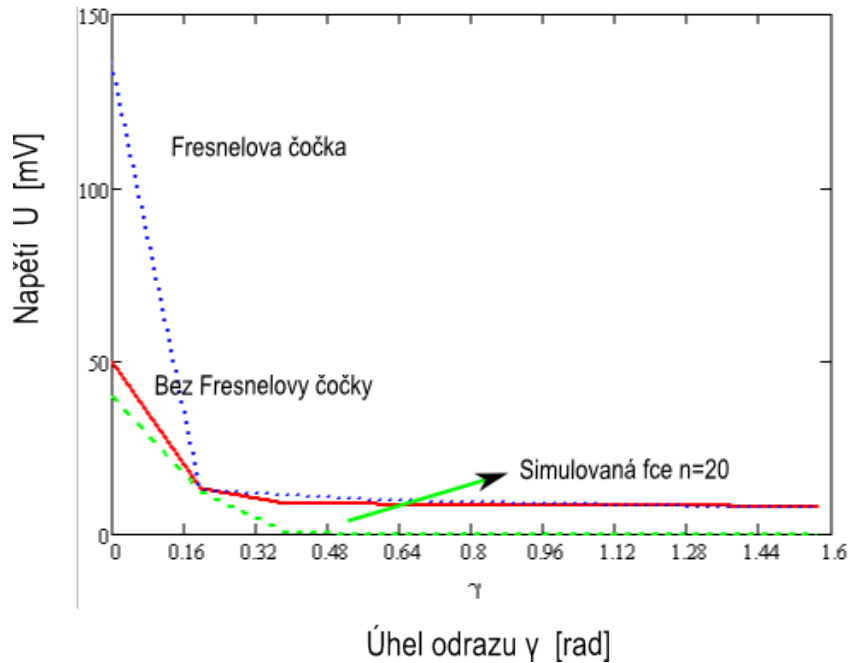
$$I = \frac{P_p}{S_a}; [W/m^2], S_U = \frac{U}{P_p}; [V/W], \quad (3.10)$$

kde I je optická intenzita, S_U napěťová citlivost, U změřené elektrické napětí, P_p je přijímaný výkon a S_a je obsah aktivní plochy fotodiody. Parametry fotodiody jsou uvedeny v (A.7). Stejně vztahy platí i pro graf na obr. (3.15).



Obr. 3.15: Graf dopadajícího optického signálu na matici fotodetektorů ze smíšené plochy. Vpravo - celoplošné zobrazení LED; vlevo - vybraná středová část LD.

Následující graf (viz obr. 3.16) zobrazuje rozptylovou charakteristiku pro lesklý bílý papír s použitím Fresnelovy čočky a bez ní. V grafu je naznačena zelenou křivkou hledaná funkce cosinus (3.8). Výsledky se shodují s tvrzením vyššího koeficientu směrovosti.

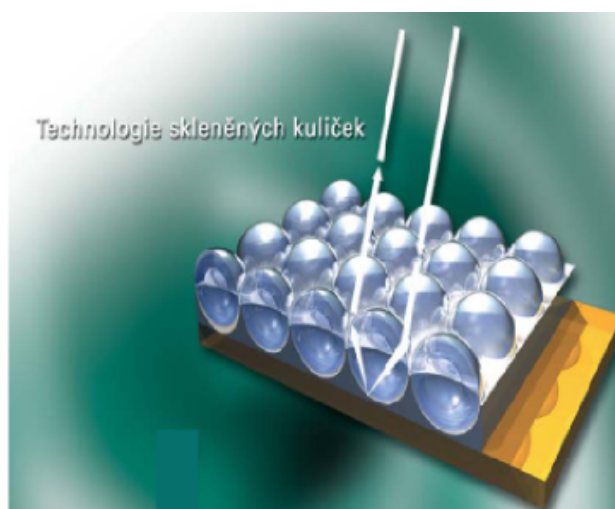


Obr. 3.16: Charakteristika odrazné smíšené plochy (fotopapír) při změně směru zdroje záření. Červená křivka - bez použití Fresnelovy čočky; modrá křivka - s Fresnelovou čočkou; zelená křivka - simulovaná funkce cosinus (viz kapitola 3.2).

Výsledky odrazné bílé lesklé plochy jsou: úhel polovičního jasu je přibližně roven 22° , koeficient rozptylu $\sigma = 0,25$ a koeficient směrovosti je $n = 20$. Poměrná směrová odrazivost bílého lesklého papíru je $PSO = 1,3$ pro kolmý dopad optického paprsku. Odrazná plocha typu bílé lesklé plochy je z energetického hlediska vhodná pro návrh optické bezkabelové kvazidifúzní aktivní linky.

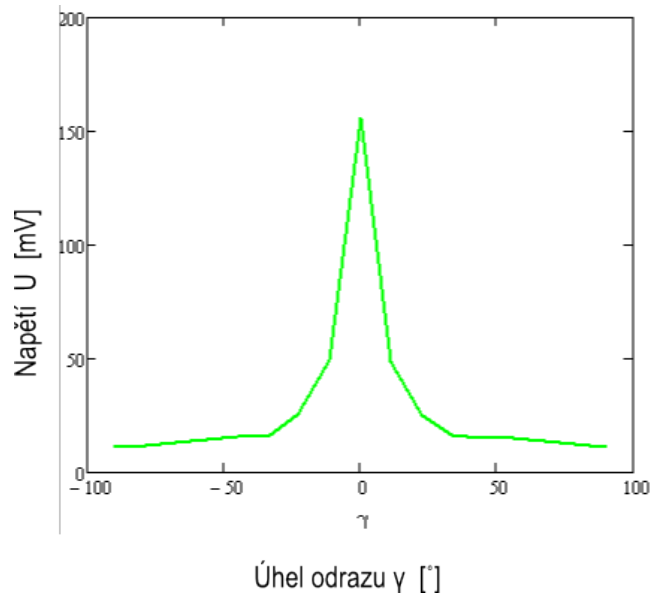
3.3.3 Odrazná plocha - reflexní materiál

Poslední měřenou odraznou plochou byl reflexní pruh. Ten se velmi často objevuje na různých částech oblečení nebo dopravních značkách pro zviditelnění. Využívá se jev *retroreflexe*, světelné paprsky dopadající na povrch reflexního pásku jsou odráženy zpět ve stejném směru, ve kterém přicházejí. Technologie reflexního materiálu (viz obr. 3.17) je založena na vrstvě mikroskopických skleněných kuliček opatřených ze zadní strany zrcadlovou plochou, které jsou připevněny na podkladové vrstvě tkaniny. Na 1 cm² tkaniny se nachází až 30 000 skleněných kuliček. Tyto kuličky jsou pak zodpovědné za to, že světlo dopadající na pruh reflexního materiálu je po dvojitým lomu odraženo zpět ke zdroji [14].



Obr. 3.17: Principy reflexních ploch 3M Scotchlite (převzato z [14]).

Rozptylová charakteristika reflexního pásku je znázorněna na obr. (3.18). Na charakteristice je dobře viditelná vysoká strmost pro nulový úhel odrazu, toho se právě využívá v kontrastu ve tmavém prostředí (řidič v noci). Výsledné grafy jsou na obr. (3.19), zde je názorné zaměření optického signálu do středu místa pozorování. Výsledky reflexní odrazné plochy potvrzují parametry: úhel polovičního jasu je roven 5°, koeficient rozptylu $\sigma = 0,11$ a koeficient směrovosti je $n \gg 40$. Poměrná směrová odrazivost reflexní odrazné plochy je $PSO = 4,5$ pro kolmý dopad optického paprsku. Výsledky pro reflexní plochu potvrzují informace od výrobce [14]. Studie prováděné výrobcem reflexních ploch uvádějí velmi vysokou úroveň odražené záře v prostoru zdroje. Úhel osvitů z údajů výrobce je roven $\sigma = 0,33^\circ$.

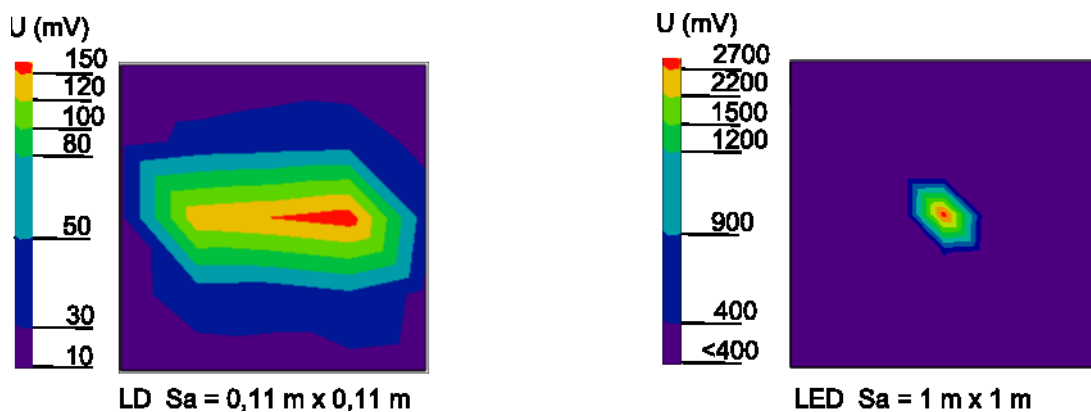


Obr. 3.18: Výsledná charakteristika optické relativní intenzity na reflexní ploše.

Pro určení velikosti relativní optické intenzity platí vztahy (3.11):

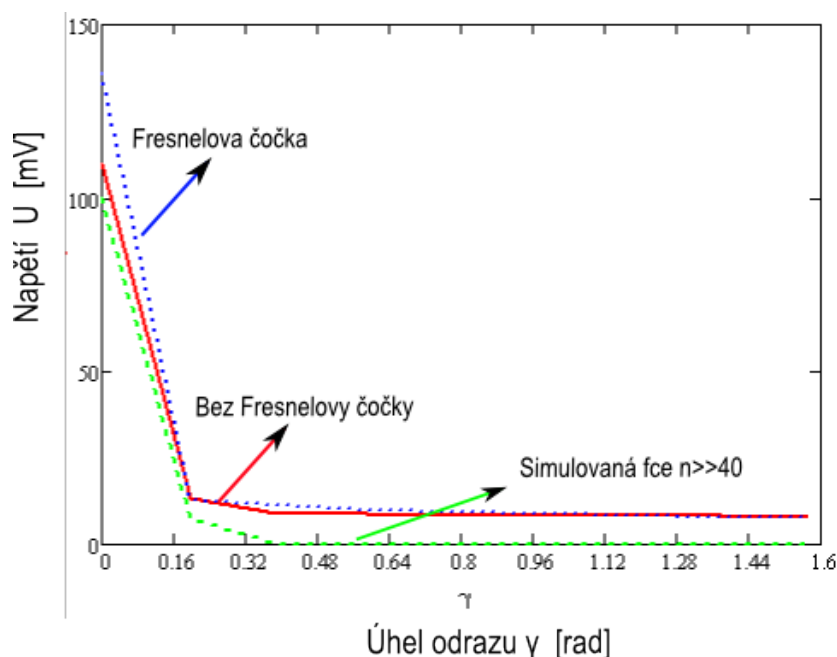
$$I = \frac{P_p}{S_a}; [W/m^2], S_U = \frac{U}{P_p}; [V/W], \quad (3.11)$$

kde I je optická intenzita, S_U napěťová citlivost, U změřené elektrické napětí, P_p je přijímaný výkon a S_a je obsah aktivní plochy fotodiody. Parametry fotodiody jsou uvedeny v (A.7). Stejně vztahy platí i pro graf na obr. (3.19).



Obr. 3.19: Graf dopadajícího optického signálu na matici fotodetektorů z reflexní plochy. Vpravo - celoplošné zobrazení LED; vlevo - vybraná středová část LD.

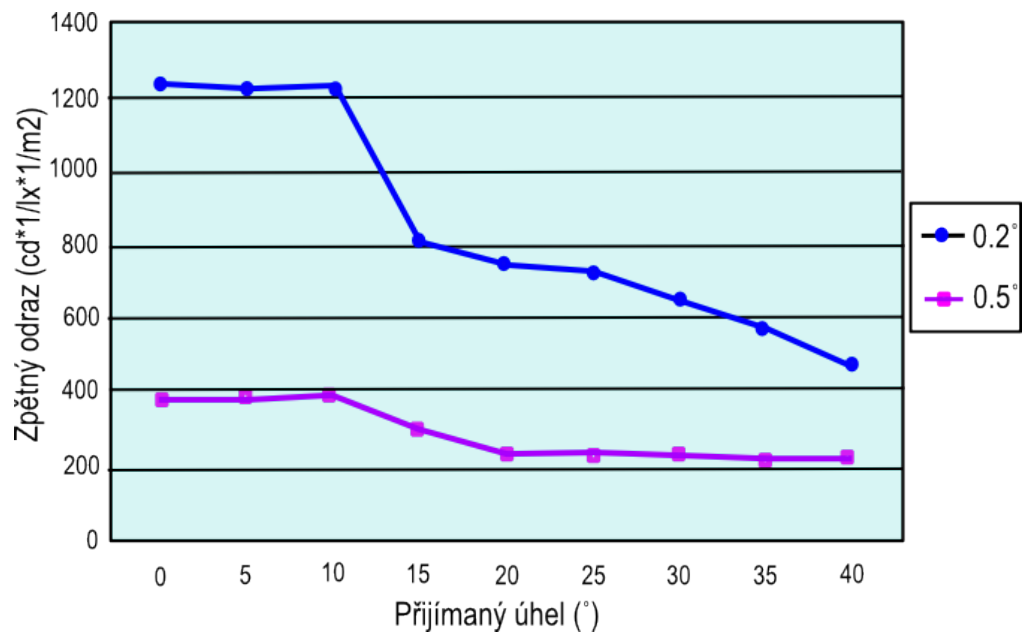
Následující graf (viz obr. 3.20) zobrazuje rozptylovou charakteristiku pro reflexní odraznou plochu s použitím Fresnelovy čočky a bez ní.



