

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Vytvoření simulace optického vysílače pro vnitřní
bezvláknové optické sítě založené na optických vláknech**

**The Creation of Optical Transmitter Simulation for
Indoor Free Space Optical Network Based on the Optical
Fibers**

2014

Bc. Tomáš Korček

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Tomáš Korček**

Studijní program: N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601T013 Telekomunikační technika

Téma: **Vytvoření simulace optického vysílače pro vnitřní bezvláknové optické sítě založené na optických vláknech**
The Creation of Optical Transmitter Simulation for Indoor Free Space Optical Network Based on the Optical Fibers

Zásady pro vypracování:

Úkolem studenta bude prostudovat problematiku vnitřních bezvláknových optických sítí založených na využití konců optických vláken jako vysílače. Dále je nutné prostudovat možnosti a problematiku spojenou s tvorbou vysílače tvořeného rozdílnými počty optických vláken. Student bude v softwarové aplikaci LightTools simulovat vytvořený vysílač pro vnitřní bezvláknové optické sítě. Bude studován parametr intenzity světla respektive optický výkon rozprostřeného v modelované místnosti z pohledu dodržení rovnoměrného rozložení a další parametry. Práce je spojená s granty řešenými na katedře.

1. Popis vnitřních bezvláknových optických sítí.
2. Analýza a simulace geometrických zakončení optických vláken pro vytvoření optického vysílače pro vnitřní bezvláknové optické sítě v softwarové aplikaci LightTools.
3. Experimentální měření rovnoměrného rozložení optického výkonu v temné místnosti vytvářené optickým vysílačem.
4. Zhodnocení naměřených a simulovaných dat.

Seznam doporučené odborné literatury:

BARRY, John R. Wireless infrared communications. Boston: Kluwer Academic, 1994, 192 s. Kluwer international series in engineering and computer science, Springer. ISBN 978-0792394761.

RAMIREZ-INIGUEZ, Roberto, Sevia M. IDRUS a Ziran SUN. Optical wireless communications: IR for wireless connectivity. Boca Raton: CRC Press, 2008, 344 s. ISBN 08-493-7209-7.

SCHUBERT, Fred E. Light-emitting diodes. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2006, 422 s. ISBN 05-218-6538-7.

GFELLER, Fritz R. a Urs BAPST. Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation. Proceedings of the IEEE. 1979, roč. 67, č. 11, s. 1474-1486. ISSN 0018-9219.

WANG, Ke, Ampalavanapillai NIRMALATHAS, Christina LIM a Efstratios SKAFIDAS. High-speed duplex optical wireless communication system for indoor personal area networks. Optics Express. 2010, roč. 18, č. 24, s. 25199-25216. ISSN 1094-4087.

WANG, Ke, Ampalavanapillai NIRMALATHAS, Christina LIM a Efstratios SKAFIDAS. Gigabit optical wireless communication system for indoor applications. In: Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP), 2010 Asia. Shanghai: IEEE, 2010, 453 - 454. ISBN 978-1-4244-7111-9.

WANG, Ke, Ampalavanapillai NIRMALATHAS, Christina LIM a Efstratios SKAFIDAS. High-Speed Optical Wireless Communication System for Indoor Applications. IEEE Photonics Technology Letters. 2011, roč. 23, č. 8, s. 519-521. ISSN 1041-1135.

WANG, Ke, Ampalavanapillai NIRMALATHAS, Christina LIM a Efstratios SKAFIDAS. 4x12.5 Gb/s WDM Optical Wireless Communication System for Indoor Applications. Journal of Lightwave Technology. 2011, roč. 29, č. 13, s. 1988-1996. ISSN 0733-8724.

IEEE 802.15.7. Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light. New York, USA: IEEE Computer Society, 2011.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Látal**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014



doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prehlásenie študenta

Prehlasujem, že som túto diplomovú prácu vypracoval samostatne. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

V Ostrave dňa: *4. mája 2014*

Tomáš Kováčik
.....
podpis študenta

Pod'akovanie

Rád by som poďakoval Ing. Janovi Látalovi a prof. RNDr. Vladimírovi Vašinkovi, CSc. za odbornú pomoc a konzultácie pri vytváraní tejto diplomovej práce. Ďalej by som chcel poďakovať Ing. Janovi Vitáskovi za veľmi cenné rady spojnú zo softvérovou aplikáciou LightTools.

Abstrakt

Cieľom tejto diplomovej práce je vytvorenie optického vysielača tvoreného zväzkom optických vlákien pre vnútornú optickú bezvláknovú sieť, ktorý bude mať najrovnomernejšie rozloženie optického výkonu v priestore. Hlavným dôvodom vytvorenia tohoto optického vysielača je vytvorenie nového smeru v oblasti komunikácie v optických bezvláknových sieťach využívajúcich optické vlákno ako vysielač, pretože zatiaľ boli navrhnuté len vysielače, ktoré boli tvorené iba jedným optickým vláknom. Vysielač navrhnutý v tejto práci umožní väčšie pokrytie priestoru a dosiahnutie vyšších prenosových rýchlostí. Prvá časť práce je venovaná teoretickému úvodu do optických bezvláknových sietí, ich rozdeleniu a komunikácií v nich. Ďalej sú popísané komunikačné technológie, ktoré sa používajú vo vnútorných bezvláknových sieťach, konkrétne technológie VLC, MIMO a OFDM. V nasledujúcich častiach práce sú rozobraté optické komponenty, ktoré sa v danej sieti používajú ku komunikácií. Rozobraté sú šošovky, kolimátory a optické koncentrátory. Po tejto časti nasleduje časť, v ktorej sú popísané vysielače pre optickú bezvláknovú sieť, ktoré boli doteraz vytvorené. Hlavná časť tejto práce je venovaná vytváraniu simulácií už spomínaného optického vysielača s rôznym počtom optických vlákien a analyzovaniu daných rozložení optického výkonu. Posledným krokom tejto práce je popis uskutočneného reálneho experimentálneho merania rozloženia optického výkonu v temnej miestnosti laboratória katedry Telekomunikačnej techniky.

Kľúčová slova

Vnútorná bezvláknová optická sieť; komunikácia viditeľným svetlom; VLC; VLCC; MIMO; OFDM; optické šošovky; optický kolimátor; optický koncentrátor; optický vysielač pre vnútornú bezvláknovú sieť; LightTools; meranie rozloženia optického výkonu

Abstract

The goal of this diploma thesis is to create an optical transmitter which is composed from a bundle of optical fibers for indoor fiber-free optical network, which will have the most even distribution of optical power in space. The main reason for creating this optical transmitter is the creation of a new direction in the field of communication in optical fiber-free networks using optical fiber as a transmitter, because so far transmitters created by single optical fiber only have been designed. Transmitter designed in this thesis allows coverage of larger area and higher transmission speed. The first part of this thesis is devoted to theoretical introduction to optical fiber-free networks, their divisions and communications in them. Afterwards, communication technologies that are used in indoor free space optical network are described, especially the VLC, MIMO and OFDM technologies. In the following sections of thesis optical components that are used in the network for communication are discussed. Discussed are lenses, collimators and optical concentrators. This section is followed by a section where transmitters for optical fiber-free network that have been created till now are described. The main part of this thesis is devoted to creating simulations of the above-mentioned optical transmitter with a different number of optical fibers and the analysis of the distribution of optical power. The final step of this thesis is the description of the real experimental measurements of optical power distribution in a dark room laboratory of the department of Telecommunications.

Key words

Indoor free space optical network; visible light communication; VLC; VLCC; MIMO; OFDM; optical lens; optical collimator; optical concentrator; optical transmitter for indoor free space optical network; LightTools; measurement of optical power distribution

Zoznam použitých skratiek

Skratka	Anglický význam	Slovenský význam
AEL	Accessible Emission Limit	Prístupný emisný limit
AWGN	Additive White Gaussian Noise	Prídavný Gausov šum
APD	Avalanche Photo Diode	Lavínová fotodióda
APR	Automatic Power Reduction	Automatická výkonová redukcia
ASE	Amplified Spontaneous Emission	Zosilnená spontánna emisia
ASK	Amplitude Shift Keying	Modulácia založená na amplitúdovom kľúčovaní
BER	Bit Error Rate	Bitová chybovosť
CDS	Conventional-Diffuse-System	Konvenčný difúzny systém
CGH	Computer-Generated Holography	Počítačom generovaný hologram
CM	Ceiling Module	Stropný modul
CPC	Compound Parabolic Concentrator	Zmiešaný parabolický koncentrátor
DMD	Diamond Multispot Diffusion	Diamantový viacväzkový vysielateľ
DME	Device Management Entity	Entita pre správu zariadení
DPPM	Differential Pulse-Position Modulation	Diferenciálna pulzne polohová modulácia
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing	Hustý vlnový multiplex
EPON	Ethernet Passive Optical Network	Pasívna ethernetová optická sieť
FEC	Forward Error Correction	Dopredné opravovanie chýb
FOV	Field Of View	Zorné pole
FSK	Frequency Shift Keying	Modulácia založená na frekvenčnom kľúčovaní
HC	Hemispherical concentrator	Hemisférický koncentrátor
IEC	International Electrotechnical Commission	Mezinárodná elektrotechnická komisia

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	Inštitút pre elektrotechnické a elektronické inžinierstvo
ISI	Intersymbol Interference	Medzisymbolová interferencia
LD	Laser Diode	Laserový zdroj žiarenia
LOS	Line Of Sight	Typ konfigurácie pre priamu viditeľnosť
LSMT	Line-Strip-Multibeam-Transmitter	Jednopásový viacvážkový vysielateľ
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output	Multi-anténne komunikačné systémy
MLME	Medium-Access-Control Link-Management Entity	Entita riadenia prístupu k médiu
MPE	Maximum Permissible Exposure	Prístupný expozičný limit
NHZ	Nominal Hazard Zone	Zóna nebezpečenstva
NLOS	Non Line Of Sight	Typ konfigurácie pre nepriamu viditeľnosť
NRZ	Non Return to the Zero	Typ kódu bez návratu k nule
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	Ortogonalný multiplex s kmitočtovým delením
OOK	On Off Keying	Digitálna modulácia využívajúca amplitudové kľúčovanie (ASK)
P2MP	Point To Multipoint	Bod-viac-bodové spojenie
P2P	Point To Point	Bod-bod spojenie
PHY	PHYsical layer	Fyzická vrstva
PLED	Power Light Emitting Diode	Výkonová polovodičová dióda
PRBS	Pseudorandom Binary Sequence	Pseudonáhodná binárna sekvencia
PSK	Phase Shift Keying	Modulácia založená na fázovom kľúčení

QAM	Quadrature Amplitude Modulation	Modulácia založená na kvadrátúrnej amplitúdovej modulácií
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying	Modulácia založená na kvadraternom fázovom kočovaní
RCLED	Resonant-Cavity LED	Rezonančná dutinová LED
RGBLED	Red-Green-Blue LED	LED dióda využívajúca trojicu čipov (červený, zelený a modrý)
RF	Radio Frequency	Rádiová frekvencia
SC-kPPM	Sub-Carrier Pulse Position Modulation	Subnosná pulzne polohová modulácia
SMC	Spot-Diffusing Multi-Line-Of-Sight	Viacpásový viacväzkový optický vysielateľ
SRN	Signal Noise to Ratio	Odstup signálu od šumu
VLC	Visible Light Communication	Komunikačná technológia využívajúca viditeľné svetlo
VLCC	Visible Light Communication Consortium	Konzorcium založené na štandardizáciu technológie VLC
VPAN	Visible Light Communication Personal Area Network	Optická bezdrôtová dátová sieť založená na štandarde IEEE 802.15.7
VPPM	Variable Pulse Position Modulation	Variabilná pulzne polohová modulácia
YAG	Yttrium, Aluminium, Garnet	Zloženie pre výrobu luminofóru u polovodičových zdrojov žiarenia

Obsah

Úvod.....	- 14 -
1 Úvod do problematiky optických bezdrôtových sietí.....	- 16 -
2 Optické bezvláknové dátové siete.....	- 18 -
2.1 Úvod do optických bezvláknových dátových sietí.....	- 18 -
2.2 Bezpečnosť pri prenose dát v optických bezvláknových dátových sietí.....	- 18 -
3 Vnútorne bezvláknové optické siete.....	- 20 -
3.1 Optická bezvláknová komunikácia.....	- 21 -
3.2 Delenie vnútorných bezvláknových sietí.....	- 21 -
3.2.1 Rozdelenie podľa komunikačnej trasy medzi vysielateľom a prijímateľom.....	- 21 -
3.2.2 Rozdelenie podľa smerovosti medzi vysielateľom a prijímateľom.....	- 22 -
3.2.3 Rozdelenie podľa použitého spektra.....	- 23 -
3.3 VLC.....	- 23 -
3.4 VLCC.....	- 25 -
3.5 MIMO.....	- 26 -
3.6 OFDM.....	- 27 -
4 Normy pre vnútorné optické bezvláknové siete.....	- 29 -
4.1 Norma IEEE 802.15.7-2011.....	- 29 -
4.1.1 Predmet normy.....	- 29 -
4.2 Norma ČSN EN 12464-1.....	- 31 -
4.2.1 Predmet normy.....	- 31 -
5 Šošovky.....	- 32 -
5.1 Základné vlastnosti šošoviek.....	- 32 -
5.2 Druhy šošoviek.....	- 32 -
5.2.1 Spojné šošovky.....	- 33 -
5.2.2 Rozptylné šošovky.....	- 34 -
5.2.3 Fresnelova šošovka.....	- 34 -
5.2.4 Ďalšie šošovky.....	- 35 -
5.3 Zobrazovanie pomocou optických šošoviek.....	- 35 -
5.3.1 Zväčšenie optického zobrazenia.....	- 37 -

5.3.2	Zobrazovacia rovnica	- 39 -
5.3.3	Optická mohutnosť šošovky	- 40 -
5.4	Chyby optických šošoviek	- 41 -
5.5	Použitie optických šošoviek	- 41 -
6	Kolimátory	- 42 -
6.1	Optické kolimátory	- 42 -
6.2	Rozdelenie kolimátorov	- 43 -
6.2.1	Rozdelenie podľa tvaru	- 43 -
6.2.2	Rozdelenie podľa energií	- 44 -
7	Optické koncentrátory	- 45 -
7.1	Hemisférický koncentrátor	- 45 -
7.2	Zmiešaný parabolický koncentrátor	- 46 -
7.3	Dielektrický koncentrátor	- 47 -
8	Optické vysielače pre vnútorné bezvláknové optické siete	- 48 -
8.1	Optické vysielače pre vnútorné bezvláknové optické siete s nepriamou viditeľnosťou	- 48 -
8.1.1	Konvenčný difúzny systém	- 48 -
8.1.2	Jednopásový viacvážkový vysielač	- 49 -
8.1.3	Viacpásový viacvážkový vysielač	- 49 -
8.1.4	Diamantový viacvážkový vysielač	- 50 -
8.2	Optické vysielače pre vnútorné bezvláknové optické siete s priamou viditeľnosťou	- 50 -
9	Optické bezvláknové siete s využitím optického vlákna ako vysielača	- 52 -
9.1	Model „D-profil“	- 52 -
9.2	Model „jedného vlákna“	- 53 -
9.3	Model stropných vysielačov	- 57 -
9.3.1	Úvod	- 57 -
9.3.2	Dizajn systému	- 58 -
9.3.3	Prijatý výkon a BER analýza	- 60 -
9.3.4	Bezpečnosť oka	- 63 -
10	LightTools	- 66 -
10.1	Nastavenie LightTools	- 68 -

10.1.1	Vytvorenie nového modelu	- 68 -
10.1.2	Vytvorenie optického vlákna.....	- 69 -
10.1.3	Vloženie šošoviek.....	- 73 -
10.1.4	Vloženie zdroja a spustenie simulácie.....	- 74 -
11	Simulácie.....	- 75 -
11.1	Vysielač tvorený zväzkom 7 optických vláken	- 78 -
11.1.1	Vychýlenie vláken vo zväzku.....	- 79 -
11.1.2	Zmena numerickej apertúry.....	- 82 -
12	Experimentálne meranie.....	- 84 -
12.1	Model „1“.....	- 87 -
12.1.1	Zväzky MM vláken 50/125 μm	- 89 -
12.1.2	Zväzky MM vláken 62,5/125 μm	- 91 -
12.2	Model „2“	- 94 -
12.2.1	Zväzky MM vláken 50/125 μm	- 95 -
12.2.2	Zväzky MM vláken 62,5/125 μm	- 96 -
	Záver	- 97 -
	Použitá literatúra	I
	Prílohy.....	V
	Zoznam príloh	VI

Úvod

Bezdrôtová komunikácia sa stala takou dôležitou verejnou službou, akými sú v dnešnej dobe aj elektrina a voda. Neustále ju používame v našom každodennom živote, a to v súkromnom a aj v pracovnom. Táto diplomová práca sa bude zaoberať práve touto komunikáciou a to hlavne v optických sieťach, kde vzniká práve nová alternatíva k danej komunikácii a to komunikácia pomocou viditeľného svetla.

Úvodná kapitola tejto práce sa bude zaoberať problematikou optických bezdrôtových sietí, ich využitím, výhodami a nevýhodami a vlastnosťami. Ďalej nás oboznámi s tým, že k bezdrôtovej komunikácii vzniká nový druh komunikácie pomocou viditeľného svetla, ktorý je pri porovnaní omnoho výhodnejší a má radu výhod.

Nasledujúce dve kapitoly sa budú venovať popisu optických bezvláknových sietí, pričom druhá kapitola bude obsahovať stručný úvod do problematiky a tiež sa bude zaoberať bezpečnosťou očí pri prenose dát. Kapitola tri sa bude detailnejšie zaoberať vnútornými bezvláknovými optickými sieťami, ich výhodami a nevýhodami. Ďalej bude obsahovať rozdelenie týchto sietí a popis technológií umožňujúcich komunikáciu v týchto sieťach.

Štvrtá kapitola sa bude venovať normám, podľa ktorých sa riadi komunikácia vo vnútorných optických bezvláknových sieťach. Popísaná bude európska norma IEEE 802.15.7 a česká norma ČSN EN 12464-1.

V piatej, šiestej a siedmej kapitole budú podrobnejšie popísané optické prvky, a to šošovky, kolimátory a optické koncentrátory. Pri šošovkách spomeniem ich základné druhy, vlastnosti a použitie. Ďalej bude tiež rozobratý spôsob zobrazovania pomocou šošoviek. Po šošovkách nasledujú kolimátory, pri ktorých sa zoznámime s princípom ich činnosti a ich rozdelením. Potom nasledujú optické koncentrátory, kde bude rozobratý princíp činnosti optického koncentrátora a ich rozdelenie. Nasledovať bude detailný popis jednotlivých druhov optických koncentrátorov.

Kapitola osem sa zaoberá optickými vysielačmi pre vnútorné bezvláknové optické siete a ich rozdelením na vysielače s priamou a nepriamou viditeľnosťou. Obsahom tejto kapitoly je tiež detailný popis jednotlivých druhov týchto vysielačov.

Obsahom nasledujúcej kapitoly bude opäť popis optických bezvláknových sietí využívajúcich ako vysielač optické vlákno. Kapitola sa bude zaoberať popisom jednotlivých

modelov vysieláčov tvorených optickým vláknom. Konkrétne budú popísané D-profil, model stropných vysieláčov a model „jedného vlákna“.

V ďalšej kapitole je popisovaná softvérová aplikácia LighTools, ktorú som použil pre tvorbu simulácií. Obsahom tejto kapitoly bude taktiež podrobný popis nastavovania a vkladania jednotlivých komponent v danej aplikácii z rôznych knižníc.

Kapitola jedenásť bude popisovať praktickú časť tejto diplomovej práce, a to simulácie návrhu vysieláča pre optickú bezvláknovú sieť tvoreného rôznymi zväzkami optických vláken. Dôraz sa tu bude prikladať na vysieláč tvorený zväzkom siedmich vláken. Obsahom kapitoly budú obrázky rovnomerných rozložení optického výkonu v priestore a ich porovnávanie medzi zväzkami rôznych druhov vláken.

V poslednej kapitole bude popísané experimentálne meranie rovnomerného rozloženia optického výkonu v temnej miestnosti vytvárané optickým vysieláčom tvoreným rôznymi zväzkami vláken.

Cieľom tejto diplomovej práce je vytvorenie optického vysieláča pre optickú bezvláknovú sieť, ktorý bude mať najrovnomernejšie rozloženie optického výkonu v priestore. Úlohou je vytvoriť simulácie daného vysieláča s rôznym počtom optických vláken a analyzovať dané rozloženie optického výkonu. Posledným krokom tejto práce je uskutočnenie reálneho experimentálneho merania rozloženia optického výkonu v temnej miestnosti. Toto meranie však v dôsledku nedostatočných komponent pre zhotovenie experimentálneho merania rozloženia optického výkonu bolo nahradené meraním veľkosti výkonových stôp na milimetrovom papieri.

1 Úvod do problematiky optických bezdrôtových sietí

Na svete máme rozmiestnených 1,4 milióna stožiarov mobilných sietí. Jedná sa konkrétne o základňové stanice. Takisto máme viac ako 5 biliónov mobilných telefónov, prostredníctvom ktorých každý mesiac prenášame viac ako 600 terabajtov dát. Niekedy nás dokonca musia v našom okolí veľmi láskavo prosiť, aby sme z určitých dobrých dôvodov dané mobilné telefóny vypli. To sa zväčša deje na rôznych podujatiach či rôznych miestach. To je teda dôležitosť, pre ktorú je dôvod pozrieť sa na problémy, ktoré táto bezdrôtová technológia má, pretože je pre naše životy taká podstatná [10].