Obr. 3.20: Charakteristika odrazné reflexní plochy při změně směru zdroje záření. Červená křivka - bez použití Fresnelovy čočky; modrá křivka - s Fresnelovou čočkou; zelená křivka - simulovaná funkce cosinus (viz kapitola 3.2).

Na obr. (3.21) je graf, který udává měřený zpětný odraz v jednotkách $\text{cd} \cdot \text{lx}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ a přijímaný úhel pozorovatele [15], [14]. Graf (viz obr. 3.21) potvrzuje správnost měření. Rozptýlené záření od odrazné reflexní plochy je závislé na charakteristice zdroje optického záření. V případě úzkého kolimovaného zdroje světla je zpětný úhel odrazu velmi malý. Pokud je vysílán na reflexní plochu kužel světla s větší úhlovou šířkou paprsku, zpětný úhel odrazu se patřičně zvětší. Měření této plochy bylo velmi zajímavé, využití je možné nejen u pasivních kvazidifúzních bezvláknových sítí, ale také u aktivních.

Na obr. (3.22) jsou fotografie z měření odrazných ploch. Na jedné straně měřicí komory jsou fotodetektory společně se zdrojem záření a na straně druhé je měřená odrazná plocha. Pro výše uvedené odrazné plochy jsou naměřená data i s programem pro matematickou simulaci odrazivosti plochy uvedeny v příloženém CD v diplomové práci.



Obr. 3.21: Závislost zpětného odrazu na přijímaném úhlu (převzato z [15]).



Obr. 3.22: Fotografie z měření odrazných ploch

4 OPTICKÉ PŘIJÍMAČE PRO VNITŘNÍ BEZ-KABELOVOU SÍŤ

Jako přijímací optický prvek se velmi často používá *fotodetektor*. Fotodetektory jsou velmi důležitou součástí optických přenosových systémů a určují celkovou výkonnost a účinnost systému. Základním úkolem fotodetektoru je přeměna světla na elektrický signál. Světlo, které prochází vláknem nebo atmosférou a dopadá na detektor, se musí převést na elektrický signál [4].

4.1 Fotodiody

Existují dva základní typy fotodiody: *fotodiody PIN* a *lavinové fotodiody APD*. Fotodiody pracují nejčastěji ve *fotovodivostním* režimu, kdy dioda pracuje ve třetím kvadrantu své voltampérové charakteristiky. Pro vodivostní režim je charakteristická větší oblast prostorového náboje, menší kapacita přechodu, rychlejší pohyb nosičů náboje a lineární odezva. Dnes je to nejvíce používaný režim.

4.1.1 PIN fotodiody

U fotodiody PIN se mezi polovodič typu p a n vkládá vrstva izolantu i . Vrstvou i se rozšiřuje oblast interakce fotonů s látkou. Po osvětlení aktivní plochy fotodiody vznikají volné nositelé náboje, které se vlivem vnějšího pole rychle přemísťují (*drift*) k přechodům $p - i$ a $i - n$. Zařazením vrstvy i se dosahuje vyšší citlivosti. *Proudová citlivost* S_I fotodiody se definuje jako proud na jejím výstupu I vztažený k jednotce optického výkonu, který na fotodiodu dopadá. Citlivost fotodiody je spektrálně závislá. Např. u křemíkových PIN fotodiody se dosahuje maximální citlivosti $0,6 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}$ pro délku vlny 900 nm . Podobně je definovaná *napěťová citlivost* S_U , jako napětí U na výstupu fotodiody vztažené k jednotce optického výkonu, který na fotodiodu dopadá [4].

4.1.2 Lavinové fotodiody

Další zvýšení citlivosti fotodiody se dosáhlo rozšířením vrstvy i a zvýšením přiloženého napětí U . U fotodiody takové konstrukce dochází k vnitřnímu zesílení, které je způsobené *lavinovým jevem*. Uvolněné elektrony po interakci s fotony jsou urychlovány relativně vysokým přiloženým napětím ($U = 100 \text{ V}$) a strhávají k uvolnění další elektrony. Fotodiody této konstrukce se nazývají *lavinová fotodiody APD*.

Podobně jako polovodičové lasery jsou i fotodiody na optickém vstupu pouzdra opatřeny buď okénkem (pro příjem optického výkonu z volného prostoru), nebo tzv. *pigtailem* (jsou-li určeny pro detekci výkonu z vlákna). Důležitým parametrem fotodiody je *bariérová kapacita* C_b ($p - n$) přechodu. Tato veličina je závislá na velikosti aktivní plochy. Typická hodnota je 10pF.

Velikost aktivní plochy bývá tvaru kruhu s průměrem od 0,1mm do 3mm (i více). Čím větší je aktivní plocha fotodiody, tím větší výkon přijímá, ale zvyšuje se *časová konstanta* τ . Šumové vlastnosti fotodiody jsou definovány veličinou *výkon ekvivalentní šumu* NEP. NEP určuje střední výkon harmonicky modulovaného optického výkonu, při kterém je střední hodnota napětí na fotodiodě rovna standardní odchylce šumového napětí [4].

4.2 Systémové řešení přijímače

Na přijímací straně je vhodné, aby fotodiody měla co největší citlivost na záření v přijímané vlnové délce. Parametry fotodetektorů velmi ovlivňují parametry přenosové linky, a tedy jsou důležité.

Základní parametry, charakteristiky optických přijímačů:

1. Proudová citlivost S_I
2. Kvantová účinnost η
3. Proud za tmy I_d
4. Spektrální charakteristika citlivosti S_λ
5. Doba odezvy t_r
6. Velikost aktivní plochy S_a
7. Výkon ekvivalentní šumu NEP

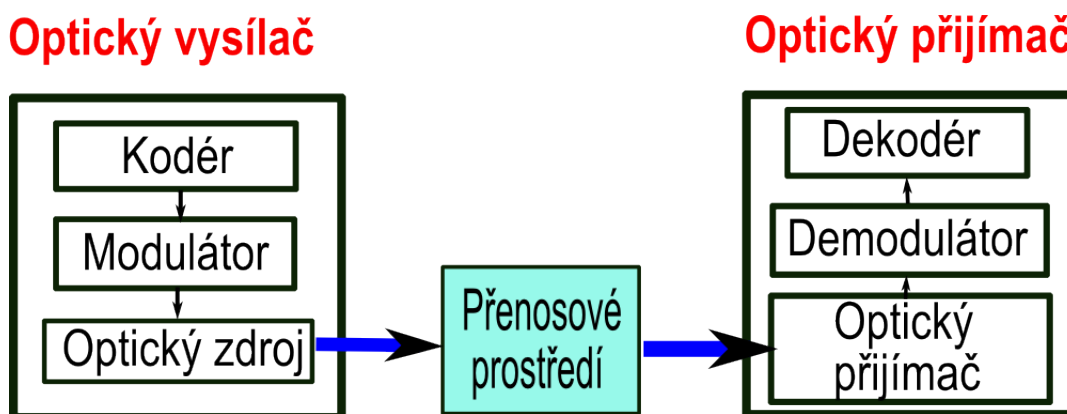
Důležitou poznámkou je problematika šumů ve fotodetekci signálů. Platí, že činnost fotodiody je omezena *výstřelovým šumem*, pracuje-li fotodiody s vysokým zesílením. V opačném případě bude omezena *tepelným šumem*, v ideálním případě (vysoké zesílení a nízká teplota) je fotodiody omezena pouze *fotonovým šumem* [4]. Problematika šumů v procesu detekce optického signálu je velmi obsáhlá, z důvodu rozsáhlosti tématu je doporučena uvedená literatura.

5 PŘENOSOVÉ VLASTNOSTI NAVRHOVANÉHO SPOJE

Tato kapitola bude zaměřená teoretický rozbor parametrů optické bezvláknové linky. Bude objasněn výkonový úrovněový diagram a na závěr bude navrženo koncepční uspořádání optických linek.

5.1 Obecné schéma optické bezkabelové sítě

Optická bezkabelová komunikační síť je založena na principu uspořádání komunikačního řetězce. *Obecný komunikační řetězec* (viz obr. 5.1) je navržen pro přenos a zpracování optické informace. Skládá se z *optického vysílače*, *přenosového prostředí* a *optického přijímače* [4].



Obr. 5.1: Blokové schéma obecného komunikačního řetězce.

Optický vysílač může obsahovat *kodeč*, *modulátor* a *optický zdroj* (LD, LED). V optickém vysílači mohou být složitější elektronické prvky pro kvalitnější přenos, či optické prvky pro vhodnější navázání optického signálu do prostředí. Přenosové prostředí je v našem případě atmosféra. Vysílaný optický signál může být kódovaný, modulovaný a opticky upravený pro přenos atmosférickým prostředím. Posledním prvkem v přenosovém řetězci je optický přijímač. Přijímač může obsahovat *dekodér*, *demodulátor* a *fotodiodu* (APD, PIN). Optický přijímač je svým obsahem inverzně závislý na obsahu vysílače.

5.2 Parametry optické bezkabelové sítě

Pro posouzení kvality přenosového řetězce, případně pro návrh slouží parametry optické sítě. Grafický výstup těchto parametrů je výkonový úroňový diagram. Optická komunikační síť pracuje na principu namodulování přenášené informace na optický signál vlivem změny amplitudy, fáze či jiného parametru. Analogové i digitální modulace lze charakterizovat, bez ohledu na jejich typ, celou řadou parametrů. Mezi základní patří *šířka pásma modulovaného signálu* B [Hz], *poměr signál/šum* SNR [dB]. U digitálních modulací je to ještě navíc *energetická účinnost* η_e [-], *spektrální účinnost* η_s [-], *chybovost* BER [-], *přenosová* v_p [b/s] či *modulační* v_s rychlost [Bd].

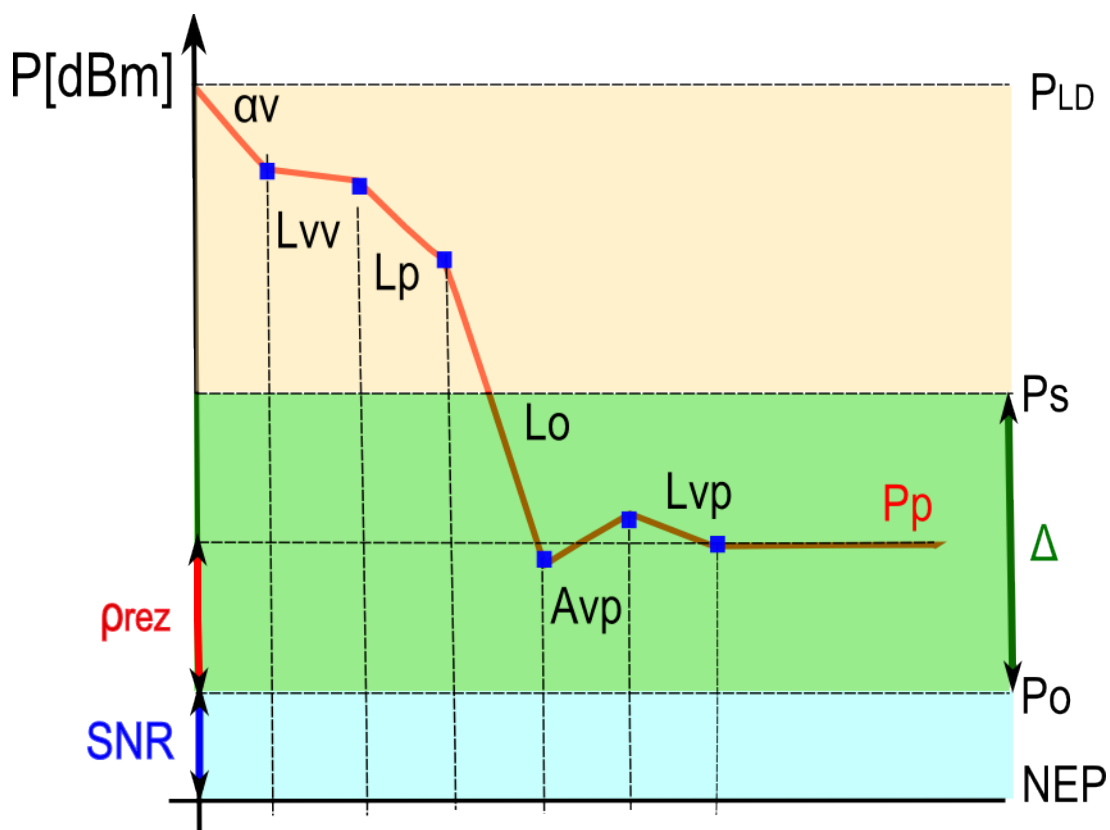
Signál, který přichází do optického vysílače, je tedy již modulován nebo kódován. Vysílač vysílá do atmosféry optický signál s určitým výkonem. *Výkon* laserové diody nebo LED diody značíme P_{LD} [W]. Velikost P_{LD} je vhodné dimenzovat s ohledem na délku spoje. Další parametry optických zdrojů jsou například *směrový vyzařovací diagram* $^\circ$, *vlnová délka* λ [m] a *svítivost* I [cd]. Více podrobností je uvedeno v kapitole (2).

Optický signál se dále šíří volnou atmosférou. Optický paprsek procházející takovým prostředím podléhá energetickým i tvarovým změnám. V atmosféře se objevuje hned několik možných útlumů. Mezi nejdůležitější patří *útlum šířením* L_o [dB]. Další možné útlumy jsou závislé na charakteru atmosféry. V našem případě budeme vycházet z požadavku měření v uzavřeném modelu místnosti, tedy jevy spojené s meteorologickými vlastnostmi atmosféry nebudou brány v úvahu. V přenosové cestě je využita nejen atmosféra, ale i případný odraz od odrazné plochy. Při dopadu optického signálu na odraznou plochu se mění jeho energetická hodnota podle charakteru odrazné plochy. V případě návrhu či energetické bilance optického spoje bude na tuto změnu pamatováno.

Na straně přijímače je vhodné převést optický modulovaný signál na elektrický. K tomuto účelu se používají fotodiody. Mezi důležité parametry fotodiody patří *produková citlivost* S_I [$A \cdot W^{-1}$], *kvantová účinnost* η [-], *proud za tmy* I_d [A], *aktivní plocha fotodiody* S_a [m^2], *barierová kapacita* C_b [F] a jiné. Více podrobností je uvedeno v kapitole (4). Úroveň šumu měřená při jednotkové šířce kmitočtového pásma se uvádí ve veličině NEP [$W \cdot Hz^{-1/2}$] ta odpovídá jednotkovému poměru efektivní hodnoty výkonu šumu vztahených na jednotku šířky pásma. Detekovaný elektrický signál je demodulován a v případě potřeby je možné ho dekódovat. Velmi důležitým parametrem přijímacího bloku je *citlivost přijímače* P_o [W], která se uvádí jako minimální optický výkon na vstupu přijímače, na který přijímač reaguje pro daný stanovený poměr SNR. V převážné většině aplikací přijímač určuje kvalitu celé přenosové linky. Mezi veličinami NEP, SNR, BER je velmi úzká vazba, které se bude věnovat následující podkapitola (5.3) [4],[8].

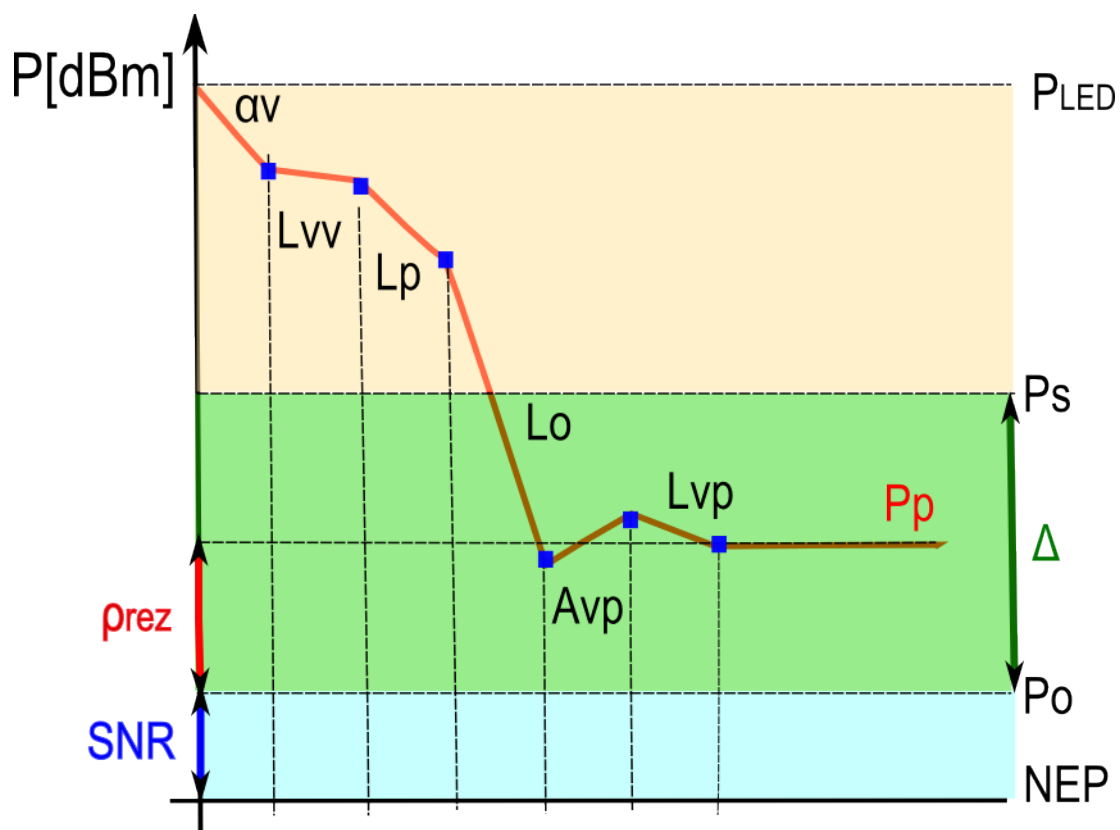
5.3 Popis výkonového úrovněvého diagramu

Základním nástrojem pro návrh optických sítí a výpočet základních parametrů optokomunikačního systému je *výkonový úrovněvý diagram*. V diagramu jsou znázorněny výkonové úrovně průběžných velikostí signálů v nejdůležitějších bodech optické trasy. Na obr. (5.2) je znázorněný obecný výkonový diagram pro optický zdroj typu LD.



Obr. 5.2: Obecný výkonový úrovněvý diagram pro IWOL s využitím LD. (α_v - rozložení optického výkonu v kruhovém svazku, L_{vv} - útlum vazby na vysílací optické apertuře, L_p - útlum na odrazné ploše; L_o - útlum šířením; A_{vp} - zisk na přijímací optické apertuře; L_{vp} - útlum vazby na přijímací optické apertuře; P_{LD} - výkon laserové diody; P_s - saturační výkon; P_p - přijímaný výkon; P_o - citlivost přijímače; NEP - výkon ekvivalentní šumu; SNR - poměr signál/šum; ρ_{rez} - rezerva spoje; Δ - dynamika přijímače.)

Následující výkonový úrovnový diagram (viz obr. 5.3) je určen pro optické zdroje typu LED.



Obr. 5.3: Obecný výkonový úrovnový diagram pro IWOL s využitím LED. (α_v - rozložení optického výkonu v kruhovém svazku, L_{vv} - útlum vazby na vysílací optické apertuře, L_p - útlum na odrazné ploše; L_o - útlum šířením; A_{vp} - zisk na přijímací optické apertuře; L_{vp} - útlum vazby na přijímací optické apertuře; P_{LED} - výkon LED diody; P_s - saturační výkon; P_p - přijímaný výkon; P_o - citlivost přijímače; NEP - výkon ekvivalentní šumu; SNR - poměr signál/šum; ρ_{rez} - rezerva spoje; Δ - dynamika přijímače.)

Oba typy optických zdrojů se chovají odlišně v rámci IWOL, tedy je výhodné je odlišit. Všechny uvedené hodnoty jsou v logaritmické míře. Základním principem diagramu je rovnice (5.1) pro *energetickou bilanci spoje*.

$$P_p = P_{LD,LED} - L_c - A_c; [dB], \quad (5.1)$$

kde P_p je hodnota přijímaného výkonu, P_{LD} , P_{LED} je vysílaný výkon, L_c zahrnuje všechny útlumy během přenosové trasy a A_c všechny zisky během přenosové trasy. Pro správnou činnost systému je nutné, aby velikost přijímaného výkonu P_p byla větší, nebo minimálně rovná součtu všech ztrát během přenosové trasy.

Výchozím bodem úrovnového diagramu je *výkon vysílače* P_{LD} , P_{LED} [dBm]. Velikost vysílaného výkonu je nutné dimenzovat. Nesmí překročit bezpečnou hodnotu infračerveného záření z hlediska zdraví očí. Zároveň však musí být tak velký, aby byl schopen dopravit vysílanou informaci k přijímači i přes vzniklé útlumy v přenosové cestě. Při navrhování IWOL je možné použít svazek *kolimovaný* a *nekolimovaný*. U kolimovaného svazku je optická intenzita v blízkosti optické osy. Hodnotu vysílaného výkonu u kolimovaného svazku je možné na základě energetické bilance volit nižší než u nekolimovaného svazku. Nekolimované světlo vytváří stopu o větším obsahu než kolimované. Proto bude jeho optická intenzita v rovině přijímače menší a je nutné nastavit větší vysílací výkon.

Důležitou informací pro zhodnocení vhodné úrovně vysílaného výkonu je *kontinuální* nebo *impulsní* režim. Optický zdroj v kontinuálním režimu trvale září optický signál do prostoru. Při nadměrném překročení maximální úrovně vysílaného výkonu dochází ke značnému zahřívání optického zdroje. V poslední době je problematika teplotní regulace řešena elektronickou zpětnou vazbou. Hodnota vyzářeného výkonu optického zdroje v impulsním režimu může být podstatně vyšší, to znamená, že se může překročit úroveň výkonu pro kontinuální vysílání.

Výkon, který je přijímán přijímačem, je *přijímaný výkon* P_p . Velikost přijímaného výkonu P_p musí být větší než *citlivost přijímače* P_o . Jejich rozdíl se nazývá *rezerva systému* ρ_{rez} [dB], rovnice (5.2)

$$\rho_{rez} = P_p - P_o; [dB]. \quad (5.2)$$

Systémová rezerva je záležitost, která se zvažuje s ohledem na charakter spojení. Pokud je optokomunikační spoj provozován v nestabilních podmínkách, doporučuje se volit systémovou rezervu $\rho_s \geq 6dB$.

Citlivost přijímače P_o je poměr mezi maximální možnou úrovní šumu a zároveň minimální možnou úrovní signálu, tedy poměr SNR [dB] nad úrovní NEP. Hodnotě SNR odpovídá velikost bitové chybovosti daného systému. Bitová chybovost BER systému je poměr chybně přenesených bitů za 1 sekundu a celkovým počtem přenesených bitů za 1 sekundu. Hodnoty veličin SNR [dB] a BER jsou navzájem závislé a určí odstup minimální hodnoty přijímaného výkonu P_o od maximální hodnoty šumu v systému NEP. Šumy v systému jsou velmi širokou problematikou, která by přesahovala rámec diplomové práce.

Hodnota maximálního možného výkonu je *saturační výkon* P_{sat} . Při této hodnotě není schopen přijímač rozeznat jakoukoliv změnu informace namodulovanou na optický signál. Rozdíl mezi hodnotou saturačního výkonu P_{sat} a hodnotou minimálního výkonu P_o je definován jako *dynamika přijímacího systému* Δ [dB] viz rovnice (5.3).

$$\Delta = P_{sat} - P_o; [dB]. \quad (5.3)$$

Nedílnou součástí výkonového úrovnového diagramu jsou útlumy, které mohou vzniknout při přenosu informace v rámci systému. Prvním útlumem na vysílací straně je pokles vysílaného výkonu způsobený optickou soustavou. *Účinnost vazby vysílače a optické soustavy*, která umožní kolimovat vysílaný optický paprsek je značena L_{vv} . Velikost útlumu L_{vv} je v praxi přibližně 1 dB, ale jeho hodnota se mění dle charakteru optického systému.