Jedným z týchto problémov je kapacita. Spôsob, akým bezdrôtovo prenášame dáta, je použitie elektromagnetických vln, a to hlavne pomocou rádiových vln. Tieto rádiové vlny sú ale obmedzené. Sú vzácne, drahé a máme ich len v určitom rozsahu. Je to práve toto obmedzenie, ktoré nezvláda dopyt po bezdrôtových dátových prenosoch a množstve bajtov a dát, ktoré sa každý mesiac prenesú. Jednoduchým vysvetlením tohto je to, že im dochádza spektrum. Existuje aj ďalší problém, ktorým je efektivita. Týchto 1,4 milióna stožiarov mobilných sietí, respektíve základňových staníc, spotrebúva veľké množstvo energie. Vezmime si, že väčšina z nej sa nepoužíva na vysielanie rádiových vln, ale na chladenie týchto základňových staníc. Efektivita základňovej stanice je okolo 5 %, a to spôsobuje veľký problém. Ďalším z problémov bezdrôtovej komunikácie je dostupnosť. Svoj mobilný telefón či iné zariadenie musíme na mnohých miestach vypínať. Počas letov, v nemocniciach, kde predstavujú veľký problém s bezpečnosťou. A ďalším problémom je samotná bezpečnosť, pretože samotné rádiové vlny prenikajú cez steny. Je možné ich zachytiť, a ak má niekto zlé úmysly, môže našu sieť využívať či rôzne ohrozovať. Takže toto sú štyri hlavné problémy bezdrôtovej komunikácie.

V dnešnej dobe a na druhú stranu máme 14 miliárd žiaroviek, svetla a svetlo je súčasťou elektromagnetického spektra. Uprostred tohto spektra sa nachádza spektrum viditeľného svetla. Je to svetlo, ktoré tu už je milióny rokov. V podstate vytvorilo nás, život, vytvorilo všetky živé bytosti. Teda je úplne bezpečné ho používať. Naskytuje sa nám otázka: „Nebolo by dobré použiť toto svetlo na bezdrôtovú komunikáciu?“. A nielen to. Pri porovnaní veľkosti spektra rádiových vln s veľkosťou spektra viditeľného svetla sme zistili, že máme 10 000-krát viac tohto viditeľného spektra. V tejto situácii, kde máme veľké množstvo týchto žiaroviek a takú šírku spektra, sa dá uvažovať, či ich môžeme používať na túto bezdrôtovú komunikáciu. Odpoveďou na túto úvahu je to, že tieto žiarovky sú na túto komunikáciu veľmi vhodné. Avšak

potrebujeme spraviť jednu vec, a to, že neefektívne žiarovky a žiarivky musíme nahradiť novou technológiou LED diód, LED žiarovkami.

LED dióda je polovodič. Je to elektronické zariadenie, ktoré má veľmi dôležitú vlastnosť. Jej intenzita sa dá meniť pri veľmi vysokých rýchlostiach, a pri týchto veľmi vysokých rýchlostiach sa môže aj vypínať. Toto je kľúčová vlastnosť, ktorá sa tu vyskytuje. Pri porovnaní viditeľného spektra s diaľkovými ovládačmi, ktoré majú infračervenú LED diódu, ktorá sa vypína a zapína, sa u diaľkových ovládačov vytvára jednoduchý, nízkorýchlostný dátový tok s určitou prenosovou rýchlosťou. Je však vytváraná nová technológia, ktorá využíva už spomínané LED žiarovky. Touto technológiou sa nevytvára iba jeden dátový tok, ale tisíce dátových tokov paralelne a ešte s vyššími rýchlosťami. Názov tejto technológie je SIM OFDM. Je to priestorová modulácia, kde je svetelnému zdroju umožnené prenášať dáta. Žiarovka slúži na účely osvetľovania priestoru, ale v rovnakom čase je schopná prenášať dáta. Táto funkcia je založená na nepatrných zmenách amplitúdy svetla, čiže stále svetlo nemá žiaden vplyv na prijímač, ktorý reaguje len na dané nepatrné zmeny. Pre funkčnosť prenosu dát je nutné, aby dané svetlo bolo stále zapnuté, avšak môže sa stlmiť na úroveň, keď sa zdá, že je vypnuté, ale stále bude mať schopnosť dáta prenášať.

Takže pri porovnaní bezdrôtovej komunikácie pomocou mobilných sietí a pomocou tejto novo vytvárajúcej technológie založenej na LED žiarovkách je vidieť, že táto technológia má veľkú radu výhod. Pri kapacite máme 10 000-krát viac spektra, 10 000-krát viac LED diód, ktoré sú nainštalované v infraštruktúre, teda s kapacitou nie je žiaden problém. Ďalšou výhodou je efektívnosť. Tu sú dáta prenášané prostredníctvom osvetlenia priestoru. Prenos dát bude takmer zadarmo, čo je veľmi energeticky efektívne. Ani s dostupnosťou nie je žiaden problém. Na miestach, kde sme nemohli používať mobilnú komunikáciu, ako napríklad v nemocniciach či lietadlách, môžeme používať svetlo, pretože to sa nachádza všade. Ďalej tu je bezpečnosť, ktorá je veľmi vysoká, pretože svetlo vôbec neprechádza cez steny. Nikto na druhej strane steny teda nemôže zachytiť naše dáta a ani nijako ovplyvňovať danú komunikáciu, pretože dáta sú len tam, kde je svetlo. Ak nechceme aby prijímač prijímal svetlo, môžeme svetlo obrátiť inde.

V závere sa teda dá povedať to, že kde je svetlo, tam je potenciálny spôsob prenosu dát.

2 Optické bezvláknové dátové siete

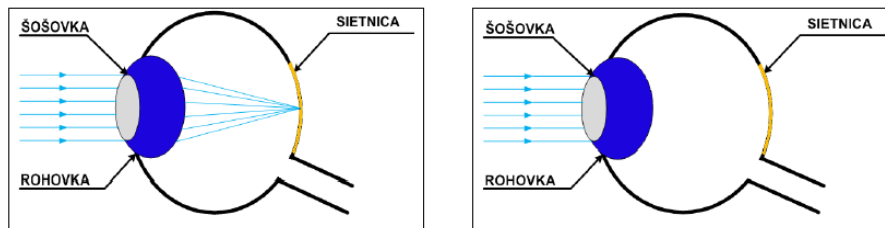
2.1 Úvod do optických bezvláknových dátových sietí

Koncept optickej bezvláknovej siete bol prvý krát predstavený v roku 1979, kedy sa o ňom zmienili F. R. Gfeller a U. Bapst [6]. Koncept, ktorý bol predstavený umožňoval dosiahnuť prenosovú rýchlosť 1 Mbps a využíval difúzne optické žiarenie. V nasledujúcich rokoch však Charles K. Kao spoločne s G. Hockhamom a T. Daviesom vo svojich štúdiách prišli na to, ako možno dosiahnuť zníženie strát, ktoré pôsobia v optickom vlákne, a tak sa pozornosť výskumu presunula k prenosu informácií prostredníctvom optických vlákien. V súčasnej dobe však môžeme sledovať opätovný nárast myšlienok k návratu na prenos informácií prostredníctvom bezvláknového prenosu [11].

Optické siete môžu dosahovať veľmi vysokých prenosových rýchlostí. Ich ďalšou výhodou je poskytovanie bezpečného a širokopásmového symetrického prenosu. Pri porovnaní optických sietí s inými sieťami môžeme povedať, že optická sieť nie je závislá na obmedzenom a regulovanom spektre a kmitočtovej licencií ako sú napríklad rádiové siete. Podmienkou pre prenos je však priama viditeľnosť medzi vysielateľom a prijímateľom. U optických sietí sa ako vysielateľ môže použiť laser alebo LED dióda a ako prijímateľ môže byť použitý optický detektor. Preto optické jednotky pracujú v plnom duplexnom režime. Nevýhodnou prenosu optickej bezvláknovej dátovej siete je závislosť na vplyvoch atmosférického prenosového prostredia (smog, hmla, sneh atď.) [31].

2.2 Bezpečnosť pri prenose dát v optických bezvláknových dátových sietí

Pri prenose dát v optických bezvláknových sieťach sa môžu používať zdroje, ktoré pre človeka znamenajú nebezpečenstvo, preto je pri práci s nimi nutné dodržiavať určité bezpečnostné štandardy. Bezpečnosť pri prenose za pomoci lasera garantuje certifikát na konformitu s normou IEC 60825-1 [17]. Pri prenose dát umožňujú niektoré výrobky znížiť výkon lasera automaticky, a to hlavne vtedy, keď sa niekto nachádza v dráhe lúča APR (Automatic Power Reduction). Lasery pre vlnovú dĺžku $\lambda = 1550$ nm dovoľujú používať väčší výkon pri stálej bezpečnej prevádzke pre ľudské oko, preto dosahujú aj väčšiu vzdialenosť. Pri laseroch pre vlnovú dĺžku $\lambda = 850$ nm boli z dôvodu bezpečnosti oka znižované výkonové podmienky [17]. Reakcie ľudského oka na jednotlivé vlnové dĺžky môžeme vidieť na obrázku 2.1 [11].



Obrázok 2.1: Reakcia ľudského oka na vlnovú dĺžku $\lambda < 1400 \text{ nm}$ a $\lambda > 1400 \text{ nm}$

Lúče, ktorých vlnová dĺžka je $\lambda = 850 \text{ nm}$ sú pre ľudské oko síce neviditeľné, ale aj tak preniknú až na sietnicu oka. Naopak lúče s vlnovou dĺžkou $\lambda = 1550 \text{ nm}$ sú sietnicou absorbované.

3 Vnútorne bezvláknové optické siete

Ako je z názvu zrejmé, jedná sa o optické siete použité vo vnútorných priestoroch. Tieto vnútorne bezvláknové optické siete poskytujú alternatívu k bezdrôtovým rádiovým sieťam. Využitie týchto sietí bude z hľadiska rozvoja oblasti telekomunikácií oveľa väčšie ako je doteraz. Hlavným dôvodom prečo tomu tak bude je, že postupne nastáva väčší rozvoj širokopásmových sietí a dochádza k výraznému nárastu prenosových dátových rýchlostí [23].

Vnútorne bezvláknové optické siete majú radu výhod, ktoré ich v porovnaní s inými sieťami zvyhodňujú. Medzi niektoré z týchto výhod patria tieto:

- Nízka miera atmosférického prostredia – v týchto sieťach sa nestretáme s niektorými druhmi atmosférických javov, ako sú napr. sneh, dážď, hmla.
- Svetelný lúč, ktorý sa šíri sieťou nepreniká stenami – poskytuje dostatočnú ochranu pred prípadným odpočúvaním
- Vysielať optický signál neovplyvňuje už využívané rádiové kanály
- Cena komponent nie je vysoká

Tieto siete majú však aj svoje nevýhody. Medzi jednu nevýhodu vnútorných bezvláknových optických sietí patrí to, že optický lúč, ktorý sa šíri vnútornými priestormi je náchylný na objekty alebo prekážky, ktoré zamedzujú priamej viditeľnosti medzi vysielačom a prijímačom pri konfigurácii priamej viditeľnosti. Fotodetektor, ktorý je tvorený fotodiódou APD alebo PIN sníma okrem užitočného svetla aj svetlo parazitné, ktoré je tvorené rôznymi typmi zdrojov svetelného žiarenia. Toto neužitočné svetlo nazývame šum, alebo parazitné svetlo. Medzi zdroje tohto parazitného svetla patrí denné svetlo, wolfrámové žiarovky, žiarivky, fluorescenčné žiarivky, televízne diaľkové ovládače a radu ďalších zdrojov [2].

Toto parazitné svetlo sa pričíta k výkonu, ktorý je detekovaný fotodetektorom, čo spôsobuje chybné určenie bitovej sekvencie alebo saturácie fotodetektoru, čo spôsobuje nefunkčnosť komunikačného reťazca, pretože intenzita parazitného svetla má často väčšiu výkonovú úroveň ako má komunikačný signál. Okrem tohto šumu pôsobí aj rada ďalších šumov, ktoré sú svojou povahou dané typom použitých komponent. Predovšetkým sa jedná o použitie polovodičových súčiastok. V optických bezvláknových systémoch nás predovšetkým obmedzujú šumy výstrelový, tepelný či blikavý, ktorý sa potom združuje do prídavného Gaussovho šumu AGWN (Additive White Gaussian Noise) [23].

3.1 Optická bezvláknová komunikácia

Pre optickú bezdrôtovú komunikáciu sú vhodné rôzne druhy osvetlenia v závislosti na danej aplikácii. Ako zdroj optického žiarenia sú používané polovodičové súčiastky, a tie poskytujú buď koherentné alebo nekoherentné svetlo. Medzi koherentné zdroje svetla sa radia laserové diódy LD (Laser Diode), medzi nekoherentné zdroje svetla patria diódy emitujúce svetlo LED (Light-Emitting Diode). Oba zdroje patria medzi najdôležitejšie žiariče používané pri vysielaní u bezvláknových komunikačných systémoch.

LED diódy sú všeobecne lacné, bezpečné a nevyžarujú tak vysoký optický výkon ako je to u LD diód, čo z nich robí preferovanú variantu pre aplikácie vo vnútorných bezvláknových sieťach. Bohužiaľ, ich elektro-optická účinnosť je nízka, ich spektrálna šírka je veľká a modulačná šírka pásma je obmedzená na niekoľko sto MHz. LD diódy sú na druhú stranu drahšie a vyžadujú zložitejšie ovládače. Okrem toho, že sú predmetom prísnych obmedzení pri prenose výkonu z dôvodu bezpečnosti zraku, tak ponúkajú radu výhod, ktoré tieto nevýhody kompenzujú a robia ich preferovanou variantou pre aplikácie vo vonkajších bezvláknových sieťach. Modulačná šírka pásma u LD diód je väčšia ako u LED diód, ich elektro-optická účinnosť je taktiež väčšia. Spektrálna šírka týchto zdrojov je úzka, čo umožňuje použitie úzkopásmových tenkovrstvých optických filtrov, ktoré poskytujú vysokú redukciu svetelného šumu v pozadí. Bezpečnosť zraku u LD diód môže byť zlepšená použitím rozptyľujúcich prvkov, ako sú holografické difúzory, ktoré rozširujú žiarenia a vytvárajú rozšírený obraz na sietnici [33].

3.2 Delenie vnútorných bezvláknových sietí

Vnútorne bezvláknové siete rozdeľujeme podľa niekoľkých konceptov. Medzi tieto koncepty patrí rozdelenie podľa komunikačnej trasy medzi vysielateľom a prijímateľom, podľa smerovosti a v poslednom rade podľa použitého spektra [11].

3.2.1 Rozdelenie podľa komunikačnej trasy medzi vysielateľom a prijímateľom

a) S priamou viditeľnosťou – LOS (Line of Sight)

Tieto systémy sa tiež nazývajú ako DBIR (Directed Beam Infrared). Medzi vysielateľom a prijímateľom je maximálna energetická účinnosť, pretože prenášaný výkon je koncentrovaný do úzkeho vyžarovacieho kužela (obrázok 2.2). Túto energetickú účinnosť dosiahneme vtedy, keď medzi vysielateľom a prijímateľom nedôjde k prerušeniu

spojenia na komunikačnej trase. Zóna medzi vysielateľom a prijímačom musí byť bez akýchkoľvek prekážok, inak nastáva zníženie signálu. Veľkosť tejto zóny závisí od pracovnej frekvencie a vzdialenosti medzi vysielateľom a prijímačom. Tieto systémy používajú úzky laserový lúč k vytvoreniu spojenia. Poskytujú taktiež vysokú prenosovú rýchlosť [11].

b) S nepriamou viditeľnosťou – NLOS (Non Line of Sight)

Medzi vysielateľom a prijímačom môže byť vložená prekážka bez toho, aby to nejakým spôsobom znemožnilo komunikáciu (obrázok 3.1) [23]. Optický lúč je prenášaný z vysielateľa k prijímaču pomocou odrazania sa od rôznych odrazových plôch, ako sú napr. stropy, steny, preto sa tento systém tiež nazýva ako *difúzny*. Tento difúzny systém funguje bez ohľadu na rôzne prekážky či akékoľvek aspekty v danom priestore. Nevýhodou tohto systému je však znížená prenosová kapacita, ktorá je spôsobená veľmi zložitou cestou signálu od vysielateľa k prijímaču [11].

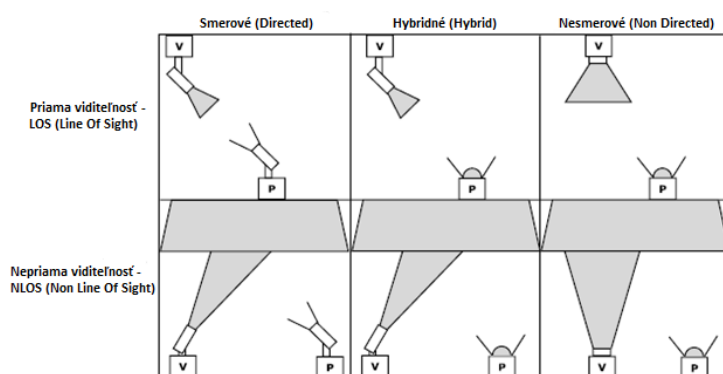
3.2.2 Rozdelenie podľa smerovosti medzi vysielateľom a prijímačom

Koncepty s priamou viditeľnosťou a s nepriamou viditeľnosťou môžu byť smerové, hybridné alebo nesmerové (obrázok 3.1). Rozdiely spočívajú vo využití širokosmerových a úzkosmerových vysielateľov a prijímačov pri komunikácii [23].

a) Smerové – využívajú úzkosmerové vysielateľe a prijímače

b) Hybridné – využívajú nesmerové vysielateľe a úzkosmerové prijímače

c) Nesmerové – využívajú nesmerové vysielateľe a prijímače



Obrázok 3.1: Koncepty vnútorných bezvláknových optických sietí medzi vysielateľom (V) a prijímačom (P)[23]

3.2.3 Rozdelenie podľa použitého spektra

Pre komunikáciu sa najčastejšie používajú dva druhy spektier. Sú to spektrá neviditeľné (infračervené) a viditeľné (VLC).

Technológia prenosu v infračervenom spektre je založená na komunikácií prostredníctvom lúča infračerveného svetla, ktorý ľudské oko nevidí, pretože tento lúč sa nachádza mimo viditeľného spektra. Komunikácia je založená na infračervených LED diódach. Prenos v neviditeľnom spektre je používaný veľmi dlho k diaľkovému ovládaniu televízorov či u prvých mobilných telefónov. Výhodou tohto prenosu bola nízka cena komponent, slušná prenosová rýchlosť a taktiež nízka spotreba energie infračervených vysieláčov. Technológia prenosu vo viditeľnom spektre je podrobnejšie rozobratá v nasledujúcich podkapitolách.

3.3 VLC

VLC (Visible Light Communication) je nová komunikačná technológia využívajúca viditeľné svetlo (vlnové dĺžky 380 nm až 750 nm), ktoré je všade okolo nás. Je to oblasť komunikácie, ktorá využíva biele svetlo poskytované polovodičovými zdrojmi pre osvetlenie a pre vysielanie informácií [18].

Komunikácia založená na viditeľnom svetle je atraktívnou voľbou pre okamžitý prenos obrovského množstva dát, pričom toto svetlo je viditeľné ľudskému oku a nepredstavuje pre neho žiadne nebezpečenstvo. Vďaka tomuto viditeľnému svetlu môžeme vidieť, ktoré zariadenie dáta vysielajú, a ktoré dáta prijíma.

VLC systémy v súčasnosti vyvíjajú vedcami, ktorí sa snažia vytvoriť komunikáciu s ultra-vysokou rýchlosťou, vysokou bezpečnosťou a tiež komunikačné siete, ktoré umožňujú tvorbu a rozširovanie bezšvových výpočtových aplikácií pomocou veľmi veľkej šírky pásma a vysokofrekvenčného pulzného svetla použitého namiesto rádiového a mikro vln. Tieto systémy používajú modulované svetelné vlnové dĺžky emitované rôznymi vhodne prispôbenými zdrojmi, ako sú vnútorné a vonkajšie osvetlenia, displeje, televízory, počítačové monitory, digitálne fotoaparáty, ktoré predovšetkým používajú LED diódy [13].

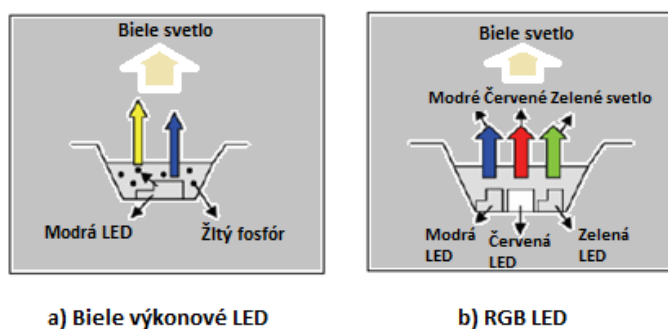
Ako bolo zmienené vyššie, pri prenose vo viditeľnom spektre sa používajú zdroje žiarenia založené na LED zdrojoch. Tieto zdroje majú však vyššiu energetickú spotrebu, a majú tiež problém s teplotnou stabilizáciou. Výhodou použitia týchto LED zdrojov je to, že signál nepreniká stenami miestnosti, čím sa zvyšuje bezpečnosť dátovej siete a taktiež nehrozí

zdravotné riziko. Dosah medzi vysielateľom a prijímačom pri využití LED je tiež dosť malý. V dnešnej dobe sa pre rýchle dátové prenosy používajú laserové diódy, ktoré sú založené na rôznych princípoch funkcie s rôznym typom použitej modulácie. Tu však nastáva problém s emitovaním svetelného žiarenia v priestore [13][18].

Biele LED zdroje – tieto biele LED diódy sa používajú pre všeobecné osvetlenie a delia sa na dva typy podľa princípu vyžarovania svetla [32]:

a) biele výkonové LED zdroje – používajú modrý vysielateľ (450 nm) v kombinácii so žltkastým fosfórom označovaná ako YAG (Yttrium, Aluminium, Garnet) (obrázok 3.2a). Typická modulačná šírka pásma týchto zariadení je pár MHz. Je to spôsobené predovšetkým pomalou časovou odozvou fosfóru;

b) RGB LED – pre svoju funkčnosť využívajú trojicu čipov (červený, zelený a modrý), a s využitím adaptívneho miešania farieb generujú svetlo bielej farby (obrázok 3.2b) [3].



Obrázok 3.2: Biele LED zdroje – a) biele výkonové LED zdroje; b) RGB LED

V roku 2003 bola prezentovaná práca Y. Tanaku, v ktorej bola využitá biela výkonová LED dióda, ktorá sa skladala z trojice čipov RGB a umožňovala dosiahnuť prenosovú rýchlosť až 400 Mbps. O sedem rokov neskôr, čiže v roku 2010 sa pomocou modifikácie modrého čipu a OFDM modulácie dosiahla prenosová rýchlosť až 513 Mbps. Odborníci predpokladajú, že v nasledujúcich rokoch sa prenosová rýchlosť zvýši až nad 1 Gbps [20].