Na straně druhé může vzniknout pokles výkonu způsobený vazbou přijímací optické soustavy a aktivní plochou fotodiody. *Účinnost vazby přijímací optické soustavy a přijímače* L_{vp} je závislá na velikosti plochy fotodiody S_a a parametrech přijímací optické soustavy. Často bývá L_{vp} rovno 0 dB. Musí být splněna podmínka, kdy velikost plochy fotodiody musí být větší nebo rovná velikosti skvrny, kterou vytváří přijaté záření. Ve výkonové úrovnové rovnici je nutné zahrnout zisky na optické soustavě A_c . Zesílení přijímací soustavy je dáno poměrem ploch přijímací optické soustavy a plochy fotodiody. Rovnice pro výpočet zisku přijímací soustavy je (5.4):

$$A_{vp} = 20 \cdot \log \left[\frac{S_{POS}}{S_a} \right]; [dB], \quad (5.4)$$

kde veličina S_{POS} udává obsah optické soustavy u přijímače a S_a obsah aktivní plochy fotodiody. Zisky optických soustav je vhodné uvažovat při každém použitém optickém prvku. Optický signál je přenášen volnou atmosférou. V kapitole (5.2) již bylo uvedeno, že nebudou brány v úvahu další jiné útlumy atmosféry než *útlum šířením* L_o , který je závislý nejen na vzdálenosti L_v [m], ale také na parametrech použitých optických soustav. Rovnice pro výpočet je (5.5):

$$L_o = 20 \cdot \log \left[\frac{L_v}{D_p} \right]; [dB], \quad (5.5)$$

kde veličina D_p [m] udává průměr optické soustavy u přijímače. Velmi často je pro příjem tak krátkých vlnových délek nutná přímá viditelnost přijímače a vysílače. V našem případě je pro příjem vysílané optické informace využita odrazná plocha, překážka, případně zeď místnosti. V kapitole (3) byly posouzeny parametry různých odrazných ploch a jejich charakter odražené záře. Na různých odrazných materiálech vzniká útlum optického záření nebo zvýšení optické intenzity v určitém směru záření. Tento jev je využit pro výpočet přijímaného výkonu P_p , který dopadá na plochu fotodiody. Hodnotu poklesu či vzestupu optického záření udává veličina $\tilde{\rho}$ (viz kap. 3). Celková rovnice pro P_p IWOL se zdrojem optického záření LED zní (5.6):

$$P_p = \left[P_{LED} - 6,0 - L_{vv} + 10 \cdot \log(\tilde{\rho}) - 20 \cdot \log\left(\frac{L_v}{D_p}\right) - L_{vp} \right]; [dBm]. \quad (5.6)$$

Rovnice pro P_p IWOL se zdrojem optického záření LD zní (5.7):

$$P_p = \left[P_{LD} - 6,7 - L_{vv} + 10 \cdot \log(\tilde{\rho}) - 20 \cdot \log\left(\frac{L_v}{D_p}\right) - L_{vp} \right]; [dBm]. \quad (5.7)$$

Rovnice (5.6) a (5.7) platí pro nelambertovské plochy. Velikost koeficientu směrovosti n a koeficientu odrazivosti A_n se volí s ohledem na použitou odraznou plochu (viz příloha (B)). Pro případ Lambertovy plochy a LED vysílače platí rovnice (5.8):

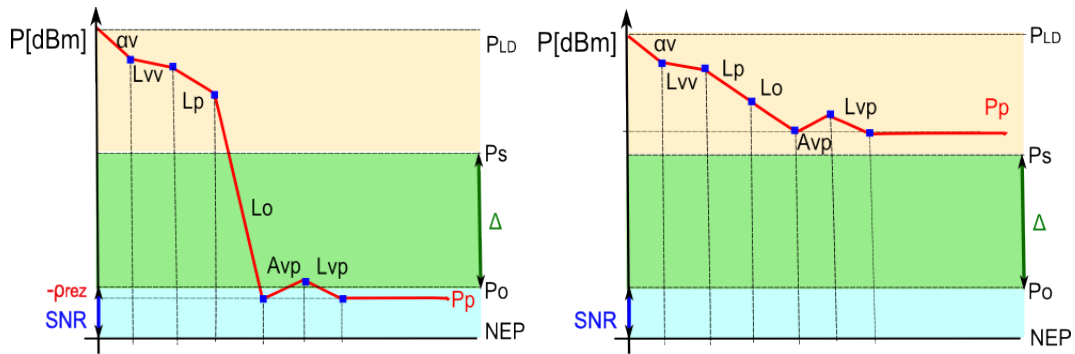
$$P_p = \left[P_{LED} - 6,0 - L_{vv} + 10 \cdot \log(\rho \cdot \cos(\gamma)) - 20 \cdot \log\left(\frac{L_v}{D_p}\right) - L_{vp} \right]; [dBm]. \quad (5.8)$$

Pro LD vysílač a Lambertovu plochu platí (5.9):

$$P_p = \left[P_{LD} - 6,7 - L_{vv} + 10 \cdot \log(\rho \cdot \cos(\gamma)) - 20 \cdot \log\left(\frac{L_v}{D_p}\right) - L_{vp} \right]; [dBm]. \quad (5.9)$$

Pokud bude při návrhu IWOL použita jiná odrazná plocha než Lambertova, definovaná odrazivostí ρ v rozmezí $\in \langle 0; 1 \rangle$, je vhodné násobit funkci \cos ve vztahu (5.8) a (5.9) touto odrazivostí ρ .

V případě špatné volby parametrů pro IWOL může vypadat výkonový úrovnový diagram jako na obr. (5.4).

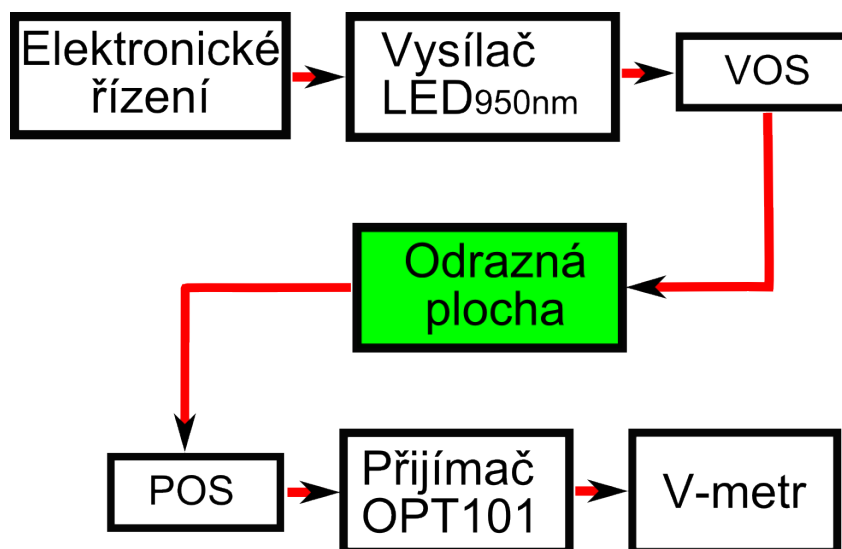


Obr. 5.4: Vlevo: Výkonový úrovnový diagram při příliš nízké hodnotě P_{LD} ; vpravo: Výkonový úrovnový diagram při příliš vysoké hodnotě P_{LD} .

Na levé straně hodnota detekovatelného výkonu P_p přesahuje minimální hodnotu detekovatelnou přijímačem, tedy hodnotu citlivosti přijímače P_o . V tomto případě není přijímač schopen detekovat přijímaný signál. Bude porušena úroveň zadané SNR. Byla zvolena příliš nízká hodnota vysílacího výkonu P_{LD} . Napravo je opačný problém, kdy hodnota vysílaného optického záření P_{LD} je vysoká. I přes útlumy v přenosové cestě je na straně přijímače hodnota detekovaného výkonu P_p příliš vysoká a přesahuje hodnotu maximální úrovně saturačního výkonu P_{sat} .

5.4 Návrh kvazidifúzní pasivní optické bezkabelové linky

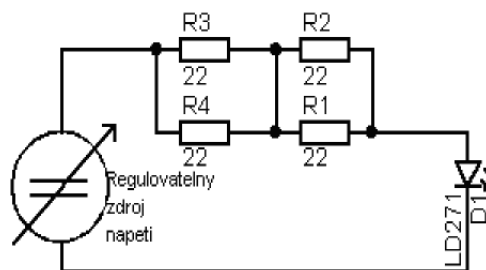
Kvazidifúzní pasivní linka IWOL je založena na principu nasměrování optického vysílače na jedno odrazné místo a díky jeho odrazným vlastnostem vzniká spojení s optickým přijímačem. Navržené blokové schéma je na obr. (5.5). Podrobné parametry a přesné zapojení je uvedeno v kapitole (5.4.1).



Obr. 5.5: Blokové schéma kvazidifúzní pasivní optické bezkabelové linky. (*VOS* vysílací optická soustava, *POS* přijímací optická soustava.)

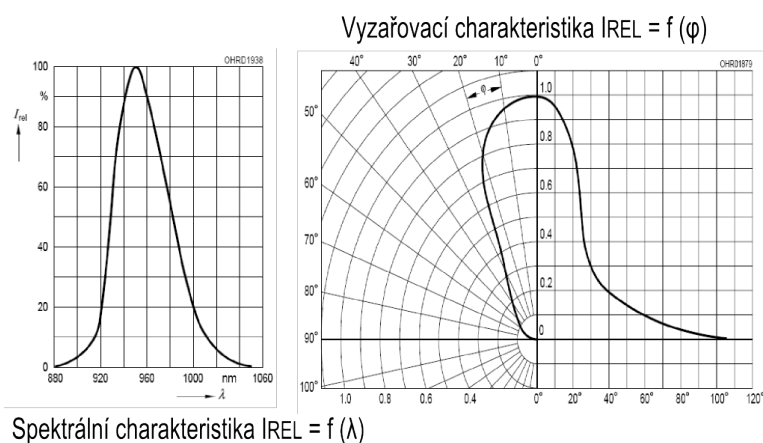
5.4.1 Koncepte kvazidifúzní pasivní optické bezkabelové linky

Optický vysílač: Schéma optického vysílače na obr. (5.6). Jako zdroj optického záření je použita infra LED dioda. Její optický paprsek není kolimován žádnou optickou soustavou. Využívá se pouze její pouzdro od výrobce. Vysílací dioda typu IR LD271 je připojena na zdroj napětí přes ochranné rezistory. Pro usnadnění práce je použit zdroj s možností změny výstupního napětí, čímž je dosahováno snadné změny buďícího proudu a tím i vyzářeného výkonu P_{LD} .



Obr. 5.6: Schéma optického vysílače

Měřená hodnota vyzářeného výkonu P_{LD} je 130mW. Vyzářovací diagram a spektrální závislost je na obr. (5.7).



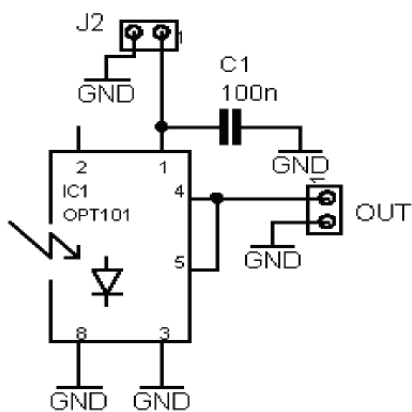
Obr. 5.7: Vlevo: Vyzářovací diagram IR diody LD 271; vpravo: Spektrální závislost IR diody LD 271 (převzato z [19])

Při měření s kolimovaným paprskem byl využit zapůjčený optický zdroj s laserovou diodou LD o vlnové délce $\lambda = 808\text{nm}$ s kolimátorem. Vyzářený výkon P_{LD} je 3mW. Seznam použitých součástí, desky navržených plošných spojů a průběhy z měření jsou uvedeny v příloze (A.2), (A.1), (A.5), [19].

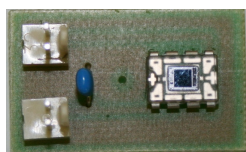
Odrázná plocha: Pro přenos optického signálu k více příjemcům je použita odrazná plocha. Odrázná plocha by měla být difúzní, proto je z měřených prvků nejvhodnější povrch podobný Lambertově ploše. V experimentálním měření se Lambertově ploše podobal bílý matný povrch (primalex). Jeho simulovaná charakteristika je podrobně popsána v kapitole (3.3).

Optický přijímač: Schéma zapojení optického přijímače je na obr. (5.8). Na straně přijímače je s výhodou použit obvod OPT101, který v sobě integruje přijímací PIN fotodiodu, převodník proud - napětí a v případě potřeby je možné využít vnitřní zesilovač či kompenzaci nuly na výstupu. Kompenzace ani zesilovač v našem případě nebyly nutné, a proto je konstrukce velice jednoduchá.

Fotografie optického přijímače je na obr. (5.9). Parametry optického přijímače jsou uvedeny v tab. (A.5) v příloze (A.7). Seznam použitých součástek, desky navržených plošných spojů a průběhy z měření jsou uvedeny v příloze (A.2), (A.1), (A.5), [19].