Vo viditeľnej oblasti sa postupom času začali využívať výkonové polovodičové zdroje žiarenia PLED (Power Light Emitting Diode), pretože ponúkajú vysoký výkon pri relatívne nízkom pracovnom napätí a prúde [28].

3.4 VLCC

VLCC (Visible Light Communications Consortium) [30] je konzorcium, ktoré bolo založené roku 2003 japonskými technickými firmami, medzi ktoré patria napríklad Toshiba Corporation; Sharp Corporation; Panasonic Electric Works Co.,Ltd; Samsung Electronics Co.,Ltd, atď. Ako cieľ svojej činnosti si kládlo štandardizovať technológiu VLC (komunikáciu pomocou viditeľného svetla) a vyhnúť sa fragmentácií rôznych protokolov a implementácií u VLC. Ďalej sa snaží zvýšiť povedomie verejnosti o VLC a podporovať aplikácie s tým spojené.

Toto konzorcium navrhlo dve normy spojené s VLC [14] [30]:

a) JEITA CP-1221 – vyhnutie sa fragmentácií a proprietárnym protokolom, ochrana proti rušeniu, svetlo použité pre komunikačné účely v rozsahu 380-750 nm, emitované svetlo v určitom rozsahu s presnosťou na 1 nm, použitá je subnosná (SC) modulácia. Táto norma má 3 hlavné frekvenčné rozsahy:

- rozsah 1 (od 15 do 40 kHz) – pre komunikačné účely
- rozsah 2 (od 40 kHz do 1 MHz) – v tomto rozsahu nemožno použiť žiarivky, pretože sú príliš pomalé a generujú príliš veľa hluku
- rozsah 3 (> 1 MHz) – môže byť použitý iba pre rozsiahle prenosy dát so špeciálnymi LED diódami

b) JEITA CP-1222 – bola navrhnutá podľa Shinichira Haruyamu, PhD. (podpredsedu VLCC). Vlastnosti tejto normy sú:

- frekvencia SC modulácie – 28,8 kHz
- prenosová rýchlosť – 4,8 kbps
- cyklický kontrolný súčet (CRC) pre detekciu/korekciu chýb

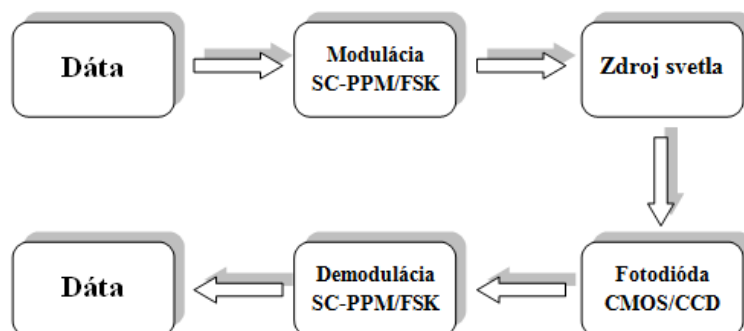
VLCC vychádza sa z toho, že každý druh svetelného zdroja by mohol byť použitý ako odosielateľ nejakej informácie. Ako prijímače sú prevládajúcou voľbou volené LED diódy, ktorých výhodou je, že ich je možno vypnúť a zapnúť vo veľmi krátkych intervaloch. LED diódy sú energeticky účinné a lacné. Ďalej môžu byť napríklad prijímače z fotodiód (PD), či CCD alebo CMOS senzory.

V článku od Ch. Pohlmann môžu byť prenosové rýchlosti LED diód rôzne. Fosfórové LED môžu dosiahnuť prenosovú rýchlosť 40 Mbps. Použitie RGB LED diód

umožňuje rýchlosť až do 100 Mbps. Ďalším typom LED diód sú RCLED, ktoré dosahujú prenosové rýchlosti až 500 Mbps. Tieto diódy používajú Bragovské reflektory (slúžia ako zrkadlá) k zvýšeniu vyžarovaného svetla, a tiež k zvýšeniu spektrálnej čistoty v porovnaní s klasickými LED, čo zlepšuje ich komunikačné schopnosti [30]. V dnešnej dobe sa však tieto prenosové rýchlosti rapidne zvýšili, a to hlavne u RGB LED diód, kde ich hodnoty už dosahujú jednotiek Gbps [3].

Pri prenose dát sa využíva modulácia, ktorá slúži na transformáciu dát do série svetelných impulzov, ako je vidieť na obrázku 3.3. Opäť sa používajú dva druhy modulácií, a to [21][35]:

- SC-kPPM – subnosná pulzne polohová modulácia – dáta sú rozdelené do skupín k bitov a pre každú skupinu je len jeden impulz
- FSK – kľúčovanie frekvenčným posuvom – signálová frekvencia určuje či je alebo nie je práve prenášaný bit 0 alebo 1
- OOK – on-off kľúčovanie – digitálna modulácia využívajúca amplitúdového kľúčovania (ASK)

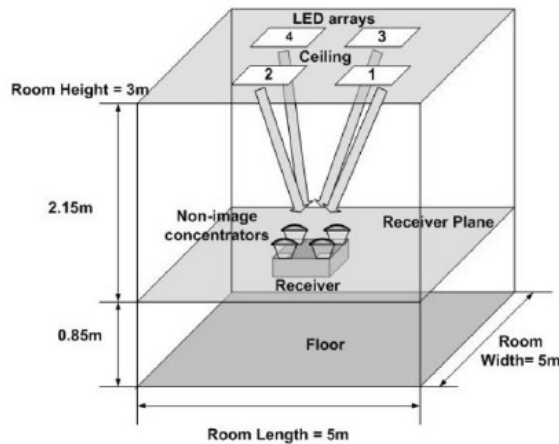


Obrázok 3.3: Proces vysielania a príjmu dát

3.5 MIMO

V oblasti bezdrôtových komunikácií sa ešte používajú *multi-anténne komunikačné systémy* MIMO (Multiple-Input-Multiple-Output), ktorého princíp môžeme vidieť na obrázku 3.4 [7]. Tieto systémy využívajú viac vysielačov (LED) a prijímačov (fotodetektorov) pre zlepšenie výkonu pri komunikácii. Využitím týchto techník sa potencionálne zvyšuje dosah pripojenia a umožňuje sa komunikácia s vyššou dátovou priepustnosťou bez nutnosti dodatočného napájania. Ďalej sa dosahuje aj vyššia spektrálna účinnosť. Na obrázku môžeme vidieť typický systém MIMO, kde sa štyri LED polia používajú pre osvetlenie miestnosti ako aj

pre prenos štyroch nezávislých dátových tokov. Pole prijímača sa skladá zo štyroch fotodetektorov s nezobrazujúcimi koncentrátormi [29].



Obrázok 3.4: MIMO systém [7]

Optické bezdrôtové komunikácie v blízkosti infračerveného režimu ponúkajú oveľa vyššie prenosové rýchlosti, širšiu modulačnú šírku pásma laserového zdroja, ktorý je používaný namiesto LED diód. Vo voľnom priestore môžeme dosiahnuť prenosovú rýchlosť rádu Gbit/s na IR linkách prevádzkovaných na niekoľkých km. Avšak vyžaduje vyšší vysielač výkon vo veľmi úzkom zornom poli (FOV), pričom dosiahnutie širokého zorného poľa je veľmi náročné [28].

Pre vnútorné IR komunikačné spojenia existujú dva druhy mechanizmov [16]:

- a) difúzny
- b) s priamou viditeľnosťou (LOS)

Difúzne linky zvyčajne ponúkajú oveľa nižšie rýchlosti v porovnaní s LOS linkami. To je spôsobené viacnásobnou indukovanou inter-symbolovou interferenciou (ISI). Avšak difúzne linky ponúkajú široké zorné pole (FOV) a určitý stupeň mobility [7][16].

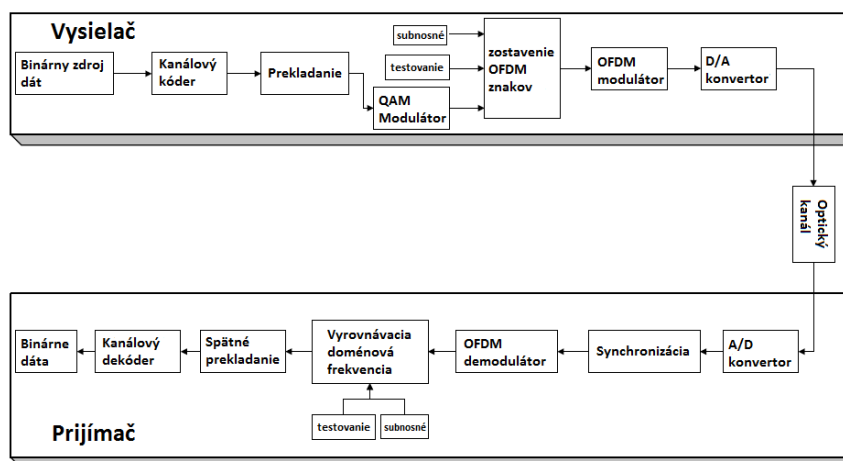
3.6 OFDM

Ďalším kandidátom ako technológia bezdrôtového prenosu dát je OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - ortogonálny multiplex s kmitočtovým delením), ktorý sa používa u širokopásmových mobilných sietí a využíva biele LED diódy. Ďalej tento systém využíva pilotné subnosné pre opravu frekvenčných synchronizačných chýb, testovacie

sekvencie pre kanálový odhad a časovú synchronizáciu. Ako kódovanie je použité FEC (Forward Error Correction) [36].

OFDM je širokopásmová modulácia využívajúca kmitočtové delenie kanálov. Pracuje s tzv. rozprestretým spektrom, kedy je signál vysielaný na viacero vzájomne ortogonálnych frekvenciách, ktoré sa označujú ako subnosné.

Modulačná metóda OFDM spočíva v použití niekoľko stoviek až tisícok subnosných. Subnosné sú ďalej modulované podľa potreby rôznymi moduláciami ako napríklad: QPSK, 16-QAM alebo 64-QAM. Jednotlivé subnosné sú vzájomne ortogonálne, takže maximum každej nosnej by sa malo prekrývať s minimami ostatných. Dátový tok celého kanálu sa tak delí na stovky čiastkových dátových tokov jednotlivých subnosných. Pretože sú vo výsledku toky na jednotlivých subnosných malé, je možné vkladať ochranný interval (GI) – čas, kedy sa nevysiela žiadna nová informácia. Na prijímacej strane je tak možné nerušene prijať (práve) vysielaný symbol, i keď prichádza k prijímaču viacerými cestami s rôznym oneskorením. Rovnaký symbol prijatý viackrát s rôznym oneskorením tak môže odpovedať i viacerým vysielateľom. Prijímané výkonové úrovne viacerých vysielateľov resp. odrazov sa tak na prijímacej strane do istej miery sčítajú [4]. Prenosový model takéhoto OFDM systému môžeme vidieť na obrázku 3.5.



Obrázok 3.5: OFDM prenosový model [36]

OFDM sa používa mimo iného pre prenos signálu v ADSL, bezdrôtových sieťach štandardu IEEE 802.11a/g, WiMAX, LTE a štandardoch pre digitálny rozhlas DAB a digitálnu televíziu DVB-T [36].

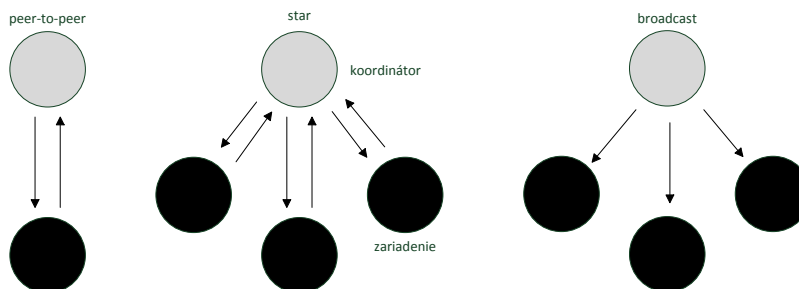
4 Normy pre vnútorné optické bezvláknové siete

Každá komunikácia, čiže aj komunikácia vo vnútorných optických bezvláknových sieťach sa riadi podľa určitých pravidiel. Tieto pravidlá sú zoskupené do rady noriem, a to medzinárodných ale aj štátnych. Hlavnými normami pri tejto komunikácii sú normy IEEE 802.15.7, ČSN-EN 12464-1 a normy JEITA od VLCC.

4.1 Norma IEEE 802.15.7-2011

Komunikácia prostredníctvom viditeľného svetla (VLC) prenáša dáta v závislosti od intenzity modulačných optických zdrojov ako sú svetlo emitujúce diódy (LED) a laserové diódy (LD) rýchlejšie ako môže ľudské oko zachytiť. VLC zlučuje osvetlenie a dátovú komunikáciu v aplikáciách, pouličnom osvetlení, vozidlách či dopravnej signalizácii. Kvôli tomu bola vyvinutá norma 802.15.7 [34], ktorá opisuje použitie VLC pre bezdrôtové osobné siete (VPAN). Ďalej zahŕňa témy ako sú sieťové technológie, adresovanie, predchádzanie kolíziám, indikáciu kvality výkonu, podporu viditeľnosti, farebnú indikáciu stavu a farebnú stabilizáciu.

IEEE 802.15.7 využíva pri komunikácii viditeľným svetlom tri druhy topológie: peer-to-peer, hviezda (star) a broadcast, ktoré sú zobrazené na obrázku 4.1.



Obrázok 4.1: Topológie IEEE 802.15.7

4.1.1 Predmet normy

Táto norma definuje fyzickú (PHY) a spojovú (MAC) vrstvu krátkého dosahu optickej bezdrôtovej komunikácie pomocou viditeľného svetla v optických transparentných médiách. Ďalej definuje tri fyzické (PHY) vrstvy s rozličnými prenosovými rýchlosťami [15]:

- PHY I – tento typ je určený pre vonkajšie použitie s nízko rýchlostnými aplikáciami. Využíva sa tu on-off kľúčovanie (OOK) a variabilná pulzne polohová modulácia (VPPM) s rýchlosťou prenosu dát v ráde desiatok až stoviek kbit/s (11,67 kbit/s až 266,6 kbit/s).

- PHY II – tento typ je určený pre vnútorné použitie. Využíva sa tu OOK a VPPM s prenosovou rýchlosťou v rádoch desiatok Mbit/s (1,25 Mbit/s až 96 Mbit/s).
- PHY III – je používaná u mnohých emisných zdrojov so zvláštnym druhom modulácie (CSK – color shift keying). Prenosové rýchlosti pri rôznych moduláciách a frekvenciách sú v rádoch desiatok Mbit/s (12 Mbit/s až 96 Mbit/s) (viď tabuľka 1).

Tabuľka 1: Operačné módy a parametre pre PHY III

Modulácia	Pracovné frekvencie	FEC	Prenosová rýchlosť
4-CSK	12 MHz	RS(64,32)	12 Mbit/s
8-CSK		RS(64,32)	18 Mbit/s
4-CSK	24 MHz	RS(64,32)	24 Mbit/s
8-CSK		RS(64,32)	36 Mbit/s
16-CSK		RS(64,32)	48 Mbit/s
8-CSK		Nie	72 Mbit/s
16-CSK		Nie	96 Mbit/s

MAC podvrstva poskytuje rozhranie medzi SSCS (podvrstvou konvergenencie), DME (entitou pre správu zariadení) a PHY vrstvou. Táto podvrstva taktiež zahŕňa entitu pre správu s názvom MLME (medium-access-control link-management entity). MLME je tiež zodpovedná za udržiavanie databázy spravovaných objektov, ktoré sa týkajú MAC podvrstvy.

Spektrum viditeľného svetla je v rozsahu vlnových dĺžok od 380 nm do 780 nm. Norma je schopná dodávať dostatočné rýchlosti prenosu dát pre podporu audio a video multimediálnych služieb a tiež mobilitu viditeľného spojenia a kompatibilitu s infraštruktúrou viditeľného svetla. Tiež popisuje poruchy spôsobené šumom a rušením zo zdrojov, ako je napr. okolité svetlo. Táto norma sa riadi platnými bezpečnostnými predpismi na ochranu očí.

Účelom tejto normy je poskytnutie globálneho štandardu pre optickú bezdrôtovú komunikáciu krátkeho dosahu využívajúcu viditeľné svetlo. Tento štandard poskytuje [34]:

- a) prístup k niekoľkým stovkám THz v bezlicenčnom spektre,
- b) proti elektromagnetickému rušeniu a nezasahovanie do rádiových frekvencií (RF) systémov,
- c) ďalšie zabezpečenie tým, že umožňuje užívateľovi vidieť komunikačný kanál,
- d) komunikačné rozširovanie a dopĺňanie existujúcich služieb (napr. osvetlenie, indikácia, apod.) z infraštruktúry viditeľného svetla.

4.2 Norma ČSN EN 12464-1

Norma ČSN EN 12464-1 [45] je českou verzíou európskej normy EN 12464-1:2011.

Norma sa zaoberá svetlom a osvetlením. Konkrétne ide o normu: „ČSN EN 12464-1 Svetlo a osvetlenie – Osvetlenie pracovných priestorov – Vnútorné pracovné priestory“.

4.2.1 Predmet normy

Táto európska norma stanovuje požiadavky na osvetlenie pre vnútorné pracovné priestory z hľadiska zrakovej pohody a zrakového výkonu osôb s normálnym zrakom. Uvedené sú všetky bežné zrakové úlohy, vrátane zobrazovacích jednotiek (DSE – display screen equipment).

Táto európska norma stanovuje požiadavky na riešenie osvetlenia pre väčšinu vnútorných pracovných a príľahlých priestorov z hľadiska kvantity a kvality osvetlenia. K tomu sú doplnené doporučená pre správnu osvetľovaciu prax.

Táto európska norma nestanovuje požiadavky na osvetlenie z hľadiska bezpečnosti a zdravia pracovníkov pri práci a nebola pripravená na základe uplatnenia článku 153 zmluvy ES, hoci požiadavky na osvetlenie uvedené v tejto európskej norme spravidla spĺňajú bezpečnostné požiadavky. Požiadavky na osvetlenie z hľadiska bezpečnosti a zdravia pracovníkov pri práci môžu byť obsiahnuté v smerniciach založených na článku 153 zmluvy ES, v národných právnych predpisoch členských štátov preberajúcich tieto smernice alebo v iných národných právnych predpisoch členských štátov.

Táto európska norma neposkytuje konkrétne riešenie ani neobmedzuje projektantov pri využití nových metód alebo pri použití inovatívnych riešení. Osvetlenie môže byť zaistené denným svetlom, umelým osvetlením alebo ich kombináciou.

Túto európsku normu nemožno použiť pre osvetlenie vonkajších pracovných priestorov, ani pre osvetlenie podzemných dolov alebo ako núdzové osvetlenie.

5 Šošovky

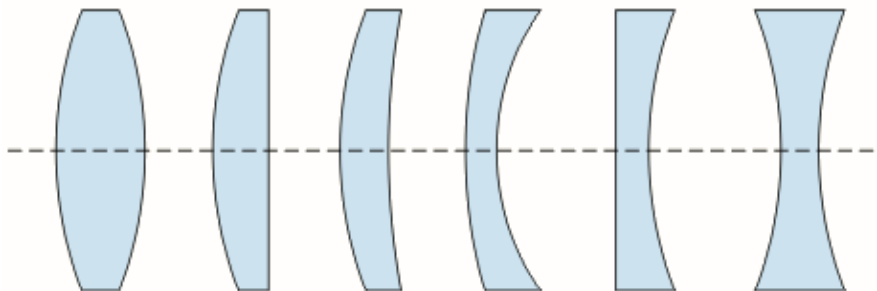
Optická šošovka je tvorená sústavou dvoch centrovaných plôch, ktoré môžu byť guľové alebo jedna rovinná a druhá guľová. Šošovka sa v optike používa ako predmet z priehľadného materiálu, ktorý súži na ovplyvnenie šírenia svetla v širšom zmysle, tzn. ovplyvnenie viditeľného svetla, ďalej infračerveného a ultrafialového žiarenia. Šošovky bývajú najčastejšie vyrobené zo skla, ale taktiež sa na ich výrobu môže použiť plast. Materiál, z ktorého je šošovka vyrobená je charakterizovaný indexom lomu, ktorý je vždy väčší ako jedna, ďalej indexom absorpcie, ktorý je pre vlnové dĺžky v rozsahu použiteľnosti šošovky blízky nule, a polomermi R_1 a R_2 oboch povrchov. Najjednoduchší popis šírenia lúčov šošovkou poskytuje geometrická optika [12][25].

5.1 Základné vlastnosti šošoviek

Lúč, ktorý dopadá na ľubovoľné miesto povrchu šošovky sa v jej vnútri láme podľa Snellovho zákona, podľa ktorého sa tiež lomí na protíahlom povrchu. Okrem toho sa malá časť svetla odrazí naspäť. V niektorých prípadoch, ako sú napríklad objektívy fotografických prístrojov, kde je nutné výrazne znížiť tieto straty spôsobené odrazom, sa povrch šošoviek pokryje jednou alebo viacerými vrstvami priehľadných dielektrických látok, tzv. antireflexné pokrytie. Týmto pokrytím dosiahneme to, že na jednej vlnovej dĺžke alebo v jednom rozsahu vlnových dĺžok svetlo prechádza šošovkou prakticky bez strát [12].

5.2 Druhy šošoviek

Šošovky sú väčšinou guľové, tzn. že aspoň jeden ich povrch je tvorený časťou guľovej plochy. Základné rozdelenie šošoviek (obrázok 5.1) [5] je spojené s tým, ako pôsobí na prejdeň rovnobežný optický zväzok. Spojné šošovky alebo tiež spojky menia optický zväzok na zbiehavý, takže lúče sa za nimi pretínajú v bode, ktoré je označované ako ohnisko. Vzniká tak skutočný obraz predmetu pre šošovkou. Druhou skupinou šošoviek sú rozptylné šošovky alebo tiež rozptylky, ktoré daný zväzok lúčov menia na rozbiehavý, ktorý zdanlivo vychádza z ohniska pred šošovkou, čo znamená, že vytvárajú zdanlivý obraz [25].