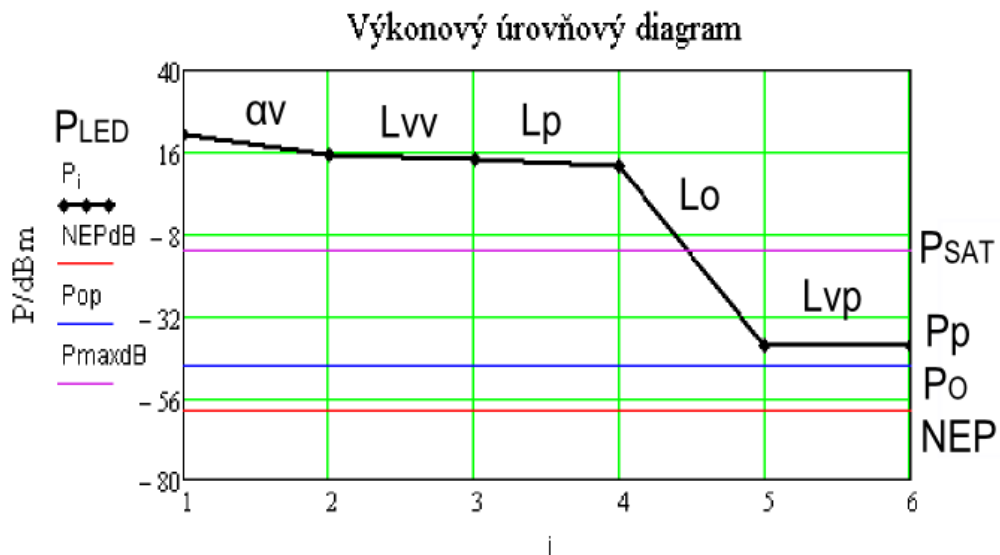
Obr. 5.8: Schéma optického přijímače



Obr. 5.9: Fotografie optického přijímače

5.4.2 Výkonový úrovnňový diagram kvazidifúzní pasivní optické bezkabelové linky

Grafické zhodnocení kvazidifúzní pasivní bezkabelové linky s nekolimovaným optickým zdrojem záření je na obr. (5.10).

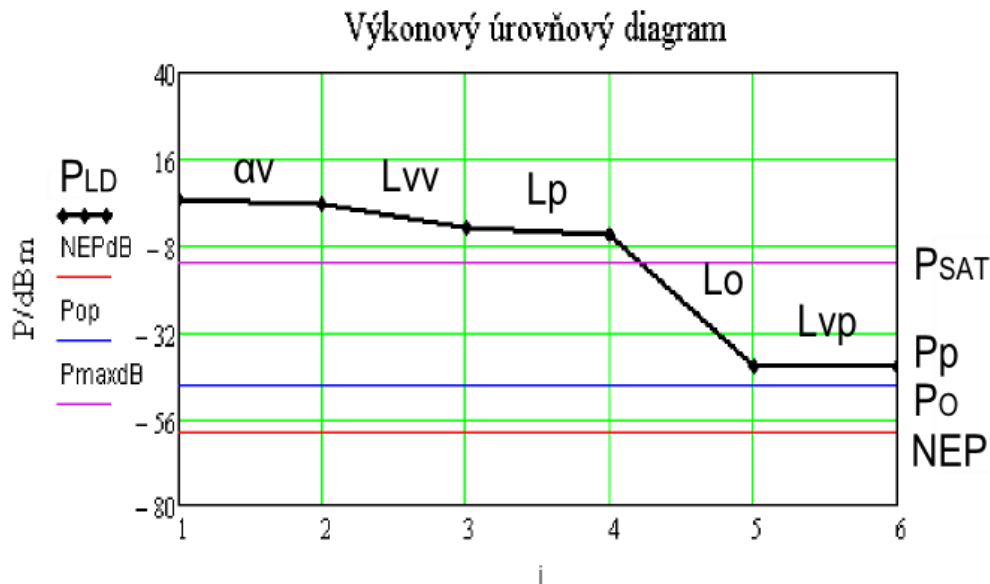


Obr. 5.10: Výkonový úrovnňový diagram optické kvazidifúzní pasivní linky s nekolimovaným zdrojem optického záření. (α_v - rozložení optického výkonu v kruhovém svazku, L_{vv} - útlum vazby na vysílací optické apertuře, L_p - útlum na odrazné ploše; L_o - útlum šířením; L_{vp} - útlum vazby na přijímací optické apertuře; P_{LED} - výkon LED diody; P_{sat} - saturační výkon; P_p - přijímaný výkon; P_o - citlivost přijímače; NEP - výkon ekvivalentní šumu.)

Parametry optické kvazidifúzní pasivní linky bez kolimovaného paprsku:

- Chybovost BER je 10^{-9} .
- Odstup signálu od šumu SNR je 13,5 dB.
- Pokles výkonu α_v je 6dB.
- Útlum šířením L_o je 52dB.
- Útlum vazby na vysílací straně L_{vv} je 1dB.
- Útlum vazby na přijímací straně L_{vp} je 0dB.
- Šířka pásma B je $14 \cdot 10^3$ Hz.
- Poměrná směrová odrazivost $\tilde{\rho}$ ($A_n=0,637$; $n=2$) jsou -2dB.
- Velikost detekovatelného výkonu P_p je -40dBm.
- Velikost maximálního výkonu P_{sat} je -13dBm.
- Velikost minimálního výkonu P_o je -60dBm.

Na druhém výkonovém úrovněm diagramu (viz obr. 5.11) byl použit kolimovaný optický zdroj záření bez přijímací Fresnelovy čočky.

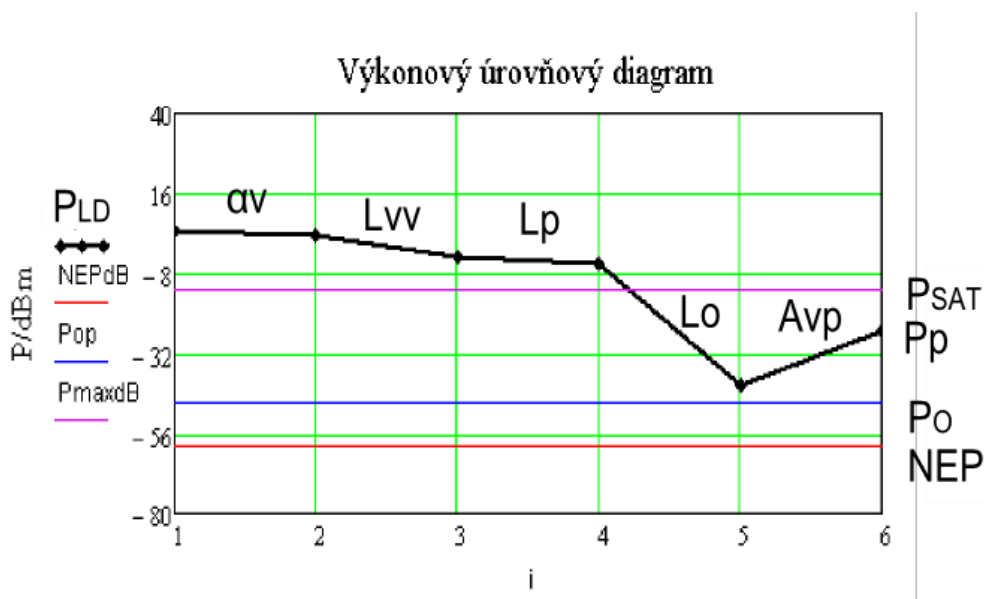


Obr. 5.11: Výkonový úrovněm diagram optické kvazidifúzní pasivní linky s kolimovaným zdrojem optického záření bez použití Fresnelovy čočky. (α_v - rozložení optického výkonu v kruhovém svazku, L_{vv} - útlum vazby na vysílací optické apertuře, L_p - útlum na odrazné ploše; L_o - útlum šířením; L_{vp} - útlum vazby na přijímací optické apertuře; P_{LD} - výkon laserové diody; P_{sat} - saturační výkon; P_p - přijímaný výkon; P_o - citlivost přijímače; NEP - výkon ekvivalentní šumu.)

Parametry optické kvazidifúzní pasivní linky s kolimovaným paprskem:

- Chybovost BER je 10^{-9} .
- Odstup signálu od šumu SNR je 13,5 dB.
- Pokles výkonu α_v je 6,7dB.
- Útlum šířením L_o je 37dB.
- Útlum vazby na vysílací straně L_{vv} je 1dB.
- Útlum vazby na přijímací straně L_{vp} je 0dB.
- Šířka pásma B je $14 \cdot 10^3$ Hz.
- Poměrná směrová odrazivost $\tilde{\rho}$ ($A_n=0,637$; $n=2$) jsou -2dB.
- Velikost detekovatelného výkonu P_p je -41dBm.
- Velikost maximálního výkonu P_{sat} je -13dBm.
- Velikost minimálního výkonu P_o je -60dBm.

Na třetím výkonovém úrovněm diagramu (viz obr. 5.12) byl použit kolimovaný optický zdroj záření a Fresnelova čočka.



Obr. 5.12: Výkonový úrovněm diagram optické kvazidifúzní pasivní linky s kolimovaným zdrojem optického záření a Fresnelovy čočky. (α_v - rozložení optického výkonu v kruhovém svazku, L_{vv} - útlum vazby na vysílací optické apertuře, L_p - útlum na odrazné ploše; L_o - útlum šířením; A_{vp} - zisk na přijímací optické apertuře; P_{LD} - výkon laserové diody; P_{sat} - saturační výkon; P_p - přijímaný výkon; P_o - citlivost přijímače; NEP - výkon ekvivalentní šumu.)

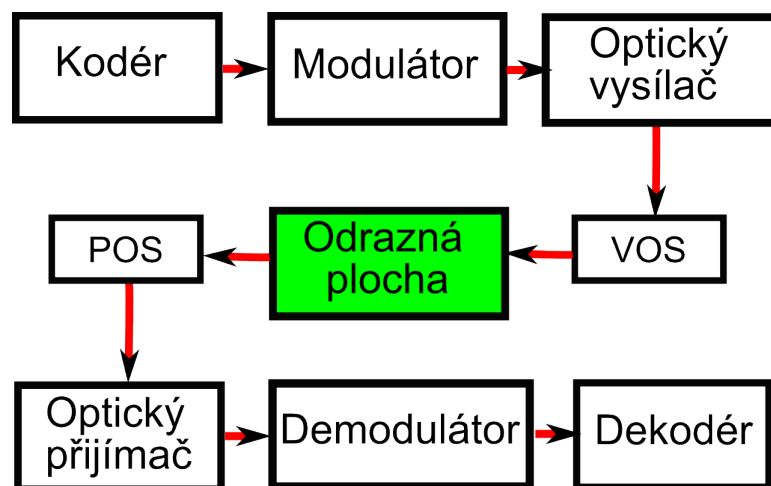
Parametry optické kvazidifúzní pasivní linky s kolimovaným paprskem:

- Chybovost BER je 10^{-9} .
- Odstup signálu od šumu SNR je 13,5 dB.
- Pokles výkonu α_v je 6,7dB.
- Útlum šířením L_o je 37dB.
- Útlum vazby na vysílací straně L_{vv} je 1dB.
- Zesílení na přijímací straně A_c je 16dB.
- Šířka pásma B je $14 \cdot 10^3$ Hz.
- Poměrná směrová odrazivost $\tilde{\rho}$ ($A_n=0,637$; $n=2$) jsou -2dB.
- Velikost detekovatelného výkonu P_p je -24dBm.
- Velikost maximálního výkonu P_{sat} je -13dBm.
- Velikost minimálního výkonu P_o je -60dBm.

Je třeba poznamenat, že tato optická linka byla navržena pro měření odrazných vlastností povrchů a její koncepce je jednoduchá. Pro kvalitnější přenos optické informace doporučuji kvalitnější budič optického zdroje.

5.5 Návrh kvazidifúzní aktivní optické bezkabelové linky

Kvazidifúzní aktivní linka IWOL pomocí nasměrování odraženého paprsku aktivuje přesně ten přijímač, kterému jsou adresována příslušná data. Navržené blokové schéma je na obr. (5.13). Podrobné parametry a přesné zapojení je uvedeno v kapitole (5.5.1).



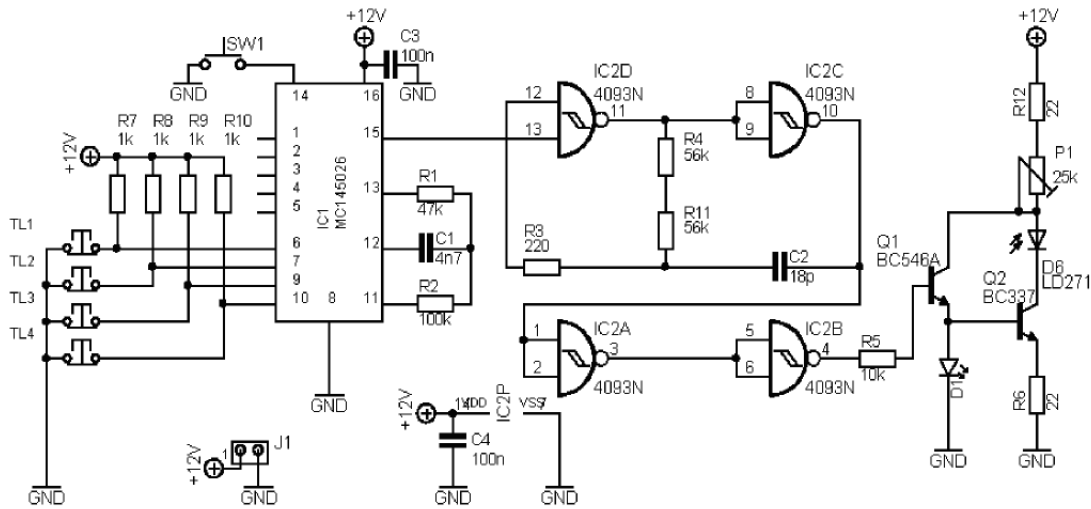
Obr. 5.13: Blokové schéma kvazidifúzní aktivní optické bezkabelové linky. (*VOS* vysílací optická soustava, *POS* přijímací optická soustava.)

5.5.1 Koncepte kvazidifúzní aktivní optické bezkabelové linky.

Přenos optické informace aktivní kvazidifúzní linky je řešen pomocí kodéru, modulátoru, infra LED diody, odrazné plochy, fotodiody, demodulátoru a dekodéru.

Optický vysílač: Schéma optického vysílače na obr. (5.14). Jako zdroj optického záření je použita infra LED dioda LD 271. Její optický paprsek není kolimován žádnou optickou soustavou. Využívá se pouze její pouzdro od výrobce. Kodér MC145026 od firmy MOTOROLA se používá ve dvojici s dekodérem MC 145027. Kodér je schopen kódovat vstupní informaci z ovladačů na vstupech a společně s frekvencí z externího oscilátoru vysílá data na výstup. Podrobný průběh kódování je uveden v příloze (A.5), [20]. Frekvence nosné vlny je 36kHz. V případě rychlejšího přenosu dat může být použit pro vysílač procesor ATmega 162 od firmy ATMEL. Dalším následujícím členem v přenosovém řetězci vysílače je modulace vysílaného signálu pomocí čtyřnásobného dvouvstupového hradla NAND. Oba vstupy hradla jsou opatřeny Schmittovým klopným obvodem, který zajišťuje modulaci přenášeného signálu.

Posledním prvkem v řadě je výkonové spínání laserové diody pomocí tranzistoru.

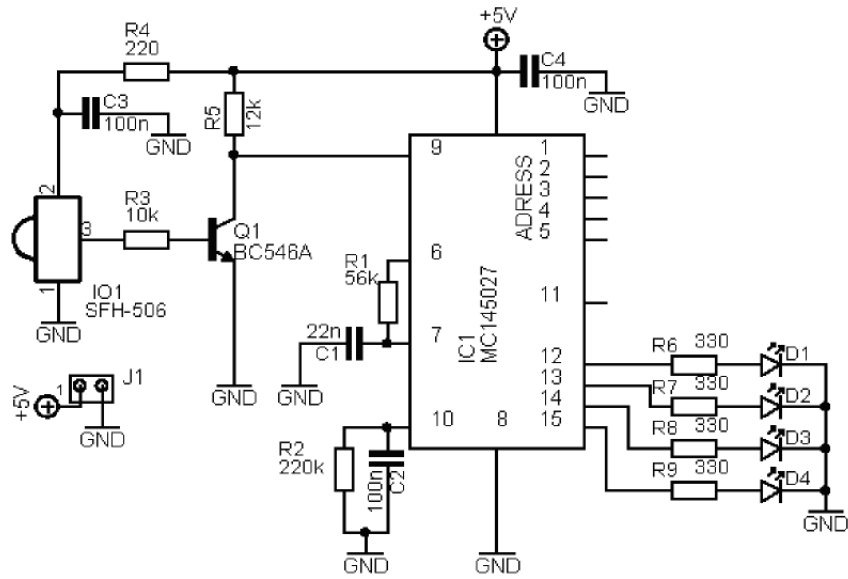


Obr. 5.14: Schéma optického digitálního vysílače

Měřená hodnota vyzářeného výkonu P_{LD} je 100mW. Vyzařovací diagram a spektrální závislost infra LED diody je na obr. (5.7). Seznam použitých součástek, desky navržených plošných spojů a průběhy z měření jsou uvedeny v příloze (A.4), (A.3), (A.5), [20], [21].

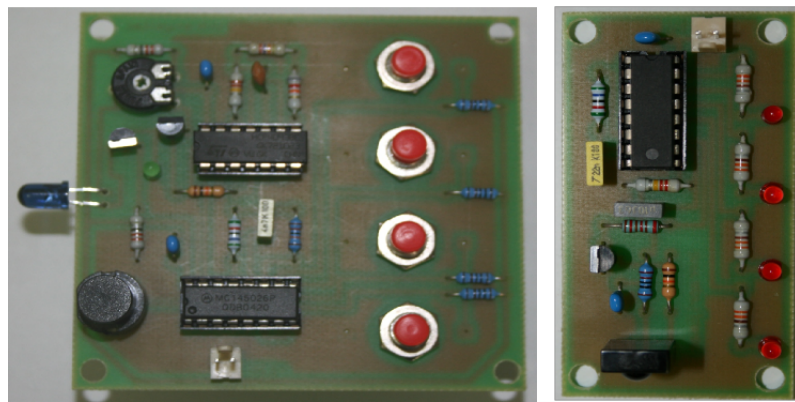
Odrážná plocha: Pro přenos optického signálu k přijímači je použita odrazná plocha. Odrážná plocha soustředí optické záření směrem k přijímači, proto jsou z měřených prvků vhodné dva typy povrchů. V experimentálním měření se požadované ploše podobal bílý lesklý papír a nebo reflexní materiál. Nevýhodou u lesklé bílé plochy je odraz optického výkonu mimo úhel dopadu optického paprsku. Reflexní plocha má pro nás výhodnější parametry. Jejich simulované charakteristiky jsou popsány v kapitole (3.3).

Optický přijímač: Na přijímací straně přijímá odražený optický signál obvod SFH 506-36, který obsahuje PIN fotodiodu i demodulátor. Dále bude signál zpracováván dekodérem MC 147027, který bude mít na výstupu úplný vysílaný signál. Zapojení je znázorněno na obr. (5.15).



Obr. 5.15: Schéma optického digitálního přijímače

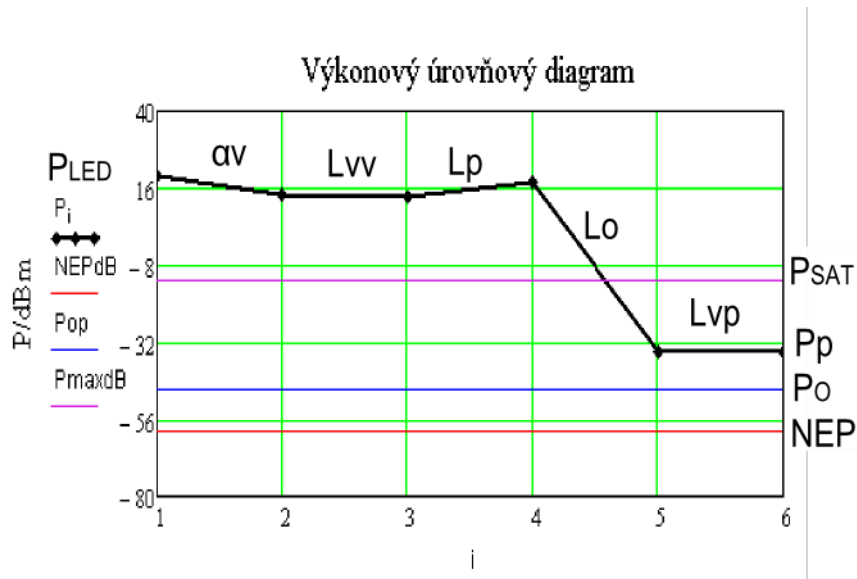
Podrobný průběh dekódování je uveden v [20]. Fotografie digitálního vysílače a přijímače je na obr. (A.8). Seznam použitých součástek, desky navržených plošných spojů a průběhy z měření jsou uvedeny v příloze (A.4), (A.3), (A.5), [22].



Obr. 5.16: Fotografie optického digitálního vysílače a přijímače

5.5.2 Výkonový úrovnňový diagram kvazidifúzní aktivní optické bezkabelové linky

Grafické zhodnocení kvazidifúzní aktivní bezkabelové linky IWOL s nekolimovaným optickým zdrojem záření je na obr. (5.17). Při větším útlumu šířením L_o je možné zvýšit vysílací výkon P_{LD} až na 300mW.



Obr. 5.17: Výkonový úrovnňový diagram optické kvazidifúzní aktivní linky s nekolimovaným zdrojem optického záření. (α_v - rozložení optického výkonu v kruhovém svazku, L_{vv} - útlum vazby na vysílací optické apertuře, L_p - útlum na odrazné ploše; L_o - útlum šířením; L_{vp} - útlum vazby na přijímací optické apertuře; P_{LED} - výkon LED diody; P_{sat} - saturační výkon; P_p - přijímaný výkon; P_o - citlivost přijímače; NEP - výkon ekvivalentní šumu.)

Parametry optické kvazidifúzní pasivní linky bez kolimovaného paprsku:

- Chybovost BER je 10^{-9} .
- Odstup signálu od šumu SNR je 13,5 dB.
- Pokles výkonu α_v je 6,0dB.
- Útlum šířením L_o je 52dB.
- Útlum vazby na vysílací straně L_{vv} je 1dB.
- Šířka pásma B je $4 \cdot 10^3$ Hz.
- Poměrná směrová odrazivost $\tilde{\rho}$ ($A_n=3,103$; $n=60$) jsou 4,9dB.
- Velikost detekovatelného výkonu P_p je -34dBm.
- Velikost maximálního výkonu P_{sat} je -13dBm.
- Velikost minimálního výkonu P_o je -60dBm.

Navržená digitální linka nemá přenosovou rychlost v_p tak vysokou, jak v moderních optických technologiích, kde dosahuje až Gb/s. Pro experimentálním měření však byla dostačující. Výkonové úroňové diagramy pro aktivní optickou kvazidifúzní linku, pasivní optickou kvazidifúzní linku, kolimovaný i nekolimovaný paprsek byly navrženy v programu MATHCAD 14 a jsou uloženy na příloženém CD v diplomové práci.

5.6 Bezpečnost bezdrátové optické komunikace

Zatímco rádiové přenosy lze snadno zachytit a odposlouchávat, u bezdrátových optických sítí je možnost odposlechu velmi malá. Optický signál přenášený atmosférou je obtížně zachytitelný a narušitelný. U analogového přenosu lze odposlech uskutečnit blízkým přijímačem a demodulovat jej předem známou demodulací. U digitálního přenosu, který má volitelně nastavitelnou zakódovanou adresu, je tento způsob nepoužitelný. Protože optická bezdrátová síť pracuje na vlnových délkách blízkých infračervenému spektru, musí být bezpečnost laserového přenosu pro člověka garantována normou ČSN EN 60825-1. Norma ČSN EN 60825-1 obsahuje 2 části, první je bezpečnost laserových zařízení a druhá část je klasifikace zařízení, požadavky a pokyny pro používání [11].

6 ZÁVĚR

V úvodní části diplomové práce bylo uvedeno systémové řešení základních prvků přenosového řetězce, optické vysílače a optické přijímače, jejich vlastnosti a parametry. Byla objasněna problematika možného využití optických čoček, které jsou velmi výhodné pro zvýšení kvality přenosu optického výkonu bezvláknové optické linky. Popsána byla odrazivost povrchů a jejich vliv na energetickou bilanci spoje.

Diplomová práce rozebírá problematiku přenosu optické informace ve volném prostoru v rámci jedné místnosti. Stěžejní částí práce je simulační program přenosového řetězce a jeho výkonový úroňový diagram s možností definice vlastnosti prvků optické linky dle požadavků zřizovatele. Při výpočtech výkonové bilanční rovnice jsou parametry optické linky navrženy podle standardních parametrů jednotlivých prvků linky. Matematický model energetické bilance spoje názorně ukazuje vzniklé poklesy výkonu během přenosu optického signálu a navrhovateli usnadní návrh kvalitního spoje. Ve třetí kapitole jsou vlastnosti měřených povrchů konfrontovány s matematickým modelem a s výsledky měření.

V poslední části diplomové práce jsou navrženy prvky optické linky, které byly použity pro měření v místnosti a pro různé odrazné plochy. Vyhodnocován byl vliv charakteru odrazných ploch na přijímaný optický výkon. Velmi zajímavou částí projektu byla stavba modelu místnosti, v němž byla doložena empirickým měřením kvalita přenosového řetězce.

Měřené parametry analogové i digitální IWOL potvrdily správnost simulovaných hodnot v úvodní části diplomové práce. V případě digitálního přenosu dat nebyly shledány problémy i při razantní změně výkonu vysílací LED diody. Oproti tomu při navazování analogového spojení byl potřebný výkon LED diody neúměrně vysoký a v případě použití laserové diody LD hrozí pro pokrytí velkého prostoru riziko překročení hranice bezpečné hodnoty IR záření. Při měření kvalit optických bezkabelových sítí bylo nalezeno doporučení použití jako optického zdroje LED diody pro pasivní linku s odrazem na difúzní ploše. Pro použití aktivní linky s odrazem na reflexní ploše použití laserové diody LD s důrazem na dodržení platných norem.