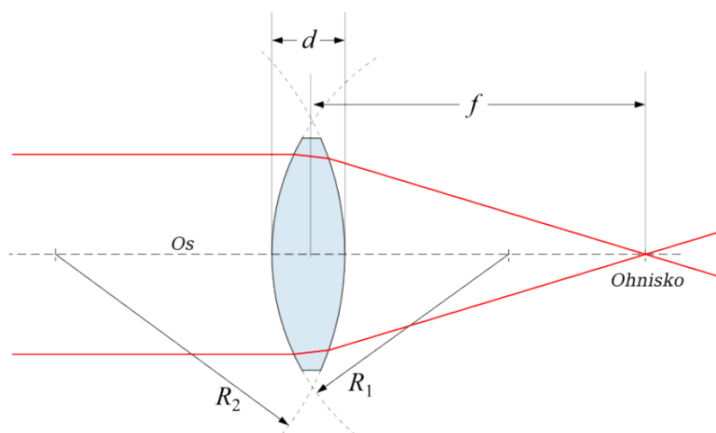


Obrázok 5.1: *Druhy šošoviek (dvojvypuklá, ploskovypuklá, dutovypuklá, dutovypuklá, ploskodutá, vypuklodutá)*

5.2.1 Spojné šošovky

Spojné šošovky alebo spojky [12] sú vždy uprostred silnejšie ako na okrajoch, a jeden povrch majú vždy vypuklý (obrázok 5.2) [5]. Spojky sa delia na:

- dvojvypuklé – oba povrchy sú vypuklé
- ploskovypuklé – druhý povrch je rovinný
- dutovypuklé – druhý povrch je dutý.

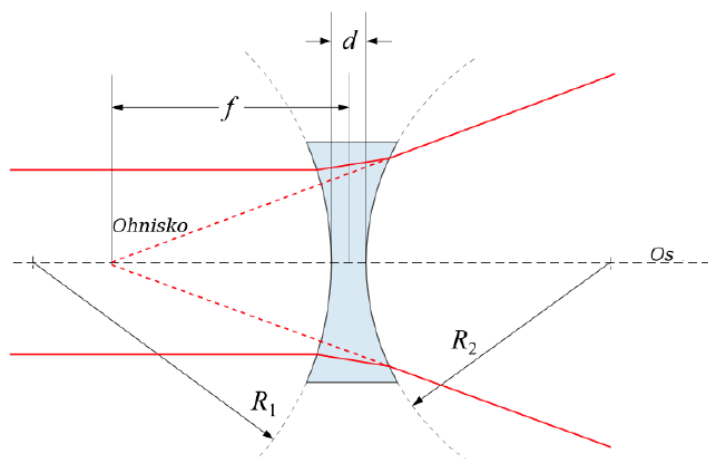


Obrázok 5.2: *Konštrukcia spojenej šošovky: F – ohnisko, f – ohnisková vzdialenosť, R_1 , R_2 – polomery sférických plôch*

5.2.2 Rozptylné šošovky

Rozptylné šošovky alebo rozptylky [12] sú v porovnaní so spojkami naopak uprostred tenšie a majú jeden povrch dutý (obrázok 5.3) [5]. Podľa tvaru druhého povrch sa rozptylky delia na:

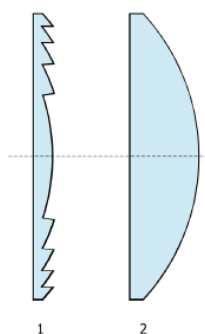
- dvojduté (bikonkávne) – oba povrchy sú duté
- ploskoduté (plankonkávne) – druhý povrch je rovinný
- vypukloduté (konvexkonkávne) – druhý povrch je vypuklý.



Obrázok 5.3: Konštrukcia rozptylky: F – ohnisko, f – ohnisková vzdialenosť, R_1 , R_2 – polomery sférických plôch ohraničujúcich šošovku

5.2.3 Fresnelova šošovka

Fresnelova šošovka je špeciálna konštrukcia optického prvku, čiže šošovky (obrázok 5.4) [5]. Pokiaľ chceme vyrobiť veľkú šošovku, prípadne šošovku s veľkou mohutnosťou, tak je takáto šošovka obvykle „tlstá“ a ťažká. Riešením je Fresnelova šošovka, ktorá slúži ako náhrada šošovky veľkých rozmerov. Porovnanie Fresnelovej šošovky so šošovkou klasickou je na obr. 4. K lámaniu svetelných lúčov dochádza iba na rozhraní, čiže na povrchu šošovky. Vnútorňa časť šošovky je v tomto prípade úplne nepotrebná. Ak šošovku pozliapame iba z jej povrchových častí, bude sa naďalej chovať ako pôvodná šošovka pre lúče idúce rovnobežne s optickou osou. Takto vyrobená šošovka sa nazýva Fresnelova. Tato šošovka má jemne vrúbkovaný povrch a jej veľkou výhodou je malá hrúbka a nízka hmotnosť. Môže byť vyrobená zo skla alebo tiež z plastov. Fresnelové šošovky sa využívajú hlavne v spätných projektoroch. Ďalšie využitia sú majáky policajných a pohotovostných vozidiel, veľmi ploché lupy, semaforey, svetla motorových vozidiel, infračervené čidlá pohybu, atď [12].



Obrázok 5.4: *Fresnelova šošovka (1) a jej ekvivalent (2)*

5.2.4 Ďalšie šošovky

Existujú tiež šošovky, ktoré majú iný tvar povrchu ako je guľová výseč [5]:

- valcová alebo cylindrická šošovka – aspoň jeden jej povrch je tvorený časťou valca; takáto šošovka ovplyvňuje chod lúčov iba v rovine kolmej na os tohto valca, zatiaľ čo v rovine určenej smerom lúčov a osou valca nie je zbiehavosť ovplyvnená. Používa sa napr. ku korekcií niektorých chýb zraku.
- multifokálna šošovka – má v rôznych miestach rôznu ohniskovú vzdialenosť, používa sa u multifokálnych okuliarov.
- asférická šošovka – je rotačne symetrická ale má iný ako guľový tvar. Špeciálne navrhnuté tvary takýchto šošoviek umožnili napríklad konštrukciu nových druhov fotografických objektívov a astronomických prístrojov. Používa sa u kontaktných šošoviek, je tiež vhodná pre korekciu niektorých foriem astigmatizmu.
- toroidná šošovka – v dvoch navzájom kolmých rovinách má iné zakrivenie, takže v každej z nich ovplyvňuje zbiehavosť lúčov inak. Možno ju použiť pre korekciu astigmatizmu

5.3 Zobrazovanie pomocou optických šošoviek

Pre zobrazovanie s použitím šošoviek sa používa chod tzv. význačných lúčov [5].

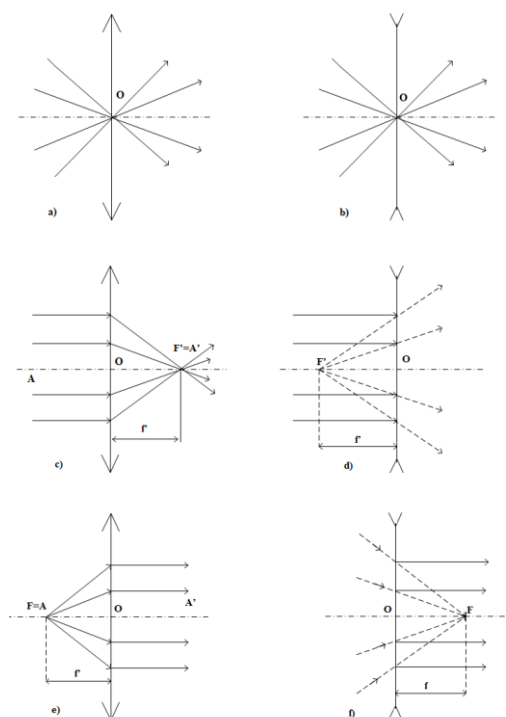
Chod význačných lúčov spojnej šošovky:

- Lúč prechádzajúci optickým stredom šošovky sa neláme (obrázok 5.5a). Tento lúč sa nazýva *hlavný*.

- Lúč, ktorý dopadá rovnobežne s optickou osou šošovky sa láme do ohniska F2 (obrázok 5.5c).
- Lúč prechádzajúci pri svojom dopade na spojku ohniskom F1 sa láme rovnobežne s optickou osou šošovky (obrázok 5.5e).

Chod význačných lúčov rozptylnej šošovky:

- Lúč, ktorý prechádza optickým stredom šošovky nemení svoj smer (obrázok 5.5b).
- Lúč, ktorý je rovnobežný s optickou osou sa láme tak, že v predĺžení prechádza ohniskom F1 (lúče sa lámu tak, ako keby vychádzali z ohniska F1 na optickej ose) (obrázok 5.5d).
- Lúč, ktorý mieri do ohniska F2 sa láme rovnobežne s optickou osou (obrázok 5.5f).

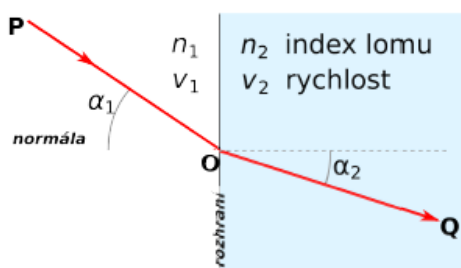


Obrázok 5.5: Význačné lúče spojnej a rozptylnej šošovky

Snellov zákon:

Formulácia: Uvažujme dve rôzne prostredia, ktorých rozhranie je rovinné. Ak sú indexy lomu týchto dvoch prostredí n_1 resp. n_2 , a ak označíme uhly dopadajúceho resp. lomeného zväzku α_1 resp. α_2 (merané ku kolmici rozhrania) ako vidíme na obrázku 5.6, potom podľa Snellovho zákona platí vzorec 5.1:

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2 \quad (5.1)$$

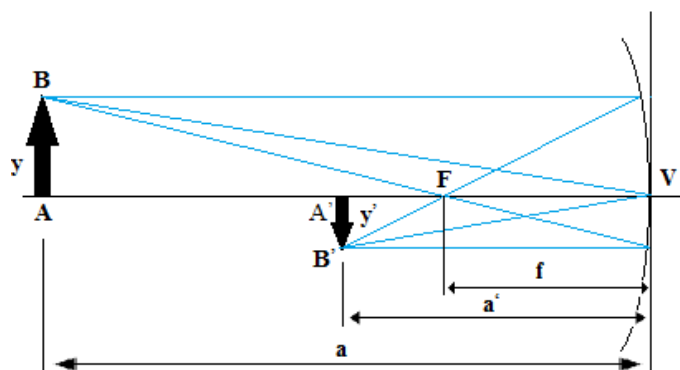
Obrázok 5.6: *Snellov zákon***5.3.1 Zväčšenie optického zobrazenia**

Pri zobrazovaní šošovkami alebo guľovými zrkadlami [12][48] môžu vzniknúť zväčšené alebo zmenšené obrazy predmetu. Pre ich matematický popis sa zaviedla veličina *zväčšenie optického zobrazenia* Z . Tá je definovaná ako podiel veľkosti obrazu a veľkosti predmetu, vyjadrená vzorcom 5.2:

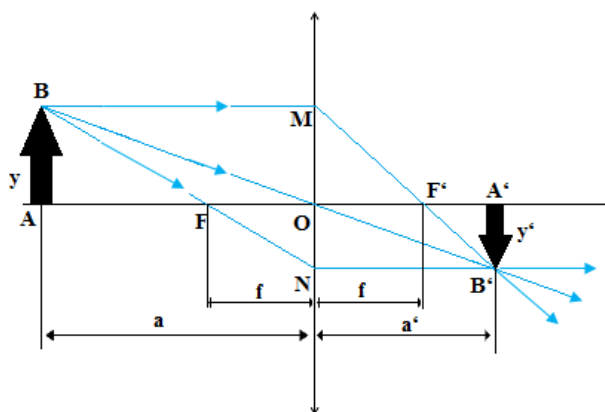
$$Z = \frac{y'}{y}, \quad (5.2)$$

kde y je veľkosť predmetu a y' veľkosť obrazu.

Súvislosť medzi zväčšením Z a predmetovou a obrazovou vzdialenosťou vyplýva z obrázka 5.7 pre guľové zrkadlá a z obrázka 5.8 pre šošovky [25].



Obrázok 5.7: Zväčšenie dutého zrkadla



Obrázok 5.8: Zväčšenie šošovky

Z podobnosti trojuholníkov vyznačených na oboch obrázkoch vyplývajú vzťahy (5.3) pre veľkosť zväčšenia guľových zrkadiel a šošoviek:

$$Z = \frac{y'}{y} = \frac{a'}{a} = -\frac{a'-f}{a} = -\frac{f}{a-f} \quad (5.3)$$

Obecne môžu nastať tieto prípady (platí aj pre guľové zrkadlá aj pre šošovky) [48]:

- $|Z| > 1$... vzniká obraz zväčšený
- $|Z| < 1$... vzniká obraz zmenšený
- $|Z| = 1$... vzniká obraz rovnako veľký ako predmet
- $Z > 0$... vzniká obraz priamy
- $Z < 0$... vzniká obraz prevrátený

5.3.2 Zobrazovacia rovnica

Vzájomné vzťahy medzi predmetovou vzdialenosťou, obrazovou vzdialenosťou a ohniskovou vzdialenosťou vyjadruje tzv. *zobrazovacia rovnica* (5.4) [48]. Tvar tejto rovnice je rovnaký ako pre guľové zrkadlá, tak aj pre šošovky.

Platí:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f} \quad (5.4)$$

Pozn.:

1) Všetky vzdialenosti (ohnisková, predmetová, obrazová) odčítavame od vrcholu zrkadla, resp. od optického stredu šošovky – preto rovnicu v tomto tvare označujeme ako *vrcholovú zobrazovaciu rovnicu*. Taktiež ju môžeme nájsť pod označením *Gaussova zobrazovacia rovnica*.

2) Okrem vrcholovej zobrazovacej rovnice existuje ešte jeden tvar zobrazovacej rovnice – tzv. ohnisková zobrazovacia rovnica (niekedy tiež *Newtonova zobrazovacia rovnica*), ktorej tvar (5.5) je

$$qq' = f^2, \quad (5.5)$$

kde q je vzdialenosť predmetu od ohniska, q' vzdialenosť obrazu od ohniska a f ohnisková vzdialenosť.

Pri riešení príkladov je nutné mať na pamäti *znamienkovú konvenciu* [12], ktorá sa mierne líši pre guľové zrkadlá a šošovky.

Znamienková konvencia pre guľové zrkadlá:

- všetky *vzdialenosti*, ktoré sa nachádzajú *pred* zrkadliacou plochou majú znamienko *kladné*;
- všetky *vzdialenosti*, ktoré sa nachádzajú *za* zrkadliacou plochou majú znamienko *záporné*;
- ohnisková vzdialenosť dutého zrkadla je kladná, vypuklého zrkadla záporná;
- ak vznikne obraz priamy, potom má veľkosť obrazu kladné znamienko, ak vznikne obraz prevrátený, potom má veľkosť obrazu znamienko záporné.

Znamienková konvencia pre šošovky:

- predmetová vzdialenosť má vždy kladné znamienko;
- obrazová vzdialenosť má kladné znamienko, ak je v smere lúčov prechádzajúcich šošovkou (tj. obraz vzniká „za“ šošovkou), avšak ak obraz vzniká v rovnakej časti priestoru ako leží predmet, potom má obrazová vzdialenosť znamienko záporné;
- ohnisková vzdialenosť spojnej šošovky je kladná, rozptyľnej šošovky záporná;
- ak vzniká obraz priamy, potom má veľkosť obrazu znamienko kladné, ak vzniká obraz prevrátený, potom má veľkosť obrazu znamienko záporné.

5.3.3 Optická mohutnosť šošovky

Optická mohutnosť φ [25] je prevrátená hodnota ohniskovej vzdialenosti a vyjadruje zakrivenosť šošovky. Jednotkou optickej mohutnosti je *Idioptria*. Optickú mohutnosť jedna dioptria má šošovka, ktorej ohnisková vzdialenosť je jeden meter.

Optická mohutnosť šošovky φ , meraná v dioptriách, je určená vzťahom (5.6):

$$\varphi = \frac{1}{f} \quad (5.6)$$

Optická mohutnosť šošovky závisí na hrúbke d a polomeroch krivosti r_1 a r_2 podľa vzťahu (5.7):

$$\varphi = \frac{1}{f} = (n_r - 1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) - \frac{(n_r - 1)^2}{n_r} \cdot \frac{d}{r_1 r_2} \quad (5.7)$$

kde n_r je pomer indexu lomu šošovky n k indexu lomu obklopujúceho prostredia – tzv. relatívny index lomu. Ak je šošovka vo vzduchu, potom $n_r \cong n$. Pre tenkú šošovku dostaneme vzťah:

$$\varphi = \frac{1}{f} = (n_r - 1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (5.8)$$

5.4 Chyby optických šošoviek

Z praxe je zrejmé, že žiadna šošovka sa nechová ideálne, tzn. že pri zobrazovaní predmetu vznikajú rôzne chyby a taktiež deformácie [5]. K hlavným chybám patrí [25]:

- Farebná chyba alebo tiež chromatická aberácia – dôsledok rozdielneho indexu lomu jednotlivých fariem v spektre (ohnisková diferencia).
- Sférická alebo tiež guľová chyba – dôsledok toho, že lúče sa na krajoch šošovky lámu viacej ako tie okolo stredu, čiže nemajú rovnaké ohnisko.
- Koma – chyba spôsobená širokým dopadajúcim zväzkom lúčov, ktorý nie je rovnobežný s optickou osou.
- Astigmatická chyba – spôsobená šikmými lúčmi, ktoré sa lámu inak ako kolmé lúče.

5.5 Použitie optických šošoviek

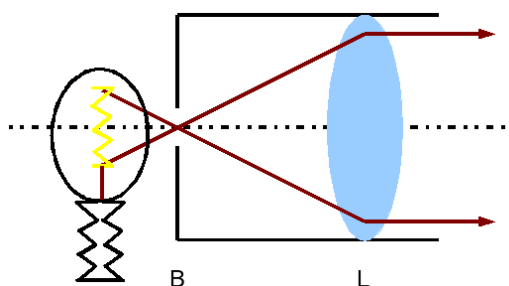
Jedným z najstarších využití šošovky predstavujú okuliare pre korekciu zraku a lupy. Ďalším využitím sú objektívy fotografických prístrojov, ďalekohľady a teleskopy. Prvým fotografickým prístrojom stačila jediná šošovka pre vytvorenie obrazu na fotografickom papieri; dnes majú v objektívoch väčšinou niekoľko šošoviek za sebou. Optický ďalekohľad alebo teleskop sa skladá z dvoch sústav šošoviek alebo zrkadiel (objektívu a okuláru). Ďalej sa šošovky používajú pre mikroskopy. Rovnako ako u ďalekohľadov sú základom mikroskopov šošovky, ktoré tvoria objektív a okulár. Ďalšou veľkou oblasťou využitia optických šošoviek sú lasery. Svetlo z lasera je vyžarované vo forme úzkeho zväzku, a na rozdiel od svetla prirodzených zdrojov je koherentné a monochromatické. Lasery sa používajú v priemysle na rezanie a vŕtanie, v mechanikách pre čítanie a zápis kompaktných diskov a DVD, v lekárstve pre očné operácie, v spektroskopii, telekomunikáciách, ďalej pre meranie vzdialenosti, optické bezkáblvé spoje, laserové ukazovátka, laserové tlačiarne, atď [41].

6 Kolimátory

Kolimátor je zariadenie, ktoré sa v optike používa na vytváranie úzkeho rovnobežného zväzku lúčov z pôvodných rôznobežných lúčov [46].

6.1 Optické kolimátory

Optické kolimátory [43] sa obvykle skladajú zo sústavy zrkadiel alebo šošoviek. Ich úlohou je sústreďovanie svetla do presne smerového zväzku, ktorý nestráca intenzitu ani pri vzdialovaní sa od zdroja na väčšie vzdialenosti. Na obrázku 6.1 [46] môžeme vidieť jednoduchý optický kolimátor zo žiarovkou, clonou a spojkou.



Obrázok 6.1: *Optický kolimátor zo žiarovkou, clonou (B) a spojnou šošovkou (L)*

Kolimátory sa v tomto zmysle používajú pre meranie, kalibráciu iných optických zariadení a ako zameriavače zbraní. V zameriavačoch zbraní sa používa jednoduchý optický kolimátor s nitkovým krížom na jeho zameranie. Ďalej kolimátory možno použiť s laserovými diódami a s CO₂ rezacími lasermi [44][46].

Pre inú ako optickú oblasť elektromagnetického žiarenia a jej okolie sa kolimátor obvykle skladá zo sústavy clôn, ktorá umožňuje prechod iba úzkeho zväzku lúčov a ostatné odtieni. Prechod tohto úzkeho zväzku lúčov je zobrazený na obrázku 6.2 [43].



Obrázok 6.2: *Prechod zväzku lúčov kolimátorom*

Kolimátor sa využíva pri laserových technológiách. Z laserového zdroja vychádza rozptýlené žiarenie, pričom kolimátor sa využíva k usmerneniu tohto žiarenia aby ho bolo možné použiť [22]. Kolimátor je v súvislosti s laserom spojený s optickým izolátorom kvôli spätnej reflexii laserového lúča. Pri priemyslovom použití laseru za kolimátorom (v smere priebehu žiarenia) nasleduje optická sústava pre usmernenie a zaostrenie lúčov.

6.2 Rozdelenie kolimátorov

Kolimátory sa rozdeľujú podľa **tvaru a energií**, pre ktoré môžu byť použité, a ďalej **podľa priestorovej rozlišovacej schopnosti a citlivosti kolimátoru** (tie sú dané hrúbkou kolimátoru, hustotou otvorov a hrúbkou prepážok) [27].

6.2.1 Rozdelenie podľa tvaru

Podľa tvaru rozdeľujeme kolimátory nasledovne [22][27][46]:

- **Mnohooťvorový kolimátor s paralelnými otvormi** – kolimátor s rádovo tisícovým množstvom otvorov, ktoré sú v rovnobežnej ose s detektorom. Obraz objektu má tak rovnakú veľkosť. Tento typ kolimátora sa používa najčastejšie.
- **Divergentný kolimátor** – kolimátor s otvormi rozbiehajúcimi sa k zdroju žiarenia. Umožňuje tým získať väčší obraz ako je plocha kryštálu, ale s menšou citlivosťou i priestorovým rozlíšením (zaberie väčšiu plochu ako je plocha detektora).
- **Konvergentný kolimátor** – kolimátor s otvormi zbíhajúcimi sa k zdroju žiarenia. Tým sa získa zväčšený obraz malého orgánu so zvýšenou citlivosťou i priestorovým rozlíšením (rozťahne malú plochu objektu na väčšiu plochu detektora).
- **Jednoťvorový kolimátor typu „pinhole“** – lievikovitý kolimátor s otvorom s priemerom 3–5 mm. Poskytuje zväčšený obraz s najvyšším polohovým rozlíšením, ale nízkou citlivosťou (predlžuje dobu vyšetrenia). Je určený k sledovaniu veľmi malých orgánov (napr. štítnej žľazy).
- **Kolimátor typu „fan beam“** – tento typ má ohnisko v transversálnom smere a pritom je paralelný v axiálnom smere. Vďaka tomu má až o 50 % vyššie priestorové rozlíšenie ako paralelný typ. Využitie má v tomografickom snímaní mozgu.

6.2.2 Rozdelenie podľa energií

Kolimátory podľa energie rozdeľujeme na [22]:

- pre žiariče nízkych energií do 160 keV (napr. ^{99m}Tc , ^{201}Tl , ^{123}I)
- pre žiariče stredných energií do 300 keV (napr. ^{111}In , ^{67}Ga)
- pre žiariče vysokých energií do 400 keV (napr. ^{131}I , ^{18}F)

Toto rozdelenie je dôležité pre hrúbku prepážok kolimátora. Pokiaľ by sme použili žiarič s vysokou energiou na kolimátore pre nízku energiu, prepážky by prepúšťali niektoré fotóny a tie by spôsobovali rozmazanie celkového obrazu.

7 Optické koncentrátoary

Na to, aby sme mohli zachytávať jednotlivé zväzky optických lúčov je potrebný prijímač s fotodetektorom. Použitie veľkoplošného fotodetektora predstavuje spôsob ako zvýšiť efektívnu zbernú plochu prijímača, avšak toto použitie nie je z hľadiska kvality najlepšie. Dôvodom tohto tvrdenia je skutočnosť, že s týmito detektormi je spojená veľká kapacita a šum, ktoré spôsobujú, že tieto detektory sú nevhodné pre vysokorýchlostné aplikácie, pretože spôsobujú zníženie priepustnosti systému. Ďalšou ich nevýhodou je vysoká cena. Z týchto dôvodov sa v bezdrôtových komunikačných systémoch začalo uprednostňovať použitie optických koncentrátoarov [33] ako prijímačov, ktoré zlepšujú účinnosť zachytávania optických lúčov pomocou malých a lacných nízkokapacitných fotodetektorov. Hlavnou úlohou optických koncentrátoarov je teda transformovať zväzok lúčov dopadajúcich na veľkú plochu na zväzok lúčov vychádzajúcich z menšieho priestoru pre zlepšenie účinnosti prijímača.

Optické koncentrátoary môžeme rozdeliť na dva základné typy [33]:

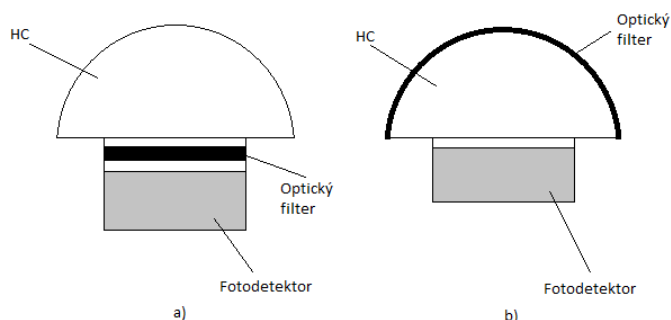
- a) Zobrazovacie (imaging) – sú obvykle použité v priamych LOS (line-of-sight) linkách, ktoré poskytujú komunikáciu typu bod-bod. Keďže vysielač aj prijímač sú obvykle pevné, takže migrácia ohniska zobrazovacej šošovky je obmedzená. Tieto koncentrátoary sú predovšetkým určené pre vonkajšie aplikácie.
- b) Nezobrazovacie (non-imaging) – tieto koncentrátoary sú presným opakom zobrazovacích. Sú preferované pre vnútorné aplikácie, kde je vyžadované väčšie zorné pole (FOV – field of view), čo zaručuje vyššiu mobilitu a flexibilitu usporiadania.

Nezobrazovacie koncentrátoary sa delia do troch významných skupín, a to na hemisférické koncentrátoary (HC), zmiešané parabolické koncentrátoary (CPC) a na dielektrické totálne vnútorne odrážajúce koncentrátoary (DTIRC).

7.1 Hemisférický koncentrátoar

Hemisférický alebo tiež pologulovitý koncentrátoar (HC) využíva pologulovité šošovky (viď obrázok 7.1). Ich jednoduchosť, nízka cena a široké zorné pole (FOV) ich radí medzi preferovanú voľbu mnohých komerčných systémov. Tieto pologulovité šošovky sú špecifikované ako optický koncentračný element pri IrDA vysielačoch, čo znamená, že ich môžeme nájsť v rade mobilných telefónov, notebookoch a ďalších. Ďalej tieto koncentrátoary s filtrom naneseným na svojom povrchu dosahujú úzku pásmovú priepusť a široké zorné pole.

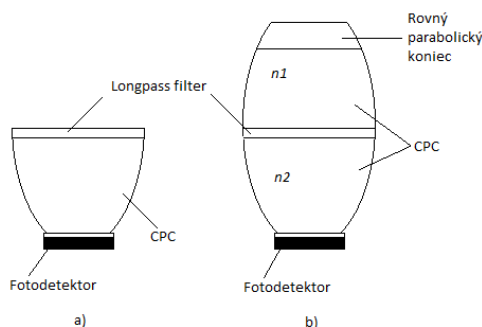
Tento druh koncentrátorov je vhodný pre vnútornú a mobilnú bezdrôtovú komunikáciu a príslušenstvo. Ako je z obrázka 7.1 vidieť, tento koncentrátor má dve štruktúry.



Obrázok 7.1: Schematický diagram štruktúr hemisférického koncentrátoru:
 a) zahŕňajúci plochý filter; b) zahŕňajúci tenkovrstvový optický filter, ktorým je potiahnutý povrch koncentrátoru

7.2 Zmiešaný parabolický koncentrátor

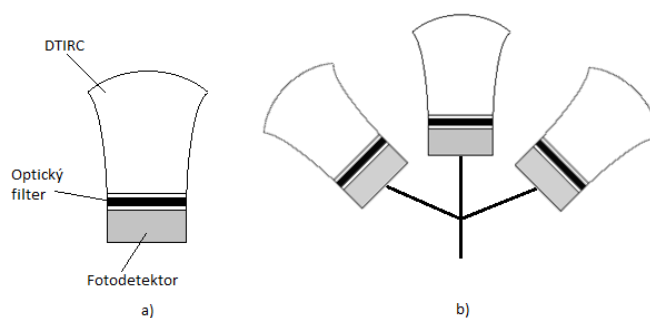
Zmiešaný parabolický koncentrátor (CPC) je ďalší z radu nezobrazovacích koncentrátorov. V porovnaní s hemisférickým koncentrátorom poskytuje radu výhod. Tieto koncentráto



Obrázok 7.2: Kombinovaná CPC štruktúra – a) CPC s dlhopriepustného filtračného materiálu; b) dielektrický a dutý CPC s rovným úsekom na konci

7.3 Dielektrický koncentrátor

Dielektrický totálne vnútorne odra



Obrázok 7.3: DTIRC štruktúry s filtrami – a) DTIRC s planárnym filtrom; b) pole štruktúry DTIRC filtra

8 Optické vysielacie pre vnútorné bezvláknové optické siete

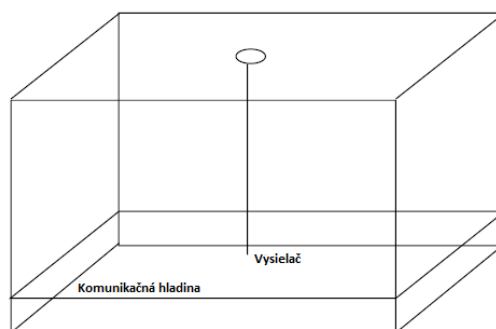
Vysielacie pre vnútorné bezvláknové optické siete sa delia na dve skupiny. Prvú skupinu tvoria vysielacie, ktoré pracujú na princípe nepriamej viditeľnosti medzi vysielacom a prijímačom. To sú tzv. difúzne siete, ktoré využívajú difúzory, ktoré zvyšujú efektivitu vysielacov a ich účinnosť dosahuje až 70%. Tieto difúzory taktiež znižujú hustotu vysielaného optického výkonu na takú hodnotu, aby nedošlo k poškodeniu ľudských očí. Druhú skupinu vysielacov tvoria vysielacie založené na priamej viditeľnosti medzi vysielacom a prijímačom [23][33].

8.1 Optické vysielacie pre vnútorné bezvláknové optické siete s nepriamou viditeľnosťou

Výhodou týchto difúzných konceptov je možnosť flexibility a mobility v rámci pokrývanej siete, avšak nevýhodou je viac cestné šírenie svetelného signálu a infračervených vlnových dĺžkach pre vzdialenosť 5 m vzniká strata 50-70 dB [33].

8.1.1 Konvenčný difúzny systém

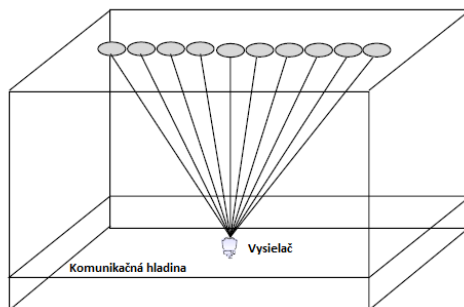
Konvenčný difúzny systém (*CDS – Conventional-Diffuse-System*) je najjednoduchší prípad difúznej siete aká môže byť zhotovená. Používa jediný vysielací a jediný prijímač, ktorý má široký zorný uhol (180°) (obrázok 8.1) [23]. Princíp funkčnosti je založený na vysielaní optického zväzku z komunikačnej roviny do stropu, kde sa toto svetlo odráža do všetkých smerov v rámci miestnosti. Tento systém má však jeden problém, ktorý súvisí s pokrytím miestnosti. Je to problém s nerovnomerným pokrytím celej miestnosti a to hlavne rohov, kde dochádza k zníženiu úrovne dopadajúceho výkonu [8].



Obrázok 8.1: Konvenčný difúzny systém

8.1.2 Jednoplášový viacvzäzkový vysielateľ

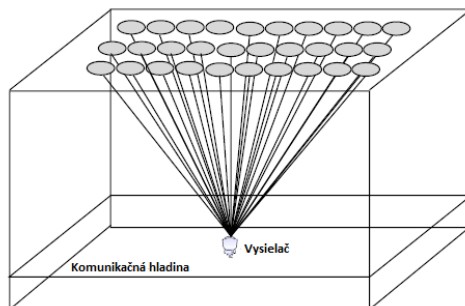
Jednoplášový viacvzäzkový vysielateľ (*LSMT – Line-Strip-Multibeam-Transmitter*) používa objemový CGH (Computer Generated Holography) holografický difúzor, ktorý mení amplitúdu a fázu, avšak znižuje účinnosť optického prvku. Tento difúzor vysielal optické zväzky na strop miestnosti s rozmermi 6 x 6 x 3 m tak, aby vytvoril pás svetelných stôp, pričom optické intenzity týchto stôp sú identické (viď. obrázok 8.2) [23]. Každý pás obsahuje rovnaký počet stôp, ktoré sú od seba rovnako vzdialené [8].



Obrázok 8.2: Jednoplášový viacvzäzkový vysielateľ

8.1.3 Viacplášový viacvzäzkový vysielateľ

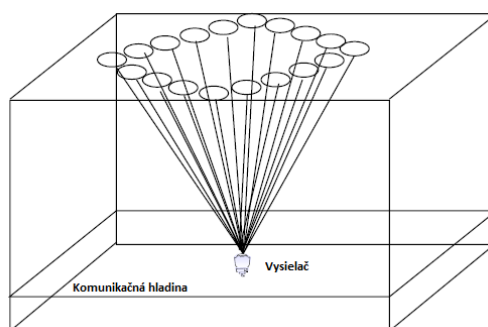
Viacplášový viacvzäzkový vysielateľ (*SMC – Spot-Diffusing Multi-Line-Of-Sight*) je vysielateľ, u ktorého zdroj svetla tvorí laserová dióda. Optický vysielateľ vysielal úzke zväzky na vlnovej dĺžke 780 nm a priemerným výkonom 2 dBm, ktoré sú namierené do pravidelných smerov na strop miestnosti, kde sa tvoria svetelné stopy (viď. obrázok 8.3) [23]. Tie sú od vysielateľa vzdialené 3 m. Vytvorenie tejto konfigurácie vyžadovalo použitie holografického prvku. Ďalším dôležitým aspektom bolo dodržanie rovnakej optickej intenzity u všetkých svetelných stôp. Prijímač bol tvorený vysoko impedančnou PIN fotodiódou a doplnený elektrickým filtrom pre dosiahnutie lepšej citlivosti a odstránenia nežiaduceho parazitného osvetlenia. Tieto filtre však spôsobili pokles optického výkonu signálu o 10% [42].



Obrázok 8.3: Viacplášový viacvzäzkový vysielateľ

8.1.4 Diamantový viacväzkový vysielateľ

Diamantový viacväzkový vysielateľ (*DMD – Diamond-Multispot-Diffusion*) je vysielateľ, ktorý nadobudol novú geometriu, ktorá má tvar diamantu. Tento tvar vznikol pomocou štyroch priamych pásov, ako môžeme vidieť na obrázku 8.4 [23]. Každý tento pás sa skladá z 20 svetelných stôp, ktoré sú od seba vzdialené 10 cm. Prijímače sú umiestnené v rôznych častiach komunikačnej hladiny. Tento systém však stále nerieši rovnomerné pokrytie rohov, pričom na miestach vysielaných svetelných stôp je pokrytie dobré [1].



Obrázok 8.4: *Diamantový viacväzkový vysielateľ*

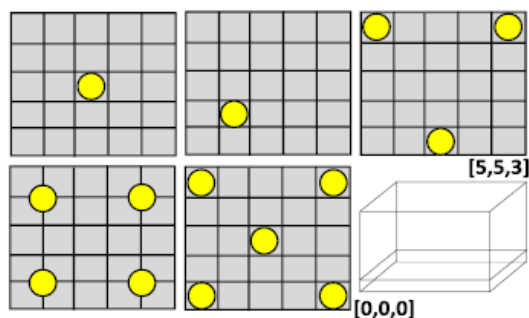
8.2 Optické vysielacie pre vnútorné bezvláknové optické siete s priamou viditeľnosťou

V porovnaní s vysielateľmi v bezvláknovej optickej sieti s nepriamou viditeľnosťou poskytujú tieto vysielacie radu výhod (napr. maximálnu výkonovú efektívnosť medzi vysielateľom a prijímačom) [24]. Nevýhodou je nízka miera mobility, ktorá je však kompenzovaná kvázidifúznym konceptom za pomoci segmentových vysielateľov a prijímačov [23].

Difúzne koncepty využívajú jeden vysielateľ, ktorý vysielá v miestnosti svetelný signál, ktorý má však nerovnomerné rozloženie optickej intenzity v priestore. Tým vznikajú problémy s voľbou prijímača, a taktiež treba riešiť výkonovú úroveň odstupu signálu od šumu SRN (Signal Noise to Ratio). Preto sa začali robiť výskumy v miestnostiach s menšími rozmermi, avšak tu rapídne klesá účinnosť pokrytia vysielateľom a zväčšujú sa výkonové straty. Podstatne lepšieho pokrytia miestnosti sa dosiahlo pri použití viacerých vysielateľov. Tým sa tiež dosiahne rovnomernejšieho rozloženia optickej intenzity [24].

Začali sa výskumy, ktoré sa zaoberali skúmaním počtu použitých vysielateľov umiestnených na stope v miestnosti 5 x 5 x 3 m tak, aby bolo dosiahnuté rovnomerné

pokrytie optickej intenzity miestnosti. Týmto výskumom začal roku 1996 G. N. Bakalidis a ďalší. Testovalo sa celkovo 5 konfigurácií, ktoré boli nasimulované s počtom vysieláčov 1, 2, 3, 4, 5 (obrázok 8.5) [23] a tie boli aj reálne otestované, kde sa zistilo, že najrovnomernejšie rozloženie optickej intenzity v priestore je dosiahnuté pri použití 4 vysieláčov.



Obrázok 8.5: Konfigurácie umiestnenia vysieláčov

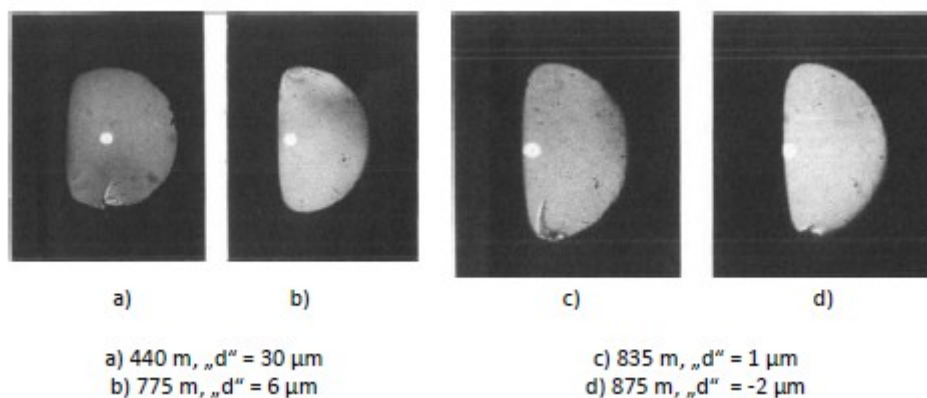
Optický bezvláknový koncept s priamou viditeľnosťou a infračerveným žiarením bol navrhnutý v roku 2010 Le Minhom a jeho kolektívom. Tu sa optický vysieláč skladal z 3 oddelených kanálov s radiačim obvodom, lasera a optického systému. Každý prijímač dokázal prijať 3 kanály. Zdroj žiarenia bol modulovaný pomocou MAX 3869, kde vlnová dĺžka bola 820 nm pri priemernom výkone 25 mW. Optický systém sa skladal z kolimátora, ktorý ožaroval komerčne holografický difúzor (LUMINIT 10° LSD). Tento difúzor poskytoval zdroj triedy 1 pre ochranu zraku a šíril osvetlenie v požadovanom 10° zornom poli vysieláča. Prijímač je tvorený z optického filtra, niekoľkých optických systémov. Lavínovou fotodiódou APD a transimpedančným zosilňovačom, ktorý je nasledovaný obmedzujúcim zosilňovačom. Interferenčný filter so šírkou pásma 10 nm bol použitý pre zabránenie dopadajúceho okolitého svetla na optický systém, ktorý je tvorený dvoma plano-konvexnými šošovkami, ktoré zameriavajú svetlo na APD fotodiódu. Celková šírka pásma je asi 850 MHz a citlivosť 35 dB pre NRZ (Non Return to the Zero) kódovanie pri prenose dát 1,25 Gb.s⁻¹ [23][24].

9 Optické bezvláknové siete s využitím optického vlákna ako vysielача

Optické vlákna ako vysielачe u optických bezvláknových sietí majú rôznu podobu. Postupom času sa vyvíjali a zlepšovali natoľko, že prenos pomocou týchto vysielачov umožňoval zvyšovanie prenosových rýchlostí. Jednotlivé modely týchto vysielачov sú popísané v nasledujúcich kapitolách, v ktorých je rozobratý postupný vývoj vysielачov v optických bezvláknových sieťach s použitím optických vlákien a ich konfigurácie.

9.1 Model „D-profil“

V roku 1986 sa dostáva do popredia špeciálny profil optického stratového vlnovodu (D-profil), ktorý prezentuje C. A. Millar a kolektív. Tento profil je vytvorený z preformy pri použití metódy MCVD (*Modified Chemical Vapor Deposition*). Preforma sa skladala z jadra, ktoré bolo tvorené oxidom kremičitým SiO_2 , ktorý bol dopovaný oxidom germaničitým GeO_2 kvôli vysokému svetelnému lomu. Plášť bol z čistého oxidu kremičitého [9]. Aby bola zaistená plochosť preformy pozdĺž osy, bolo nutné každú preformu brúsiť a leštiť. Keďže bola preforma zužovaná menila sa hodnota d (vzdialenosť medzi jadrom a plochou stranou) od hodnoty 57 k 0. Na obrázku 9.1 [23] je zobrazená hodnota d z rôznych prefóriem pre rôzne dĺžky vytiahnutého optického vlákna. Útlm vlákna bol 20 dB.km^{-1} pri vlnovej dĺžke 1523 nm. Pracovná vlnová dĺžka D-profilu je 633 nm [26].

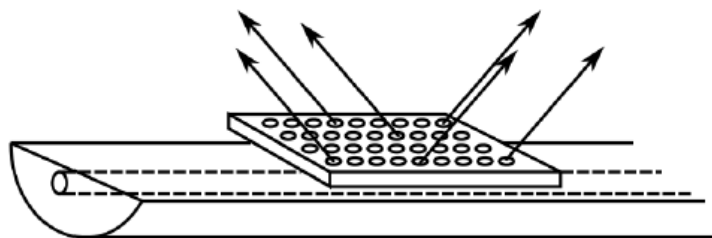


Obrázok 9.1: Optické ukončenie vlákna so špecifikovaným rozdielom pozdĺž rôzne vytiahnutého vlákna

V roku 1993 bol tento profil využitý tímom vedcov pod vedením P. P. Smytha ako zdroj žiarenia pre bezvláknovú komunikáciu. Tu bol optický výkon vedený cez jadro tohto stratového vlnovodu na vysielací element, ktorý mal vyšší index lomu, ako malo dané jadro.