LITERATURA

- [1] FILKA, M. *Optické sítě - přednášky*. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně, 2007.
- [2] SANTAMÁRIA, A., LÓPEZ-HERNÁNDEZ, F. J. *Wireless LAN Systems*. London: Artech House, 1994.
- [3] HALLIDAY, D., RESTNICK, R., WALKER, J. *Moderní fyzika* Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně, VUTIU, 2003.
- [4] WILFERT, O. *Optoelektronika* Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Vysoké učení technické v Brně, 2004 .
- [5] WILFERT, O. *Fotonika a optické komunikace* Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně, 2007.
- [6] DOBEŠ, J., ŽALUD, V. *Moderní radiotechnika* 1. vydání. Praha: Nakladatelství BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-132-2.
- [7] EPŠTEJN, M. I. *Izmerenia ortičeskogo izpučenia v elektronike* Izdatelstvo ENERGIA, 1975.
- [8] ŠEVČÍK, L., MASCHKE, J., VLČEK, Č., ZAORÁLEK, Z. *Optoelektronika - skripta* 1. vydání. Brno: Katedra teoretické elektroniky, radiotechniky a elektrických měření, Vojenská akademie v Brně, 1985.
- [9] WILFERT, O., PROKEŠ, A. *Měření efektivní odrazné plochy v pásmu 850 nm*. Radioelektronika 95, 2 díl., Brno., VUT v Brně, 2003, s.239 - 242.
- [10] HORŇÁK, O. *Světelná technika* 1. vydání. Bratislava: Vydavatelství ALFA, 1989. ISBN 80-05-00122-3.
- [11] PUŽMANOVÁ, R. *Bezpečnost bezdrátové komunikace* 1. vydání. Brno: Vydavatelství Computer PRESS Books, a.s, 2005. ISBN 80-251-0791-4.
- [12] KRUPKA, F., KALIVODA L.. *Fyzika* 2. vydání. Praha: Vydavatelství SNTL, 1989.
- [13] MASTER SOURCE BOOK, EDMUND OPTICS. *Přehledový katalog výrobků EDMUND OPTICS* [online]. 2009, poslední aktualizace 11. 11. 2004 [cit. 14. 4. 2009]. Dostupné z URL:<<http://edmundoptics.eu>>

- [14] PRINCIPY REFLEXNÍCH PLOCH 3M Scotchlite. *Technologie zpracování reflexních ploch 3M* [online]. 2010, poslední aktualizace 19. 3. 2010 [cit. 19. 3. 2010]. Dostupné z URL:<<http://solutions.3mcesko.cz/>>
- [15] FACET TECHNOLOGY CORPORATION - TRANSPORTATION *Reflectivita a reflexní plochy* [online]. 2010, poslední aktualizace 19. 3. 2010 [cit. 19. 3. 2010]. Dostupné z URL:<<http://www.facet-tech.com>>
- [16] Princip Fresnelové čočky *Princip Fresnelové čočky* [online]. 2010, poslední aktualizace 15. 3. 2010 [cit. 15. 3. 2010]. Dostupné z URL:<<http://cs.wikipedia.org>>
- [17] Princip kolimátoru *Princip kolimátoru* [online]. 2010, poslední aktualizace 25. 3. 2010 [cit. 29. 3. 2010]. Dostupné z URL:<<http://cs.wikipedia.org>>
- [18] Přijímač OPT 101 *Datasheet přijímače OPT 101* [online]. 2010, poslední aktualizace 25. 3. 2010 [cit. 25. 3. 2010]. Dostupné z URL:<<http://datasheetcatalog.com>>
- [19] Infra LED LD 271 *Datasheet vysílací diody LD 271* [online]. 2010, poslední aktualizace 25. 3. 2010 [cit. 25. 3. 2010]. Dostupné z URL:<<http://datasheetcatalog.com>>
- [20] Kodér - dekodér MC145026-7 *Datasheet párované dvojice kodéru a dekodéru MC 145026-7* [online]. 2010, poslední aktualizace 25. 3. 2010 [cit. 25. 3. 2010]. Dostupné z URL:<<http://www.datasheetcatalog.com>>
- [21] Schmittův klopný obvod CMOS 4093B *Datasheet schmittův klopný obvod CMOS 4093B* [online]. 2010, poslední aktualizace 25. 3. 2010 [cit. 25. 3. 2010]. Dostupné z URL:<<http://datasheetcatalog.com>>
- [22] Optický přijímač s demodulací SFH506-36 *Datasheet optického přijímače s PIN diodou SFH506-36* [online]. 2010, poslední aktualizace 25. 3. 2010 [cit. 25. 3. 2010]. Dostupné z URL:<<http://datasheetcatalog.com>>
- [23] Optický přijímač OPT 101 *Datasheet optického přijímače s PIN diodou OPT 101* [online]. 2010, poslední aktualizace 25. 3. 2010 [cit. 25. 3. 2010]. Dostupné z URL:<<http://datasheetcatalog.com>>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

- WLAN Bezdrátová lokální síť – Wireless Local Area Network
- ISI Intersymbolové rušení – Intersymbol Interference
- LED Elektroluminiscenční dioda – Light Emitting Diode
- IWOL Vnitřní optický bezkabelový spoj – Indoor Wireless Optical Links
- LD Laserová dioda – Laser Diode
- IR Infra červené záření – Infra Red
- DSSS Frekvenční modulace rozprostřeným spektrem – Direct Sequence Spread Spectrum
- CDMA Modulace kódového multiplexu – Code Division Multiple Access
- OFDM Modulace ortogonálním frekvenčním multiplexem – Orthogonal Frequency Division Multiplexing
- FSK Modulace s frekvenční klíčováním – Frequency Shift Keying
- PCM Pulsní kódová modulace – Pulse Code Modulation
- OOK ON - OFF klíčování – ON - OFF Keying
- ASK Modulace s amplitudovým klíčováním – Amplitude Shift Keying
- PSK Modulace s fázovým klíčováním – Phase Shift Keying
- PAM Pulsní amplitudová modulace – Pulse Amplitude Modulation
- EMI Elektromagnetické rušení – Electroagnetic Interference
- SLED Super luminiscenční dioda – Super Light Emitting Diode
- ELED Hranově emitující (stranově) dioda – Edge Light Emitting Diode
- FDM Modulace frekvenčním multiplexováním – Frequency Division Multiplexing
- MCM Modulace s více nosnými vlnami – Multicarrier Modulation
- MM Multimodové vlákno – Multi Mode
- SM Jednomodové vlákno – Single Mode
- NEP Výkon ekvivalentní šumu – Noise Equivalent Power

PIN Fotodioda s vrstvou izolantu

APD Lavinová fotodioda - Avalanche Photo Diode

PSO Poměrná směrová odrazivost

EOP Efektivní odrazná plocha

BER Bitová chybovost - Bit Error Rate

SNR Poměr signál/šum - Signal to Noise Ratio

VOS Vysílací optická soustava

POS Přijímací optická soustava

P_{LD} Výkon laserové diody

A_n Koeficient odrazivosti

n Koeficient směrovosti

P_{LED} Výkon LED diody

I Elektrický proud

U Elektrické napětí

I_b Proud procházející laserovou diodou

I_{TH} Budící proud laserovou diodou

I Svítivost

S_U Napěťová citlivost

f_b Bitová frekvence

f_s Symbolová rychlost

f_c Nosná frekvence

B Šířka pásma modulovaného signálu

S_I Proudová citlivost

C_b Bariérová kapacita

D Průměr optické soustavy

α Úhlová šířka svazku
 P_{sat} Saturační výkon
 P_o Citlivost přijímače
 I Optická intenzita
 ρ_{rez} Rezerva systému
 L_{vv} Účinnost vazby optický vysílač - optická soustava
 L_{vp} Účinnost vazby optická přijímací soustava - optický přijímač
 Δ Dynamika přijímacího systému
 L_o Útlum šířením
 L_p Útlum na odrazné ploše
 P_p Přijímaný výkon
 η Kvantová účinnost
 η_e Energetická účinnost - energy efficiency
 η_s Spektrální účinnost - spectral efficiency
 τ Časová konstanta
 $\tilde{\rho}$ Směrová odrazivost pro nelambertovské plochy
 α_v Pokles výkonu optického zdroje
 v_p Přenosová rychlost
 v_s Modulační, symbolová rychlost
 A_c Zisk optické soustavy
 A_{vp} Zisk přijímací optické soustavy
 A_{vv} Zisk vysílací optické soustavy
 r_a Rozměry přijímací plochy fotodiody
 S_a Obsah aktivní plochy fotodiody
 S_{POS} Obsah plochy přijímací optické soustavy

λ Vlnová délka

S_λ Spektrální citlivost

t_r , t_f Doby odezvy

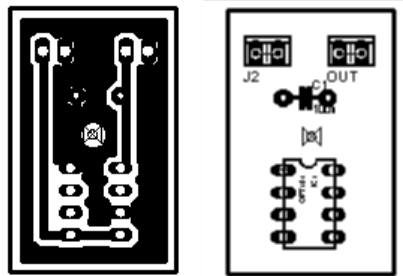
I_d Proud za tmy

SEZNAM PŘÍLOH

A	Návrhy desek plošných spojů	75
A.1	Deska plošných spojů pro optickou kvazidifúzní pasivní linku	75
A.2	Seznam součástek pro optickou kvazidifúzní pasivní linku	75
A.3	Desky plošných spojů pro optickou kvazidifúzní aktivní linku	76
A.4	Seznam součástek pro optickou kvazidifúzní aktivní linku	77
A.5	Průběhy z měření přenášených dat	79
A.6	Fotografie digitálního přijímače a vysílače	81
A.7	Přehled parametrů přijímače OPT 101	81
B	Simulační program matematického modelu odrazných ploch	83

A NÁVRHY DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ

A.1 Deska plošných spojů pro optickou kvazidifúzní pasivní linku



Obr. A.1: Deska plošných spojů pro pasivní kvazidifúzní linku. Přijímač velikost 2:1

A.2 Seznam součástek pro optickou kvazidifúzní pasivní linku

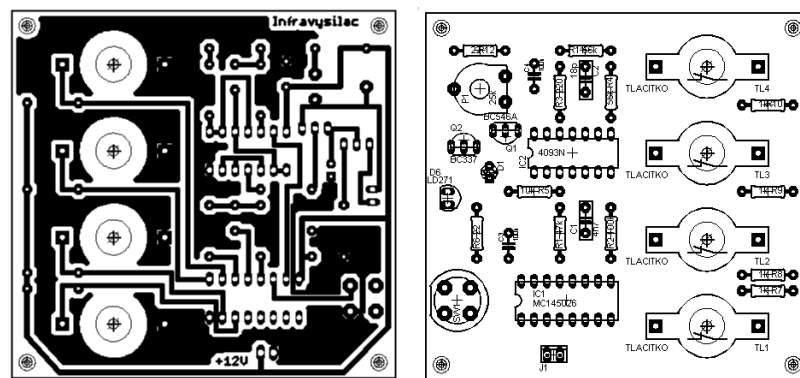
Tab. A.1: Seznam součástek pro analogový vysílač

Název	Hodnota	Pouzdro	Popis
D_1	IR LED LD271	ILD271	INFRA LED dioda transparentní modrá
R_1	22 Ω	R1206	Metalizovaný rezistor
R_2	22 Ω	R1206	Metalizovaný rezistor
R_3	22 Ω	R1206	Metalizovaný rezistor
R_4	22 Ω	R1206	Metalizovaný rezistor

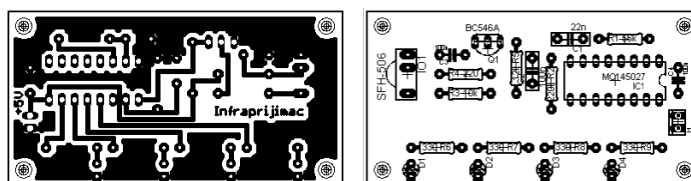
Tab. A.2: Seznam součástek pro analogový přijímač

Název	Hodnota	Pouzdro	Popis
C_1	100nF	C025-025X050	Keramický kondenzátor
J_1	MTA100-02	MTA100-02	Svorkovnice
J_2	MTA100-02	MTA100-02	Svorkovnice
IC_1	OPT101	DIP8	Optický přijímač

A.3 Desky plošných spojů pro optickou kvazidifúzní aktivní linku



Obr. A.2: Deska plošných spojů pro aktivní kvazidifúzní linku. Digitální vysílač velikost 1,5:1



Obr. A.3: Deska plošných spojů pro aktivní kvazidifúzní linku. Digitální přijímač velikost 0,6:1

A.4 Seznam součástek pro optickou kvazidifúzní aktivní linku

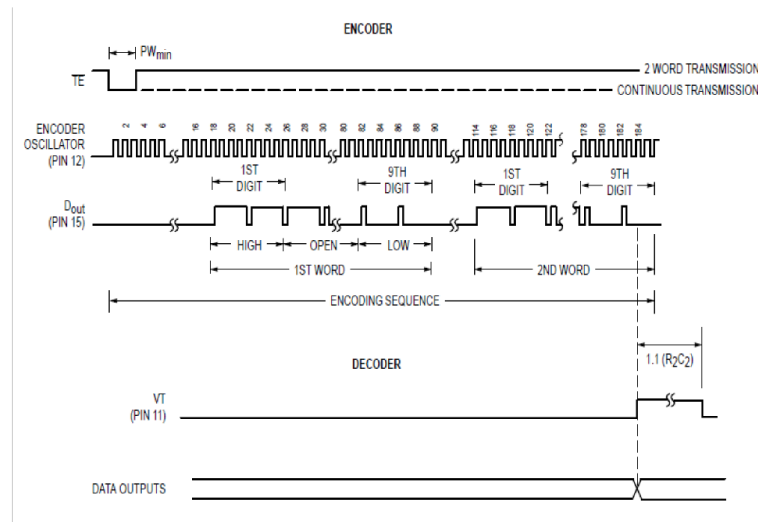
Tab. A.3: Seznam součástek pro digitální vysílač