Keď sa materiál s vyšším indexom lomu stretol s vybrúsenou plochou vlákna, tak sa do vysielacieho elementu vyžiarilo z jadra svetlo vďaka vlnovodnému efektu (obrázok 9.2) [23]. Rýchlosť, s ktorou sa svetlo vyviaže z jadra, je primárne definovaná vzdialenosťou jadra od danej vybrúsenej plochy D-profilu. Dané optické vyžarovacie miesta (vysielač element) môžu byť vytvorené pomocou mikrošošoviek alebo z rozptýlených vyžarovacích elementov D-profilu. Optický výkon, ktorý vznikne môže byť použitý pre pokrytie širokého alebo úzkeho uhlu, v závislosti na tom, pre akú aplikáciu potrebujeme vlákno s D-profilom využiť.

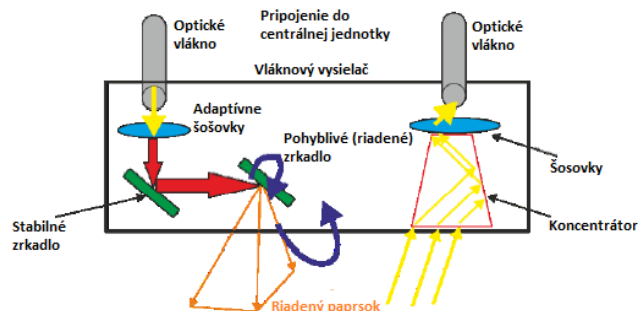
V rámci tejto práce bol do D-profilu za pomoci polovodičového zdroja žiarenia vyžarovaný výkon na vlnovej dĺžke 1500 nm. Z kremíkových mikrošošoviek sa vytvorilo pole, kde mala každá mikrošošovka veľkosť 1cm^2 . Toto pole obsahovalo 6400 týchto mikrošošoviek vo vzdialenosti 250 μm medzi sebou. Svetlo, ktoré bolo vyžarované z tohto poľa mikrošošoviek bolo rovnomerné. V skutočnosti bolo vyžarovaného 80 % vstupného výkonu zo zdroja žiarenia pomocou vyžarovacieho poľa tvoreného týmito mikrošošovkami. Podľa týchto skutočností bolo vypočítané, že takéto usporiadanie by stačilo pre pokrytie stolu o veľkosti 4 x 2,5 metra [9].



Obrázok 9.2: Schematický diagram stratového vlnovodu s D-profilom využitý ako vysielач

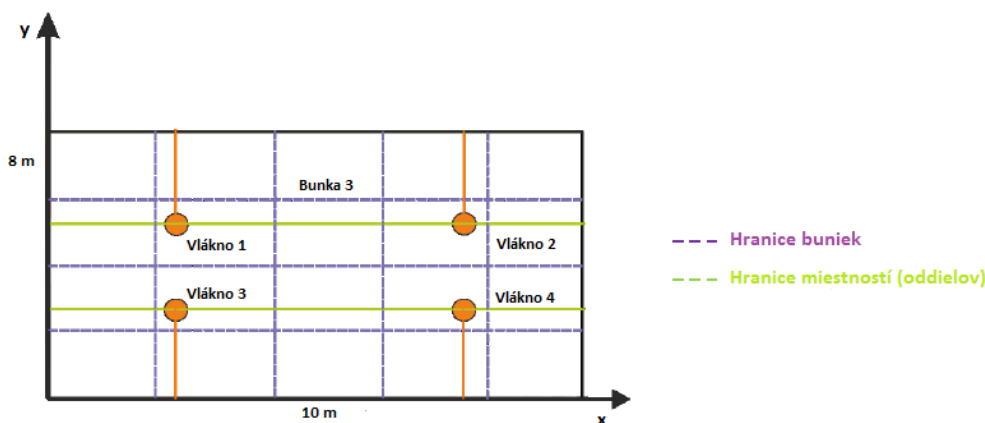
9.2 Model „jedného vlákna“

V článku od K. Wanga a kolektívu sa už plne využíva zakončenie optických vlákien pre distribúciu optickej intenzity v priestore pre vykrytie komunikácie. Bol zvolený koncept s priamou viditeľnosťou – LOS. Pre zisťovanie pozície sa však používa rádiový signál RF. Tento systém je navrhnutý tak, aby mohol byť jednoducho pripojiteľný na DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) systémy, čo z neho vytvára zaujímavé riešenie z hľadiska budúcnosti. Miestnosť, v ktorej sa test uskutočnil mala veľkosť $10 \times 8 \times 3$ metre. Vysielač pre vzostupný smer môže byť buď fixný alebo mobilný, a je umiestnený v rovine. Touto rovinou sa myslí komunikačná rovina vo výške 1 metra nad zemou [37]. Štruktúra optického vysielача umiestneného na strope testovanej miestnosti je na obrázku 9.3 [23].



Obrázok 9.3: Štruktúra vysielajúča pre zostupný smer umiestneného na strope

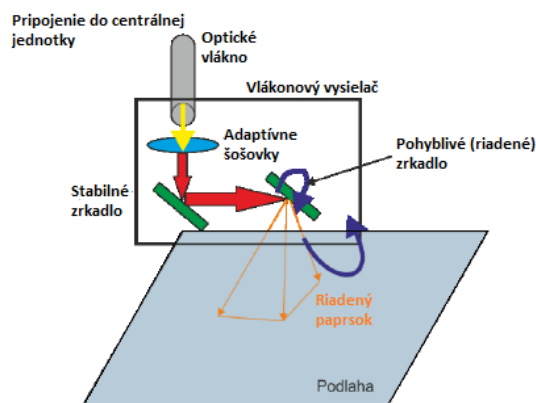
Testovaná miestnosť je navyše rozdelená na 8 obdĺžnikových oddielov rovnobežne s povrchmi stien miestnosti, ako je vidieť na obrázku 9.4 [23]. Veľkosť každého oddielu je $2,5 \times 3 \times 1,5$ metra. Všetky tieto oddiely sú nepriehľadné, takže dopadajúci signál je buď pohltený, alebo blokový. Do každého oddielu bola navyše vložená štandardná výbava ako v kanceláriách či domácnostiach napr. stoly, stoličky, poličky apod. V celej tejto testovanej miestnosti sú osadené ôsmimi wolfrámovými žiarovkami s výkonom 100 W, kvôli simulácii okolitého svetla [37].



Obrázok 9.4: Upresnenie pozície ukončenia optického vlákna a buniek

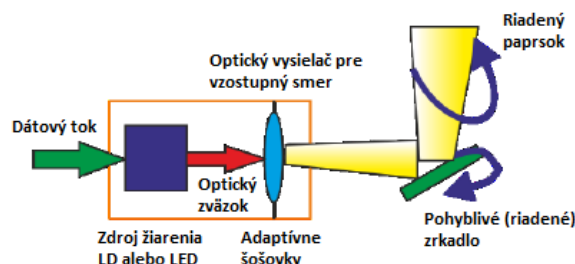
Pre zostupný smer boli využité konce optických vlákien ako vysielajúča s prídavnou adaptívnou optickou technikou. Tu bola testovaná miestnosť je rozdelená na 20 buniek, kde každá z buniek mala veľkosť 2×2 metre. Pre získanie mobility je nutné využiť adaptívnu optiku v podobe šošoviek a zrkadiel. Vďaka vytvoreniu bunkovej sústavy a rovnakých vysieláčov je vykrytie všetkých buniek rovnomerné ako aj šírka zväzku. Výstup z jednovidových optických vlákien využitých ako vysieláč možno aproximovať Gaussovým profilom. Pre zostupný smer bola zvolená vlnová dĺžka 1550 nm pomocou DFB (*Distributed*

Feedback Laser) laserového zdroja žiarení, kde schematické usporiadanie je na obrázku 9.5 [23][37].



Obrázok 9.5: Jednoduchý návrh štruktúry vysielča pre systém v zostupnom smere

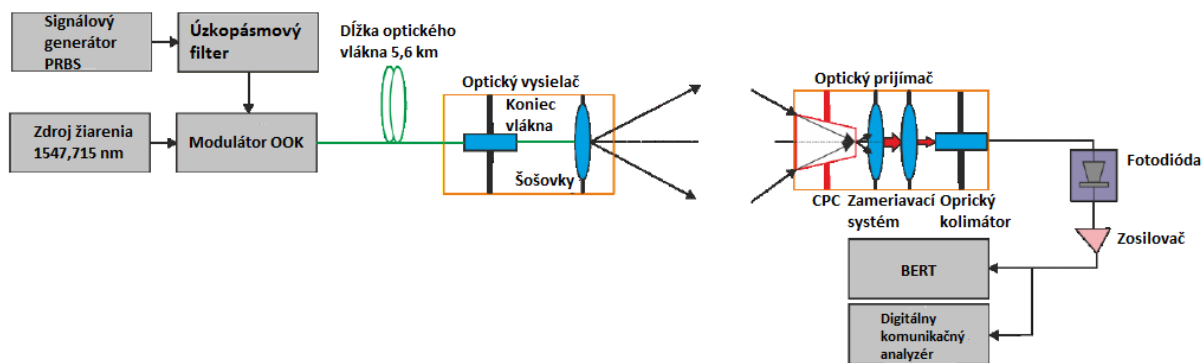
U vzostupného smeru použil autorský kolektív simuláciu, pretože tento smer je ďaleko zložitejší ako smer zostupný. Ako aj pri zostupnom smere, tak aj u vzostupného bola využitá adaptívna optika v podobe zrkadiel a šošoviek, ako je vidieť na obrázku 9.6 [23]. K lokalizácii polohy bol využitý WiFi systém, ktorého úlohou bolo smerovať ohniskovú vzdialenosť adaptívnej optiky a smerovať tiež zrkadlá na konce optických vlákien umiestnených na strope. Úlohou koncentrátorov a šošoviek je zvýšenie množstva svetla dopadajúceho do optického vlákna. Vysielač pre vzostupný smer je blízko užívateľom, čo znamená, že vzniká problém s bezpečným vyžarovaným výkonom z dôvodu normy IEC. V simuláciách bola testovaná vlnová dĺžka 1550 nm s výkonom 7 mW pre laserový zdroj žiarenia. Výsledkom týchto simulácií bolo zistenie, že koncepcia systémov pre vzostupný smer môže mať prenosovú rýchlosť až 200 Mb.s⁻¹ s dosiahnutím dostatočnej mobility [37].



Obrázok 9.6: Schéma návrhu vysielča pre vzostupný smer pri simulácii

Ďalej overoval autorský tím svoje predpoklady pomocou experimentálneho merania, pri ktorom boli vyrobené všetky vysielče a prijímače pre vytvorenie optickej bezvláknovej

siete, ako môžeme vidieť na obrázku 9.7 [23]. Optický signál bol generovaný v centrálnej stanici, ktorá vysielala signál do testovacej miestnosti pomocou optickej distribučnej siete. Táto sieť bola simulovaná pomocou 5,6 km dlhého jednovidového vlákna. Svetlo z tohto nakonektorovaného optického vlákna prechádza šošovkami, aby sa zvýšila divergencia zväzku vysielaného do testovanej miestnosti, než dopadne na prijímač tvorený zloženým parabolickým koncentrátorom. Tu sa využíva spojený systém, ktorý sa skladá z niekoľkých šošoviek a optického kolimátora pre smerovanie svetla na fotodiódu s malou citlivou ploškou. Keby bola použitá fotodióda s veľkou plochou citlivosti, bol by systém obmedzený možnou šírkou pásma. V rámci experimentu bola otestovaná rýchlosť 1 Gb.s^{-1} pri OOK modulácií s generovaním (231-1 PRBS - *Pseudorandom Binary Sequence*). Vysielaný výkon bol na úrovni 8,4 dBm pri vzdialenosti 104 cm medzi vysielacom a prijímačom, kde bol použitý zložený parabolický koncentrátor, ktorého veľkosť zorného poľa bola 45° [37][38].



Obrázok 9.7: Experimentálne zapojenie optickej bezvláknovej siete

V ďalšom článku sa rovnaký autorský kolektív zaoberá možnosťou zmeny vysielaného výkonu s ohľadom na šírku vysielaného lúča a chybovosť. Pri týchto zmenách zistili, že pre výkony 3,2 dBm, 5,9 dBm a 8,3 dBm, pre 1, 1,5 a 2 metre šírky optického zväzku je chybovosť na úrovni BER ($<10^{-9}$). Ďalším experimentálnym meraním tiež zistili, že ich systém pracuje maximálne s dva metre širokým optickým zväzkom, čo odpovedá 8 dBm prenášaného výkonu [23][39].

V poslednom článku rovnaký autorský kolektív prináša zvýšenie prenosovej rýchlosti pre daný systém až na rýchlosť $12,5 \text{ Gb.s}^{-1}$. Pri tomto experimente bol použitý vlnový multiplex. Konkrétne sa jednalo o využitie 4 nosných vlnových dĺžok z rozsahu 1550,12 až 1552,52 nm s rozstupom medzi kanálmi 100 GHz (0,8 nm). Dĺžka optické trasy zostala nezmenená, tak isto ako aj typ optického vlákna (jednovidové - Corning SMF-28) tj. 5,6 km. Ďalej tu boli použité impulzné generátory, jeden pre moduláciu (OOK), pričom ďalšie tri vlnové

dĺžky sú modulované inými generátormi. V centrálnej jednotke sú jednotlivé nosné vlnové dĺžky multiplexované pre prenos optickou trasou ku koncu optického vlákna a následne distribuované do priestoru testovanej miestnosti. Na strane prijímača sú jednotlivé nosné vlnové dĺžky pomocou demultiplexera oddelené. Hodnota vysielaného výkonu bola 8,4 dBm [23][40].

9.3 Model stropných vysielачov

V článku od D. Koleva a kolektívu sa popisuje návrh optického bezdrôtového systému pre vnútornú komunikáciu s mriežkou stropných vysielачov, založených na technológii priameho spojovacieho vlákna. Táto navrhovaná sieť je plne kompatibilná so štandardom EPON, ktorý využíva vysielanie bod-viac bodov (point to multipoint) v downstream, a môže zabezpečiť vysokorýchlostné obojsmerné spojenie pre viac mobilných zariadení. Autorský kolektív sa ďalej v tomto článku zaoberá analýzou prenosu pre downlink a uplink, a tiež otázkami z hľadiska bezpečnosti očí [19].

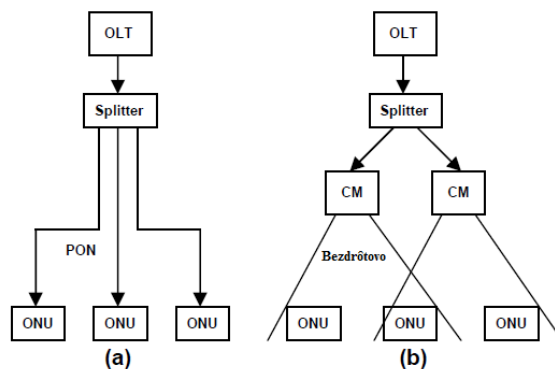
9.3.1 Úvod

D. Kolev a kolektív navrhujú pasívny vnútorný bezdrôtový optický systém pre rozšírenie rozsahu existujúcej EPON siete pre dosah mobilného koncového užívateľa. Snažia sa spojiť funkčnosť štandardu so schopnosťou poskytovať vysokorýchlostné pripojenie k mobilnej sieti do novej generácie siete. Aby toto bolo možné, používajú technológiu priameho spojovacieho vlákna, pretože vysielачe sú jednoduché a lacné – žiadny laserový zdroj a ani fotodióda (PD) nie sú použité. Okrem toho je tento systém transparentný vďaka svojej nezávislosti na vlnovej dĺžke, prenosovej rýchlosti a modulácii, ktoré sa používajú vo zvyšku optickej siete.

Ďalej autorský kolektív navrhuje využitie posilnenej nesmerovej konfigurácie s mriežkou synchronizovaných stropných vysielачov tak, že sa zvyšuje rýchlosť pripojenia a zabezpečuje sa spoľahlivé pripojenie a kompletne pokrytie. Systémy založené na priamom spojení vlákien sa tiež navrhujú, ale nie pre riešenie viacerých užívateľov. Analýza ukazuje, že malé otvory pre mobilné zariadenia majú obrovský vplyv na výkon systému a dané experimentálne údaje nie sú dostatočné pre vybudovanie takého vnútorného optického systému. Tiež ukazujú, že v takom systéme je prítomnosť EDFA zosilňovača neodvratná a ASE šum je kritickým faktorom.

9.3.2 Dizajn systému

Norma EPON 802.3ah sa zaoberá mechanizmami a riadiacimi protokolmi požadovanými k zriadeniu P2MP topológie do Ethernet rámca. P2MP médium je pasívna optická sieť (PON). Ak je PON v kombinácii s protokolom Ethernet, sieť sa označuje ako Ethernetová pasívna optická sieť (EPON). P2MP je asymetrické médium, založené na topológii *strom*. Typická EPON sieť je znázornená na obrázku 9.8a. V downstream signál z optického linkového terminálu (OLT) prechádza rozdeľovačom (splitter) a dosiahne všetky optické sieťové jednotky (ONU). V smere upstream signál z ONU dosiahne OLT a žiadnu inú ONU (viď obrázok 9.8b). Keď downstream signál prechádza rozdeľovačom, ale namiesto toho, aby išiel priamo do ONU, prechádza do stropného modulu (CM), ktorý je pripojený. V CM je vytvorený široký Gaussovský zväzok za účelom pokrytia väčšej plochy v komunikačnej rovine. Spojenie medzi CM a ONU je opticky bezdrôtovo.

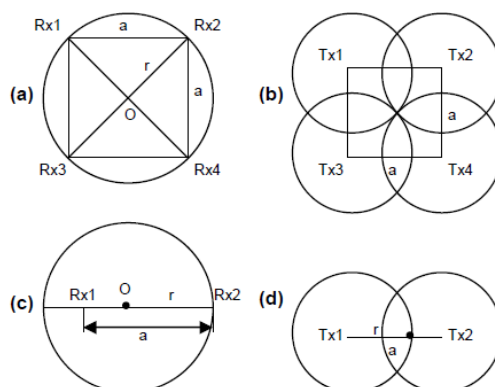


Obrázok 9.8: Porovnanie medzi a) EPON štruktúrou a b) navrhovanou štruktúrou

Na obrázku 9.9a je zobrazený bod uplink lúča na stope, ktorý pokrýva štyri prijímače v rovnakom čase. Tento systém môže byť navrhnutý tak, že otvory týchto prijímačov sú umiestnené okolo pásu lúča. Ak existuje na danom mieste len jeden prijímač, tak sa signály nebudú viac prijímať. Ak sú tam však už spomínané štyri prijímače, tak vzhľadom k rastru bude vzdialenosť medzi stredom zväzku a prijímačmi rovná. Z toho vypláva, že oneskorenie bude rovnaké, a že nebudeme pozorovať žiadne prerušenie signálu. Najväčšie oneskorenie je dosiahnuté vtedy, keď sú v mieste stopy lúča umiestnené len dva prijímače s rozdielnou vzdialenosťou k stredu danej stopy. Tento prípad je znázornený na obrázku 9.9c. Tu vidíme, že prijímač Rx1 je k stredu vzdialený $a-r$ a Rx2 iba r , kde a je vzdialenosť medzi stredmi dvoch prijímačov a r je polomer lúča. V downlinku máme na komunikačnej rovine stopy lúčov stropných vysieláčov ako je znázornené na obrázku 9.9b. Susedné stopy sa prekrývajú tak, že

medzi nimi nie je k dispozícii žiaden odkrytý priestor. Môžeme teda a vypočítať ako funkciu r :

$$a = \sqrt{2} \times r.$$



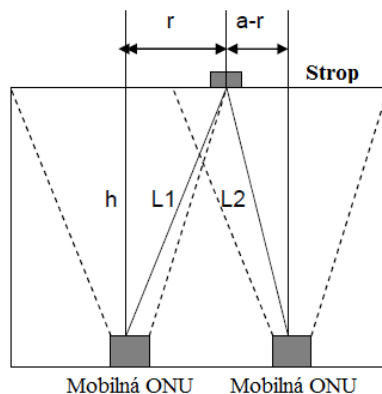
Obrázok 9.9: Bunkové usporiadanie: a) strop; b) komunikačná rovina; c) maximálna vzdialenosť v stropnej mriežke; d) maximálna vzdialenosť v komunikačnej rovine

Vzhľadom k tvaru stopy lúča a typických obdĺžnikových vnútorných priestorov, môžu v týchto priestoroch vzniknúť nepokryté priestory v blízkosti steny alebo tam bude šum prichádzajúci z odrazu od stien. Na obrázku 9.9d vidíme prípad s maximálnym možným oneskorením pri downlinku – vzdialenosti Tx1 a Tx2, respektíve, r a $a-r$ sú rovnaké ako pre uplink. Za predpokladu, že veľkosť stopy lúča je rovnaká aj u uplink aj u downlink a závislá vzdialenosť medzi rovinou komunikácie a stropom môže byť považovaná za konštantnú, dôjdeme k záveru, že maximálne oneskorenia sú rovnaké pre oba spôsoby komunikácie.

Vzdialenosti medzi dvoma vysielateľmi a prijímačom L_1 a L_2 (viď. obrázok 9.10) môžu byť vypočítané zo vzťahov 9.1 a 9.2:

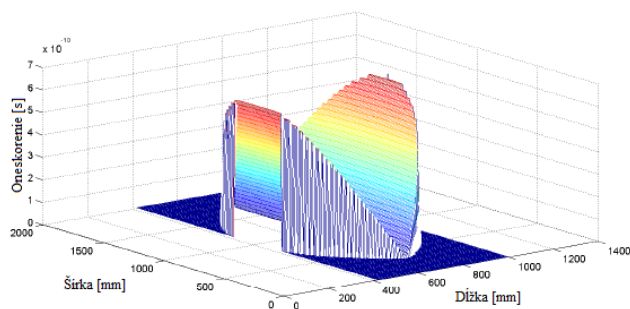
$$L_1 = \sqrt{h^2 + r^2} \quad (9.1)$$

$$L_2 = \sqrt{h^2 + (a - r)^2} = \sqrt{h^2 + r^2(\sqrt{2} - 1)^2} \quad (9.2)$$



Obrázok 9.10: Rôzne komunikačné cesty pre rôzne vysieláče

Ďalej môžeme vypočítať oneskorenie $d=(L_1 - L_2)/c$, kde c je rýchlosť svetla pričom $c=3 \cdot 10^8$ m/s. Pri tejto hodnote a výške miestnosti $h=2$ m a $r=1$ m prijmem maximálne možné oneskorenie $d=0,64$ ns. Kompletné distribučné oneskorenie pre prekrývajúce sa oblasti z vyššie uvedenými parametrami pre prípad na obrázku 9.9 môžeme vidieť na obrázku 9.11.