Název	Hodnota	Pouzdro	Popis
C_1	4,7nF	C025-025X050	Keramický kondenzátor
C_2	18pF	C025-025X050	Keramický kondenzátor
C_3	100nF	C025-025X050	Keramický kondenzátor
C_4	100nF	C025-025X050	Keramický kondenzátor
D_1	LED	A3,0	LED dioda
D_6	LD 271	ILD271	INFRA LED dioda transparentní modrá
IC_1	MC145026	DIL18	Kodér
IC_2	4093N	DIL14	4xhradlo NAND
TL_1	P-DT6	P-DT6	Tlačítko
TL_2	P-DT6	P-DT6	Tlačítko
TL_3	P-DT6	P-DT6	Tlačítko
TL_4	P-DT6	P-DT6	Tlačítko
SW_1	P-DT6	P-DT6	Tlačítko
J_1	MTA100-02	MTA100-02	Svorkovnice
Q_1	BC546A	TO92	Tranzistor
Q_2	BC337	TO92	Tranzistor
R_1	47k Ω	R1206	Metalizovaný rezistor
R_2	100k Ω	R1206	Metalizovaný rezistor
R_3	220 Ω	R1206	Metalizovaný rezistor
R_4	56k Ω	R1206	Metalizovaný rezistor
R_5	10k Ω	R1206	Metalizovaný rezistor
R_6	22 Ω	R1206	Metalizovaný rezistor
R_7	1k Ω	R1206	Metalizovaný rezistor
R_8	1k Ω	R1206	Metalizovaný rezistor
R_9	1k Ω	R1206	Metalizovaný rezistor
R_{10}	1k Ω	R1206	Metalizovaný rezistor
R_{11}	56k Ω	R1206	Metalizovaný rezistor
R_{12}	22 Ω	R1206	Metalizovaný rezistor
P_1	25k Ω	PT10H	Trimr

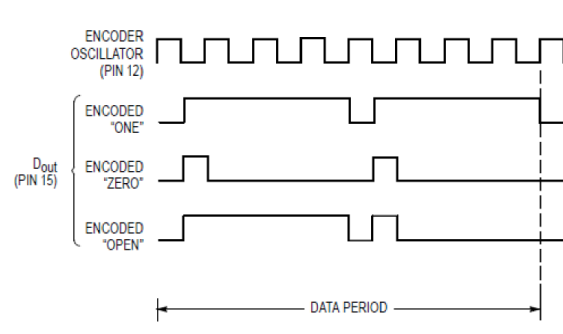
Tab. A.4: Seznam součástek pro digitální vysílač

Název	Hodnota	Pouzdro	Popis
C_1	22nF	C025-025X050	Keramický kondenzátor
C_2	100nF	C025-025X050	Keramický kondenzátor
C_3	100nF	C025-025X050	Keramický kondenzátor
C_4	100nF	C025-025X050	Keramický kondenzátor
J_1	MTA100-02	MTA100-02	Svorkovnice
IC_1	MC145027	DIL18	Dekodér
IO_1	SFH 506-36	TO192	Fotodioda s demodulací
R_1	56k Ω	R1206	Metalizovaný rezistor
R_2	220k Ω	R1206	Metalizovaný rezistor
R_3	10k Ω	R1206	Metalizovaný rezistor
R_4	220 Ω	R1206	Metalizovaný rezistor
R_5	12k Ω	R1206	Metalizovaný rezistor
R_6	22 Ω	R1206	Metalizovaný rezistor
R_7	330 Ω	R1206	Metalizovaný rezistor
R_8	330 Ω	R1206	Metalizovaný rezistor
R_9	330 Ω	R1206	Metalizovaný rezistor
D_1	LED	A3,0	LED dioda
D_2	LED	A3,0	LED dioda
D_3	LED	A3,0	LED dioda
D_4	LED	A3,0	LED dioda
D_5	LED	A3,0	LED dioda

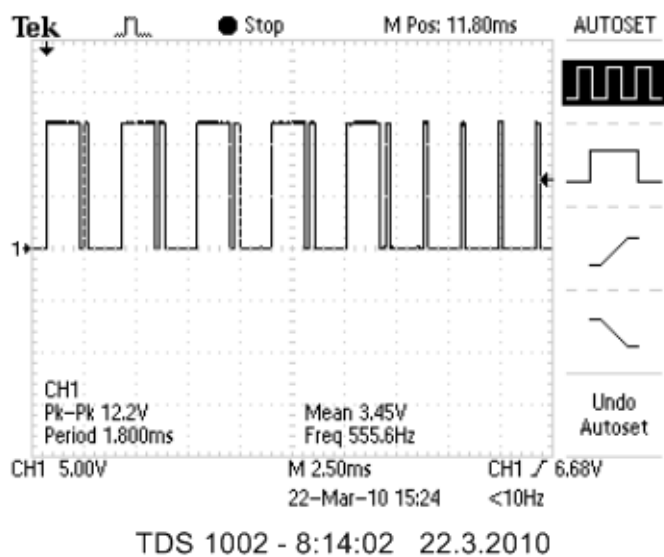
A.5 Průběhy z měření přenášených dat



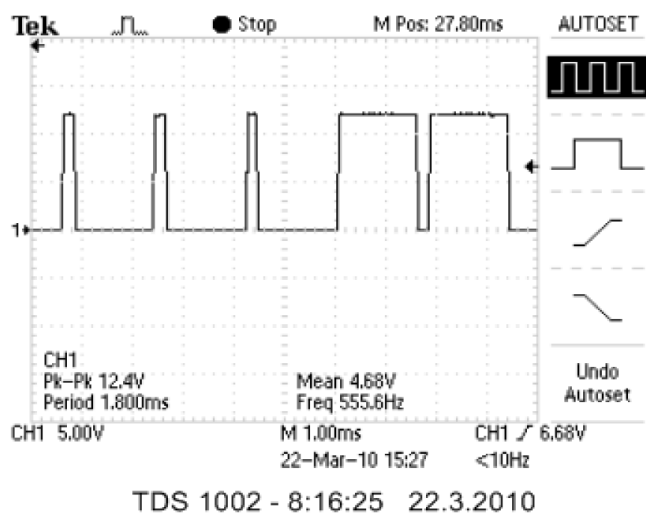
Obr. A.4: Časový průběh kódového slova IO MC 14506/27 (převzato z [20]).



Obr. A.5: Způsob kódování adresy IO MC 14506/27 (převzato z [20]).

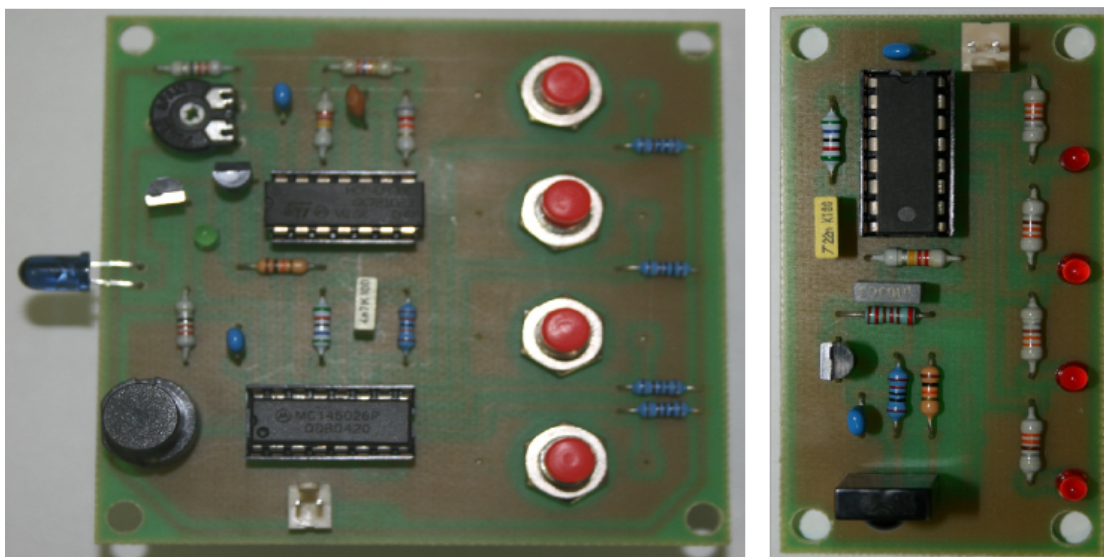


Obr. A.6: Měření časový průběh nastavené adresy



Obr. A.7: Měření časový průběh vysílaných dat

A.6 Fotografie digitálního přijímače a vysílače

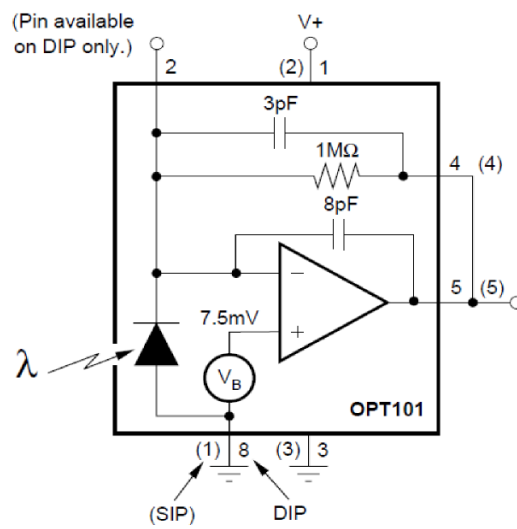


Obr. A.8: Fotografie digitálního vysílače a přijímače

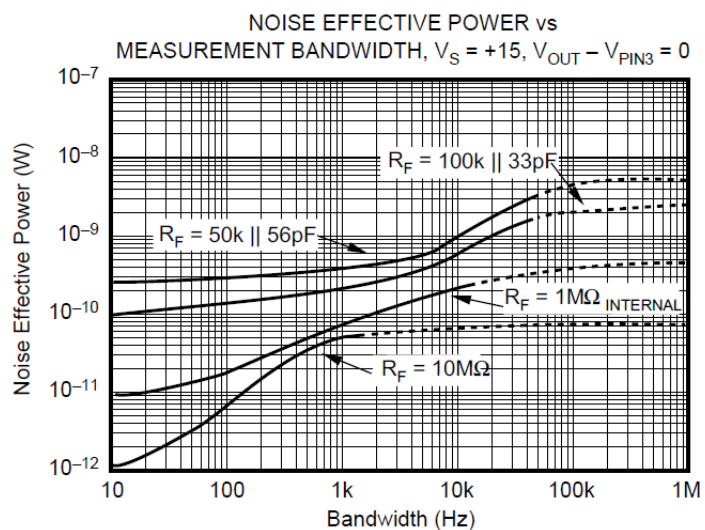
A.7 Přehled parametrů přijímače OPT 101

Tab. A.5: Přehled parametrů přijímače OPT 101

Název	Označení	Hodnota
Proudová citlivost	S_I	$0,45 \text{ A.W}^{-1}$ pro 650nm
Napěťová citlivost	S_U	$0,45 \text{ MV.W}^{-1}$ pro 650nm
Proud za tmy	I_d	$2,5 \text{ pA}$
Šířka pásma	B	14.10^3 Hz
Velikost aktivní plochy	S_a	$5,2 \text{ mm}^2$



Obr. A.9: Vnitřní zapojení přijímače OPT 101 (převzato z [23])



Obr. A.10: Určení NEP přijímače OPT 101 (převzato z [23])

B SIMULAČNÍ PROGRAM MATEMATICKÉHO MODELU ODRAZNÝCH PLOCH

Směrovou odrazivost nelambertovských ploch se symetrickým rozptylem definujeme (B.1):

$$\tilde{\rho} = A_n \cdot \cos^n(\gamma); [-], \quad (\text{B.1})$$

kde velikost A_n a n jsou koeficienty směrovosti a odrazivosti, γ je úhel mezi normálou k ploše a směrem pozorování. Koeficient odrazivosti A_n charakterizuje míru celkového rozptýleného výkonu a koeficient směrovosti n charakterizuje míru směrovosti rozptýleného výkonu. Platí (B.2):

$$2 \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \tilde{\rho} d\gamma = \rho, \quad (\text{B.2})$$

kde ρ je celková odrazivost. Po dosazení (B.1) do (B.2) platí (B.3):

$$2 \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} A_n \cdot \cos^n(\gamma) d\gamma = \rho. \quad (\text{B.3})$$

Po úpravě bude tabulka s výsledky (B.1):

Tab. B.1: Výsledky směrové odrazivosti pro nelambertovské plochy ($n = 1 \div 10$.)

n	1	2	3	4	5
A_n	0,50. ρ	0,64. ρ	0,75. ρ	0,85. ρ	0,938. ρ
n	6	7	8	9	10
A_n	1,019. ρ	1,094. ρ	1,164. ρ	1,23. ρ	1,293. ρ