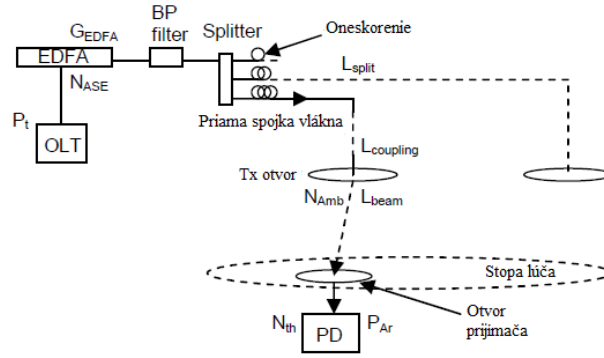


Obrázok 9.11: Distribučné oneskorenie v prekrývajúcich sa oblastiach

Synchronizované vysielanie na downlinku a uplinku s dostatočne širokou stopou lúča zaručuje bezchybnú obojsmernú komunikáciu pre mobilných užívateľov v každom mieste priestoru.

9.3.3 Prijatý výkon a BER analýza

Na obrázku 9.12 je zobrazená schéma navrhovaného systému so šumovými komponentmi, optickým ziskom a vložnými stratami.



Obrázok 9.12: Navrhovaný systém so šumovými komponentmi, optickým ziskom a vložnými stratami

V downlinku je signál prenášaný z OLT s vysielačím optickým výkonom P_t . Prijatý optický výkon vo fotodióde (PD) P_{Ar} môže byť popísaný ako funkcia vysielačieho výkonu P_t , a to vŕahom:

$$P_{Ar} = P_t L_{tot} G_{EDFA}, \quad (9.3)$$

kde G_{EDFA} reprezentuje zisk erbiom dopovaného vlákna zosilňovača (EDFA) a L_{tot} reprezentuje celkové vložné straty v systéme. Ak predpokladáme, že $L_c = 10^{(L_{c,dB}/10)}$, potom:

$$L_{c,dB} = L_{split} + L_{coupling} + L_m, \quad (9.4)$$

kde L_{split} je vložný útlm rozdeľovača (treba oddeliť signál od rôznych stropných vysieláčov) a $L_{coupling}$ je vložný útlm spôsobený technológiou priameho spojovania. Tiež sú tam vložný útlm vlákna a útlm prenosu, ktoré však možno zanedbať vzhľadom k ich malým hodnotám. Pre konkrétne konfigurácie bude L_c konštantná. K dispozícii sú tiež vložné straty komponenty L_{beam} , ktoré predstavujú pomer medzi celkovým výkonom v stope lúča a silou, ktorá vstupuje do otvoru prijímača. L_c sa silne líši v závislosti na veľkosti stopy lúča a veľkosti prijímacieho otvoru. Okrem toho, stopa lúča a veľkosť prijímacieho otvoru v uplinku sa líšia od tých, ktoré sú v downlinku. L_{beam} možno vypočítať ako pomer medzi celkovým vysielačím výkonom v stope lúča P_D s pásom lúča ω , a prijímaného výkonu $P_{Ar,beam}$ v otvore prijímača s priemerom r_2 na vzdialenosti r_1 od stredu stopy:

$$L_{beam} = \frac{P_{Ar,beam}}{P_D} = \left[e^{\frac{-2r_1^2}{\omega^2(z)}} - e^{\frac{-2(r_1+r_2)^2}{\omega^2(z)}} \right] \frac{r_2}{8r_1+4r_2}. \quad (9.5)$$

Celkové straty v navrhovanom systéme budú $L_{tot} = L_c L_{beam}$. Hodnoty, ktoré L_{tot} dosahuje sa pohybujú okolo -60 dB.

Za normálnych okolností je výstupný výkon vysielajúča P_t v rozmedzí (-5dBm ~ 0 dBm) a citlivosť prijímača je v rozmedzí od -30dBm pre 100 Mbps. Preto, aby bolo zaistené spoľahlivé pripojenie je nutné použitie optického zosilňovača so ziskom $G = 30$ dBm. Jednou z najväčších nevýhod optického zosilňovača je však ASE šum, ktorý silne degraduje odstup signálu od šumu SNR.

Prúd v PD z prijímaného optického signálu je:

$$I_S = P_{Ar} \rho_{RX}. \quad (9.6)$$

U uplinku aj downlinku používame jednoduchý zložený parabolický koncentrátor so širokým FOV. Odstup signálu od šumu (SRN) počítame podľa vzorca:

$$SRN = \frac{(P_{Ar} \rho_{RX})^2}{\langle i_N^2 \rangle}, \quad (9.7)$$

kde $\langle i_N^2 \rangle$ je stredná kvadratická hodnota optického šumu prúdu. Optický šum sa v navrhovanom systéme bude skladať z niekoľkých komponentov. Vo vlákne medzi OLT a CM je dominantný ASE šum z EDFA. To významne znižuje SNR a obmedzuje výkon systému. ASE výkon je:

$$P_{ASE} = m_t n_{sp} h\nu \Delta\nu_f. \quad (9.8)$$

Pri výpočtoch šumu sa používa faktor $m_t = 2$, pretože v zosilňovači sa môžu šíriť dve kolmé optické polarizácie. n_{sp} je miera úplnosti inverzie populácie pre zosilňovač a môže byť vypočítaná ako $n_{sp} = N_2 / (N_2 - N_1)$, kde N_1 a N_2 sú populácie nižších a vyšších laserových úrovní. $h\nu$ je energia fotónu a $\Delta\nu_f$ je šírka pásma filtra typu pásmová priepusť, ktorý nasleduje po EDFA a znižuje prínos ASE k šumu. Zodpovedajúci ASE prúd je:

$$I_{ASE} = \rho_{RX} P_{ASE}. \quad (9.9)$$

P_{ASE} sa na výstupe filtra pásmová priepusť bude v porovnaní s faktorom L_{tot} líšiť kvôli kanálovým stratám, ktoré sa vzťahujú nielen k optickému signálu, ale aj k optickému šumu v linke. Šum rastie kvôli pulzom spôsobenými ASE spolu s optickým signálom a stredná kvadratická hodnota tohto šumového prúdu je:

$$\langle i_{ase}^2 \rangle = 4G_{EDFA} I_S G_{EDFA} I_{ASE} \frac{B}{\Delta\nu_f}, \quad (9.10)$$

kde B je pracovná prenosová rýchlosť.

V bezdrôtovej optickej časti je dominantný indukovaný šum tvorený svetelnými zdrojmi. Ten je možné vypočítať:

$$\langle i_{bn}^2 \rangle = 2e\rho_{RX}P_{bn}B, \quad (9.11)$$

kde P_{bn} je prijatý svetelný výkon a e je elementárny náboj. Tepelný šum v transimpedančnom zosilňovači (TIA) v náväznosti na p-i-n PD je dominantnou šumovou zložkou na prijímacej strane. Jeho stredná kvadratická hodnota sa dá vypočítať podľa vzorca:

$$\langle i_{th}^2 \rangle = \frac{4kTB}{R_{in}}, \quad (9.12)$$

kde k je Boltzmanova konštanta, T je absolútna teplota a R_{in} je spätnoväzobný rezistor.

Konečnú rovnicu pre SRN v prijímači pri downlinku môžeme napísať ako:

$$SRN_d = \frac{(P_{Ar}\rho_{RX})^2}{\langle i_{ase}^2 \rangle + \langle i_{bn}^2 \rangle + \langle i_{th}^2 \rangle} = \frac{(P_{t,d} L_{tot} G_{EDFA} \rho_{RX})^2}{4G_{EDFA} I_s G_{EDFA} I_{ASE} \frac{B}{\Delta\nu_f} L_{tot} + 2e\rho_{RX} P_{bn,d} B + \frac{4kTB}{R_{in}}}. \quad (9.13)$$

Pri uplinku bude prijatý výkon vyšší vzhľadom k väčšiemu otvoru stropného prijímača a vyššiemu vysielaciemu optickému výkonu. Avšak niektoré šumové komponenty sa budú líšiť. Tepelný šum však zostane konštantný. EDFA vedľa OLT bude slúžiť ako predzosilňovač. Preto sa ASE šumový výkon neznižuje v závislosti od útlmu ako je to pri downlinku. Okolité šum má menšie hodnoty v uplinku v dôsledku absencie priameho stropného svetla dopadajúceho na prijímacie otvory, avšak bude zosilnený v EDFA. Výsledný výraz pre SRN v uplinku bude teda:

$$SRN_u = \frac{(P_{Ar}\rho_{RX})^2}{\langle i_{ase}^2 \rangle + \langle i_{bn}^2 \rangle + \langle i_{th}^2 \rangle} = \frac{(P_{t,u} L_{tot} G_{EDFA} \rho_{RX})^2}{4G_{EDFA} I_s G_{EDFA} I_{ASE} \frac{B}{\Delta\nu_f} + 2e\rho_{RX} P_{bn,u} B + \frac{4kTB}{R_{in}}}. \quad (9.14)$$

Bitovú chybovosť (BER) môžeme teda zapísať ako:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{SRN}{2}} \right) \quad (9.15)$$

9.3.4 Bezpečnosť oka

Vzhľadom k tomu, že tento navrhovaný systém bude pracovať v úzkom kontakte s užívateľom je dôležité, aby bola zaistená bezpečnosť týchto užívateľov. Teda sú väčšie nároky na bezpečnosť očí a taktiež bezpečnosť kože. K bezpečnosti očí sa vzťahujú dva dôležité parametre, a to: maximálny prípustný expozičný limit (MPE) a prístupný emisný limit (AEL). MPE popisuje maximálny výkon, ktorým môže byť povrch vystavený. Zvyčajne sa meria v Wm^{-2} alebo Jm^{-2} . Keď vezmeme do úvahy očný povrch A_r pre danú vlnovú dĺžku, ktorá prijíma laserové žiarenie, môžeme definovať maximálny bezpečný vyžarovaný výkon ako:

$$AEL = MPE \times A_r. \quad (9.16)$$

Medzi najdôležitejšie vlastnosti systému patria expozičný čas a vlnová dĺžka. Navrhnutý systém je kompatibilný so štandardom EPON, čo znamená, že vlnová dĺžka je u downlinku 1490nm a u uplinku je to 1310 nm. Pre expozičnú dobu budeme voliť čo najdlhší čas (napr. 30000s (8 hodín)). Používame široký lúč, čo znamená, že nie celá vysielacia energia bude okom absorbovaná. Maximálny prijatý výkon P_{eye} v oku bude vtedy, ak stred lúča uvedieme priamo do stredu oka, a je možné ho vypočítať z:

$$P_{Eye}(z) = P_T \left(1 - e^{\frac{-2R_r^2}{\omega^2(z)}} \right) \leq AEL_N . \quad (9.17)$$

kde P_T je celkový vysielací výkon, R_r je polomer oka a $\omega(z) = z \tan \Phi$. Ak $P_{Eye} = AEL_N$, potom:

$$P_T = \frac{AEL_N}{\frac{-2R_r^2}{1 - e^{\omega^2(z)}}} . \quad (9.18)$$

Vlnové dĺžky pre uplink a downlink sú v rôznych skupinách s ohľadom na ich vplyv na ľudské oko. Z tohto dôvodu je nutné vypočítať možné úrovne AEL pre oba z nich, a brať tieto hodnoty do úvahy, keď sa počíta výkon systému.

Ako už bolo spomenuté vyššie, vlnová dĺžka v downlinku je 1490nm. Z MPE tabuľky môžeme zistiť MPE pre tento systém – 1000 Wm^{-2} . Priemer otvoru pre očné žiarenie je 3,5 mm. Ak budeme predpokladať, že priemer vysielача je 5 cm a oko je prilahlé k prenosovému povrchu, tak potom možno vypočítať z rovnice 17, že $P_T > 1\text{W}$ by ľudské oko poškodilo. V downlinku však musíme vziať do úvahy, že snímač je namontovaný na strop a zvyčajne nie je možné, aby boli oči priliehajúce k vysielacej ploche. Väčšinou je vzdialenosť medzi okom a vysielacím otvorom väčšia ako desať cm. Preto, ak je to nutné, môžeme zaviesť nominálnu zónu nebezpečenstva (NHZ), v ktorej síce nie sú splnené bezpečnostné očné predpisy, ale je nepravdepodobné, že za normálnych podmienok dôjde k expozícii očí. To znamená, že vysielací výkon môže byť v prípade potreby zvýšený.

V uplinku sa používa vlnová dĺžka 1330nm, ktorá má vážnejší dopad na ľudské oči. Okrem toho, NHZ zónu nemožno zaviesť, pretože medzi mobilným zariadením a ľudskými očami je úzky kontakt a je vysoká pravdepodobnosť zasiahnutia ľudského oka laserovým žiarením. Z MPE tabuliek môžeme zistiť rovnicu:

$$MPE = 18C_4C_6C_7T_2^{-0,25} , \quad (9.19)$$

Optické bezvláknové siete s využitím optického vlákna ako vysielajúča

kde $C_4 = 10^{0,002(\lambda-700)}$, $C_6 = \alpha_{max}/\alpha_{min}$ pre rozšírené zdroje a $\alpha > \alpha_{max}$, $C_7 = 8$ pre λ v rozsahu 1200nm ~ 1400nm. Priemer otvoru pre očné žiarenie je $d = 7$ mm. Z rovnice 18 môžeme vypočítať MPE tak, že $MPE_{1310} = 4,8 \text{mW/mm}^2$. Po dosadení do rovnice 15 dostávame $AEL_{1310} = 185,4 \text{mW}$.

Pre zaistenie bezpečnosti systému sa dôrazne odporúča, aby používatelia obmedzili výstupný výkon v stropnom otvore na AEL limity podľa normy – 10 mW.

10 LightTools

LightTools [47] je vyvinutý skupinou Synopsys' Optical Solutions Group, a je to komerčný 3D optický inžiniersky a dizajnový softvérový produkt pre navrhovanie a analýzu osvetlenia. Podporuje virtuálne prototypy, simulácie, optimalizácie a fotorealistické znázornenie osvetlenia aplikácií.

- **Design prostredia**

LightTools zaisťuje 3D objemové modelovanie prostredia pre tvorbu modelov s funkciami pre navrhovanie osvetlenia a techniky, vrátane rozšírenej numerickej presnosti, nástoja ray tracing a optimalizačného nástoja určeného k zlepšeniu výkonu osvetlenia systému na základe výkonnostných kritérií zadaných užívateľom.

LightTools predstavuje rôzne optické jednotky ako sú zdroje, prijímače, reflektory a difúzory v rovnakom prevedení ako sú v skutočnej mechanickej konštrukcii. Modelové komponenty sú definované z parametrických vzorcov, ktoré udržiavajú tvar povrchu a pozíciu daného modelu. Polarizácia, rozptyl mimo povrch a do materiálov, povrchové reflexie a refrakcie a výkon farebných filtrov sú príkladmi svetelných efektov, ktoré môžu byť zahrnuté v analýze systému.

LightTools obsahuje knižnice sklenených a plastových materiálov, plôch povrchovej úpravy, svetelných zdrojov a tenkých materiálov od výrobcov, a tiež katalóg šošoviek.

- **Schopnosť „ray tracing“**

LightTools používa nesequenčnú techniku paprskových trás Monte Carlo pre simuláciu vplyvu optických a mechanických prvkov na geometrické šírenia svetla pomocou optického systému. Ray trace určuje osvetlenie a rozloženie intenzity na rôznych povrchoch prijímača z jedného alebo viacerých zdrojov. LightTools tiež podporuje postupné sledovanie lúča v zobrazovacích cestách.

- **Výstup analýzy**

Analýza výstupu LightTools zahŕňa intenzitu, uhlový a priestorový jas a osvetlenosť grafov. Kolorimetrický výkon možno vizualizovať pomocou skutočných farebných plôch.

Fotorealistická schopnosť „renderovania“ zahŕňa možnosť demonštrovania svetelných efektov pomocou svetelných zdrojov obsiahnutých v modely.

- **Optimalizácia osvetľovacieho systému**

LightTools zahŕňa schopnosť optimalizácie navrhutej tak, aby sa automaticky zlepšil výkon osvetľovacieho systému založeného na výkonnostných kritériách zadaných užívateľom. Užívateľia si môžu zvoliť systémové parametre ako premenné, tak aby boli dosiahnuté žiadané parametre ako napríklad jas alebo intenzita osvetlenia.

- **Rozhranie pre programovanie aplikácií**

LightTools poskytuje rozhranie pre programovanie aplikácií (API), ktoré umožňuje užívateľom vytvárať makrá pre automatizáciu úloh, program alebo interakciu s iným softvérom. LightTools API používa štandardné Component Object Model Microsoft Windows (COM) rozhranie. To umožňuje užívateľom vytvárať makrá pomocou aplikácie, ako je Visual Basic (VB), aplikácie Microsoft Office, C ++, Matlab alebo inej aplikácie, ktorá podporuje Windows architektúru COM.

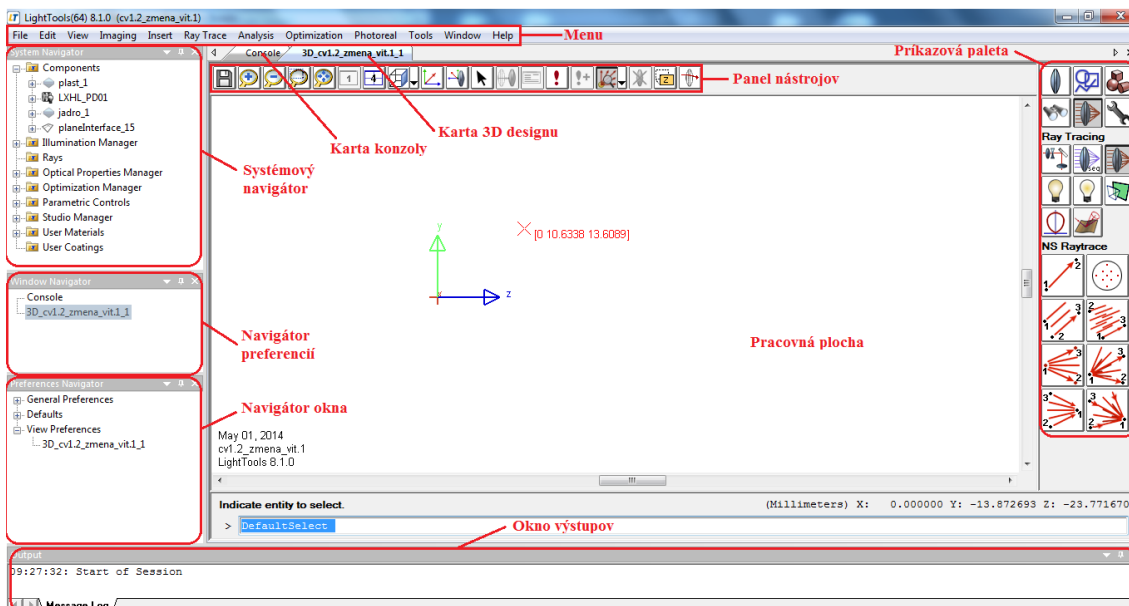
- **Výmena**

Import a export medzi LightTools a inými CAD programami je podporovaný vo formátoch STEP, SAT, IGES, CATIA V4 a V5, Parasolid a DXF. LightTools SolidWorks Link Module poskytuje parametrickú interoperabilitu medzi LightTools a SolidWorks .

10.1 Nastavenie LightTools

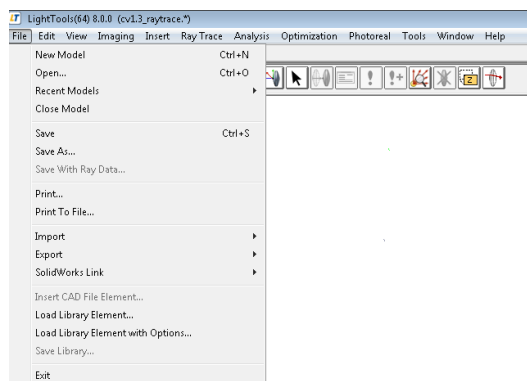
10.1.1 Vytvorenie nového modelu

Obrazovka po zapnutí programu LightTools je znázornená na obrázku 10.1.



Obrázok 10.1: Pracovné prostredie LightTools

V ľavej časti hlavnej lišty vyberieme kartu „File“, v ktorej zvolíme voľbu „New model“. Otvorí sa nám nové okno (obrázok 10.2), v ktorom môžeme vytvárať našu simuláciu.



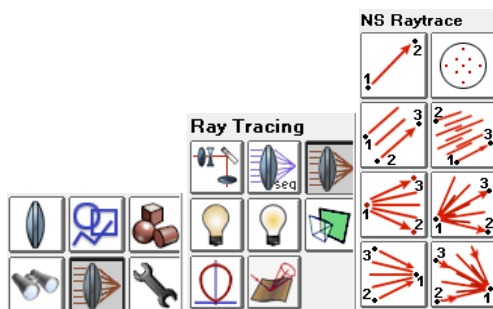
Obrázok 10.2: Vytvorenie nového modelu

V ďalšom kroku vyberieme tlačidlo z palety príkazov. Tu sa nachádza rad tlačidiel, pri ktorých sa naša simulácia začína. Zo začiatku môžeme vidieť len dva rady tlačidiel (obrázok 10.3), ktoré odpovedajú tlačidlám na najvyššej úrovni. Tie však môžeme ďalej rozkliknúť

a použiť ich jednotlivé súčasti (obrázok 10.4). Napr. RayTracing => NS Raytrace => ponuka rôzne šíriacich sa lúčov.






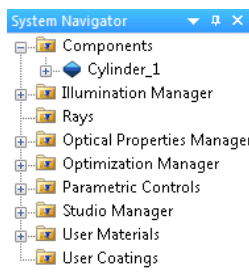
Obrázok 10.3: Príkazová paleta



Obrázok 10.4: Nižšie úrovne príkazovej palety

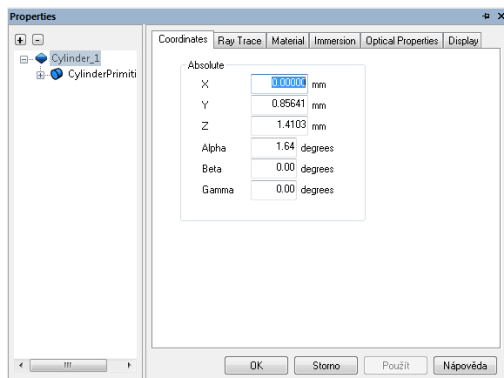
10.1.2 Vytvorenie optického vlákna

Pre vytvorenie vlákna použijeme tlačidlo „Elements“  z príkazovej palety. Z nižšej úrovne „Elements“ vyberiem tlačidlo „3D objects“ . Z ponuky 3D objektov vyberieme „Cylinder“ , teda valec. Po tom ako sme tak urobili umiestnime kurzor myši na požadované miesto do pracovného okna, kde chceme daný objekt vytvoriť. Prvým kliknutím myši určíme stred objektu (v našom prípade valca), druhým určíme jeho priemer a posledným dĺžku valca. Po uskutočnení týchto krokov sa nám v časti „System Navigator“ zobrazí nový vytvorený objekt („Cylinder_1“) (obrázok 10.5).



Obrázok 10.5: Vytvorený objekt

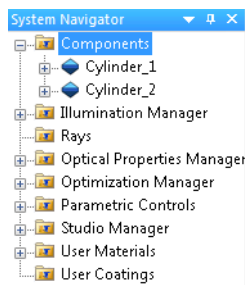
Po rozkliknutí objektu v okne „System Navigator“, sa nám otvorí okno, ktoré môžeme vidieť na obrázku 10.6. V tomto okne môžeme nastavovať jednotlivé parametre tohto objektu, ako je poloha, materiál z akého bude daný objekt vyrobený a ďalej jeho optické vlastnosti.



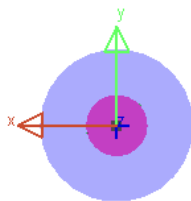
Obrázok 10.6: Okno s vlastnosťami objektu

Objekt umiestnime do polohy [0 0 0] v sústave súradníc, priemer plášťa nastavíme na hodnotu 0,125 mm.

Obdobným spôsobom vytvoríme aj druhý objekt „Cylinder_2“, ktorý bude naša jadro optického vlákna (obrázok 10.7). To taktiež umiestnime do polohy [0 0 0] v sústave súradníc, priemer nastavíme na hodnotu 0,05 mm. Poloha plášťa (Cylinder_1) a jadra (Cylinder_2) je zobrazená na obrázku 10.8.

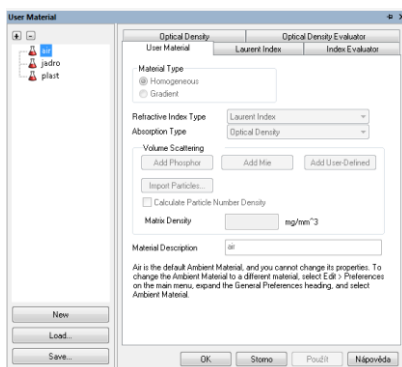


Obrázok 10.7: Vytvorený druhý objekt (Cylinder_2)

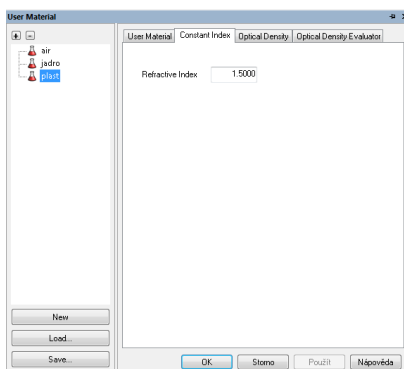


Obrázok 10.8: Poloha jadra a plášťa

Ďalším krokom je vytvorenie si vlastných materiálov, ktoré pridelíme nášmu vytvorenému objektu. V tomto prípade vytvárame dva druhy materiálov (jadro, plášť), pričom ich zobrazenie vidíme na obrázku 10.9. Toto vytvorenie opäť uskutočnime v okne „System Navigator“, kde vyberieme kartu „User Materials“. Zobrazí sa nám okno, v ktorom si daný materiál vytvoríme. V okne zvolíme „New“, a daný materiál pomenujeme. Na karte „Constant index“ zvolíme index lomu materiálu (jadro=1,46; plášť=1,5) (obrázok 10.10).

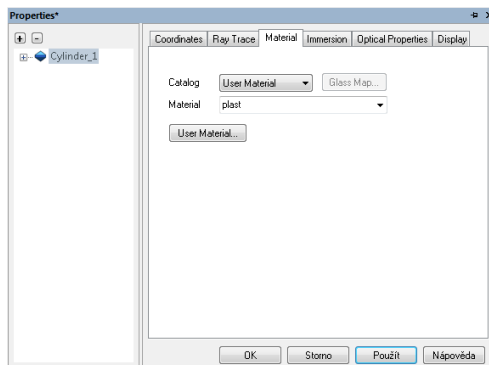


Obrázok 10.9: Vytvorenie vlastných druhov materiálu










Obrázok 10.10: Nastavenie indexu lomu materiálu

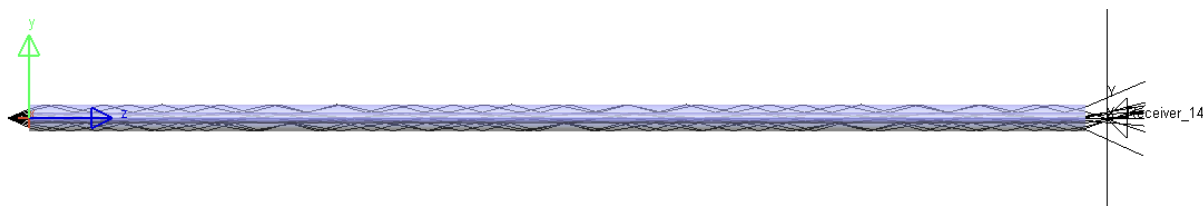
Takto vytvorený materiál môžeme priradiť nami vytvorenému objektu „Cylinder_1“. Vo vlastnostiach objektu zvolíme kartu „Material“, čo vidíme na obrázku 10.11, kde z ponuky vyberieme „User Material“ a vyberieme „plast“.



Obrázok 10.11: Pridelenie materiálu pre objekt

V poslednom kroku pridáme do nášho okna s vytvoreným optickým vláknom plochu, na ktorú umiestnime prijímač, ktorý bude zachytávať jednotlivé optické lúče. To uskutočníme tak, že z palety príkazov vyberieme tlačidlo „Elements“ , z nižšej úrovne tlačidiel „Dummy Surface“ . Túto plochu následne umiestnime blízko optického vlákna. Pridanie prijímača prebehne nasledovne. Z palety príkazov vyberieme „RayTracing“ , následne z nižšej úrovne „Receivers“ , kde z ponuky vyberieme hneď prvý prijímač () , ktorý umiestnime na vytvorenú plochu z predchádzajúceho kroku.

Po tomto vytvorení prijímača, môžeme do vlákna naviazať optické lúče. Z palety príkazov vyberieme „RayTracing“ , „NS Raytrace“ , vyberieme akým spôsobom sa majú lúče šíriť, klikneme na pracovnú plochu na miesto odkiaľ chceme aby sa lúče šírili a môžeme sledovať ich šírenie (vid'. obrázok 10.12).



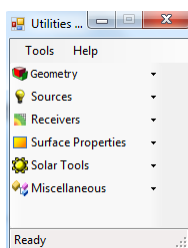
Obrázok 10.12: Šírenie optických lúčov

Obdobne postupujeme aj pri vytváraní jadra optického vlákna. Pri vytváraní väčšieho počtu vlákien postupujeme rovnako ako v predchádzajúcich krokoch, akurát meníme pozície jednotlivých vlákien.

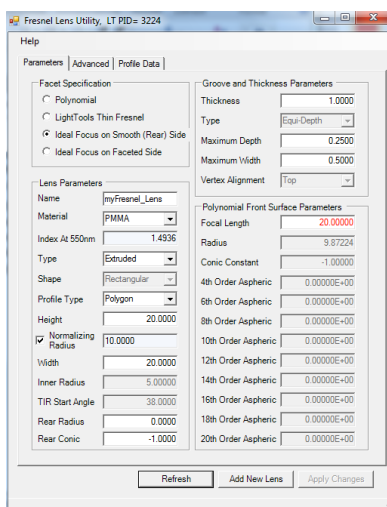
10.1.3 Vloženie šošoviek

Do modelu, ktorý bol použitý pre simuláciu rovnomerného rozloženia výkonu bolo treba vložiť aj dva druhy šošoviek. Prvým druhom bola šošovka Fresnelova, ktorá plnila úlohu spojnej šošovky. Druhým druhom bola klasická rozptylná šošovka.

V Menu vyberieme kartu „Tools“, kde z ponuky vyberiem „Utility Library“, pričom nám vyskočí okno s ponukou, ktoré je zobrazené na obrázku 10.13. V tomto okne zvolíme možnosť „Geometry“, následne „Fresnel Lens“. Po zobrazení okna (obrázok 10.14) nastavíme nami požadované parametre Fresnelovej šošovky, ako sú napr. priemer, ohnisková vzdialenosť, a dáme je navrhnuť „Make Lens“. Po tom sa nám šošovka objaví na pracovnej ploche a môžeme s ňou ďalej pracovať.



Obrázok 10.13: Ponuka „Utility Library“

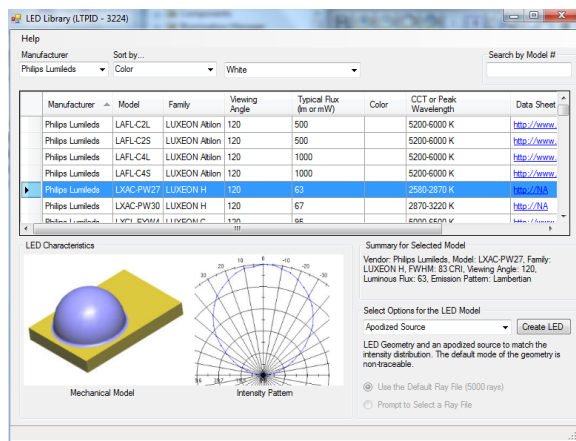


Obrázok 10.14: Okno nastavovania parametrov šošovky

Obdobne ako sme postupovali pri vytváraní Fresnelovej šošovky postupujeme aj pri vytváraní šošovky klasickej, len s tým rozdielom, že v ponuke „Geometry“ zvolíme možnosť „Lens Library“. V tejto ponuke si zvolíme typ šošovky s požadovanými parametrami a opäť ju dáme vytvoriť.

10.1.4 Vloženie zdroja a spustenie simulácie

Posledným krokom pred spustením simulácie je vloženie zdroja žiarenia. Ten vložíme výberom z ponuky „Menu“, karty „Tools“, kde vyberieme možnosť „LED Library“. Vyskočí nám okno (obrázok 10.15), v ktorom si môžeme vybrať rôzne druhy LED diód podľa vlastných či požadovaných parametrov. LED diódy môžeme vybrať buď podľa výrobcu, farby či vlnových dĺžok, na ktorých pracujú. Po vybratí LED diódy potvrdíme jej vytvorenie „Create LED“.

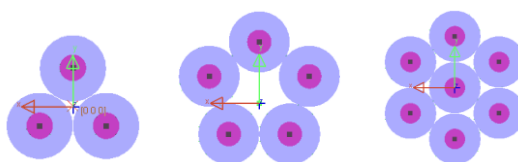


Obrázok 10.15: Okno výberu LED diód

Po tom ako sme vložili LED diódu môžeme prejsť k poslednému kroku a tým je spustenie simulácie. To uskutočníme výberom karty „Ray Trace“ z ponuky Menu. Tu vyberieme možnosť „Begin All Simulation“, čím spustíme celú simuláciu. Po prebehnutí simulácie môžeme z karty „Analysis“ vybrať jednotlivé druhy parametrov a zobrazení, ktoré chceme sledovať.

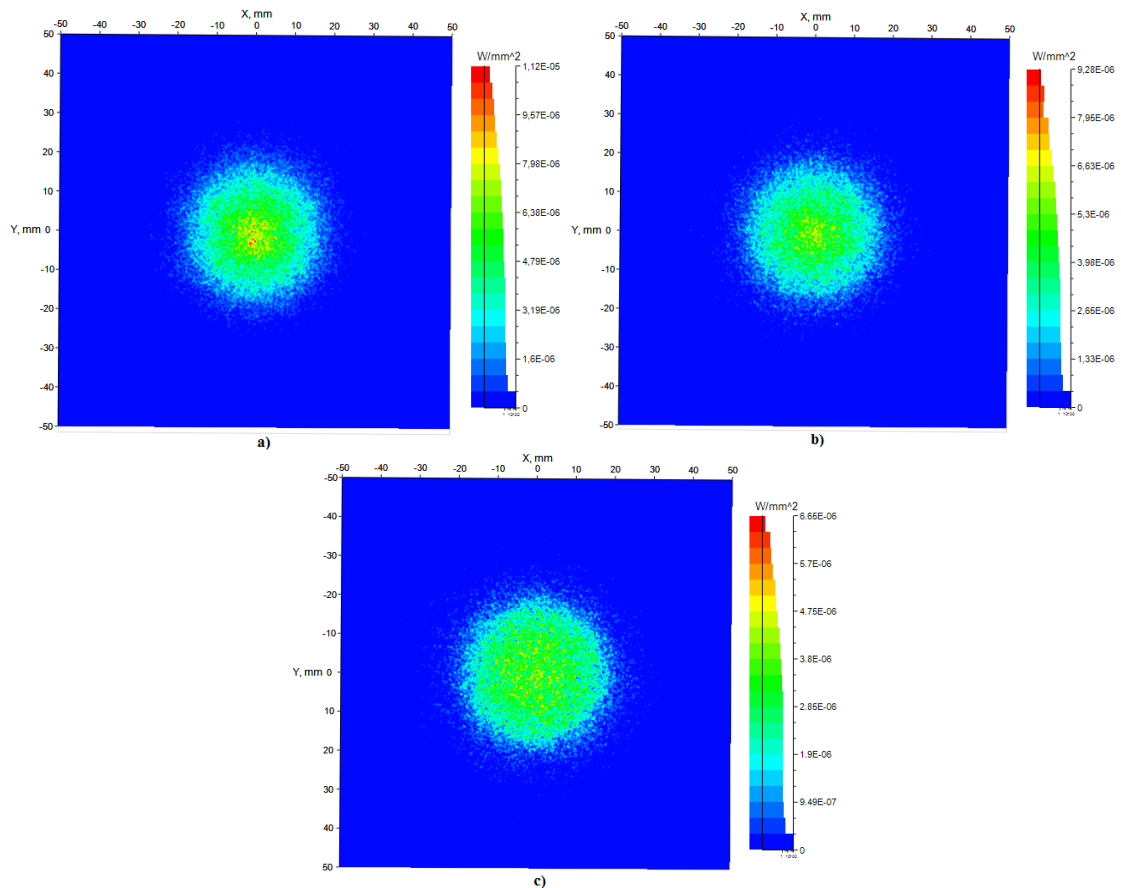
11 Simulácie

Táto kapitola sa zaoberá simuláciami, v ktorých bol navrhnutý nový model optického vysielača v optickej bezvláknovej sieti pomocou zväzku vláken. V porovnaní s modelmi vysielačov tvorených jedným optickým vláknom, ktoré sú popísane v kapitole 9, tento model obsahoval vláken viac. Konkrétne boli použité zväzky troch, piatich a siedmich vláken, pri ktorých sme sa snažili dosiahnuť čo najrovnomernejšieho rozloženia optického výkonu v priestore. Tieto simulácie boli uskutočnené pre dva druhy multimódových vláken, a to pre MM 50/125 μm a MM 62,5/125 μm . Na obrázku 11.1 môžeme vidieť jednotlivé zväzky vláken, ktoré boli použité.



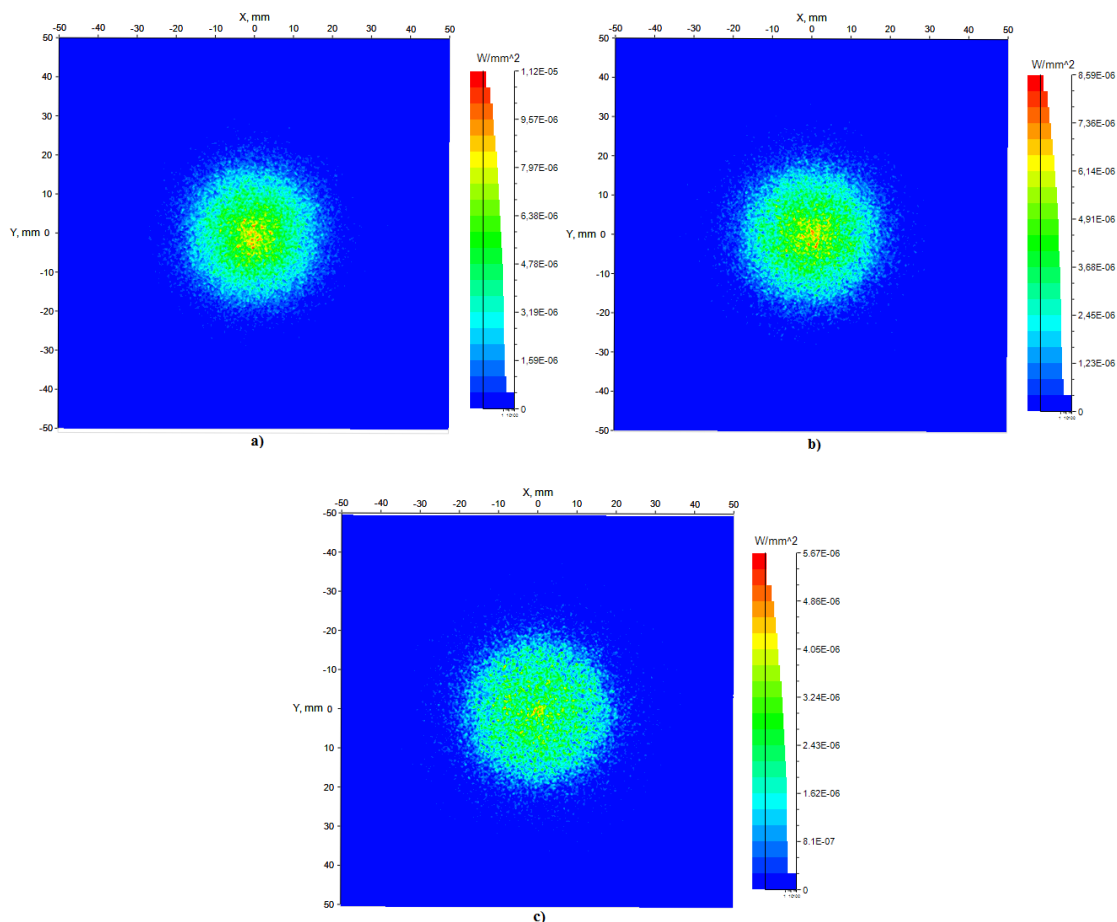
Obrázok 11.1: Zväzky vláken použité v simulácii

Pri porovnaní jednotlivých rozložení optického výkonu (viď. obrázok 11.2 a obrázok 11.3) u oboch druhov MM vláken som dospel k záveru, že najrovnomernejšie rozloženie výkonu je možné dosiahnuť pri použití zväzku siedmich vláken, preto sa ním budem ďalej v tejto práci zaoberať podrobnejšie. Ako bude vidieť z obrázkov, stopa svetla zachytená na detektore bude rovnomernejšia a lepšie rozložená, čo mi umožní meniť aj ďalšie parametre s cieľom dosiahnutia najrovnomernejšieho rozloženia výkonu. Budem meniť vychýlenia jednotlivých vláken a tiež aj numerickú apertúru.



Obrázok 11.2: Rozloženie optického výkonu u vlákna MM 50/125 μm – a) 7 vláken; b) 5 vláken; c) 3 vlákna

Ako môžeme z obrázka 11.2a vidieť, optický výkon vo vláknach MM 50/125 μm nie je ideálne rozložený lebo v strede stopy sa nachádza veľa výkonových maxím (červené body uprostred stôp). Rovnako je to aj v obrázkoch 11.2b a 11.2c. Toto rozloženie naznačuje, že vlákna môžeme od seba vychýliť (obrázok 11.6), čo umožní dané výkonové maximum lepšie rozložiť. Hodnota maximálneho výkonu je u zväzku 7 vláken MM 50/125 μm 1,12E-05 W/mm^2 , u zväzku 5 vláken hodnota výkonu klesla na hodnotu 9,28E-06 W/mm^2 a hodnota u zväzku 3 vláken je 5,55E-05 W/mm^2 .



Obrázok 11.3: Rozloženie optického výkonu u vlákna MM 62,5/125 μm – a) 7 vláken; b) 5 vláken; c) 3 vlákna

Rovnaká situácia ako u obrázka 11.2 nastáva aj u obrázka 11.3 pri vláknoch MM 62,5/125 μm . Tu optický výkon nie je taktiež rovnomerne rozložený, a tiež sa tu vyskytujú výkonové maximá (červené body uprostred stôp). Taktiež môžeme dané vlákna od seba vychýliť (obrázok 11.6), a tým dosiahnuť rovnomernejšieho rozloženia.

Pri porovnaní rozloženia optického výkonu u MM vláken 50/125 μm a 62,5/125 μm môžeme vidieť, že u vláken s priemerom jadra 50 μm aj 62,5 μm majú výkonové maxima vysokú hodnotu, čo nám umožňuje ich vychýľovanie. Hodnota maximálneho výkonu je u zväzku 7 vláken MM 62,5/125 μm 1,12E-05 W/mm², u zväzku 5 vláken hodnota výkonu klesla na hodnotu 8,59E-06 W/mm² a hodnota u zväzku 3 vláken je 5,67E-06 W/mm².

V ďalších častiach kapitoly 11 sa táto práca bude venovať detailnejšie optickému vysielaču, ktorý je tvorený zväzkom 7 optických vláken, pretože tento počet sa z hľadiska optimálneho rozloženia optického výkonu javí ako najlepší.

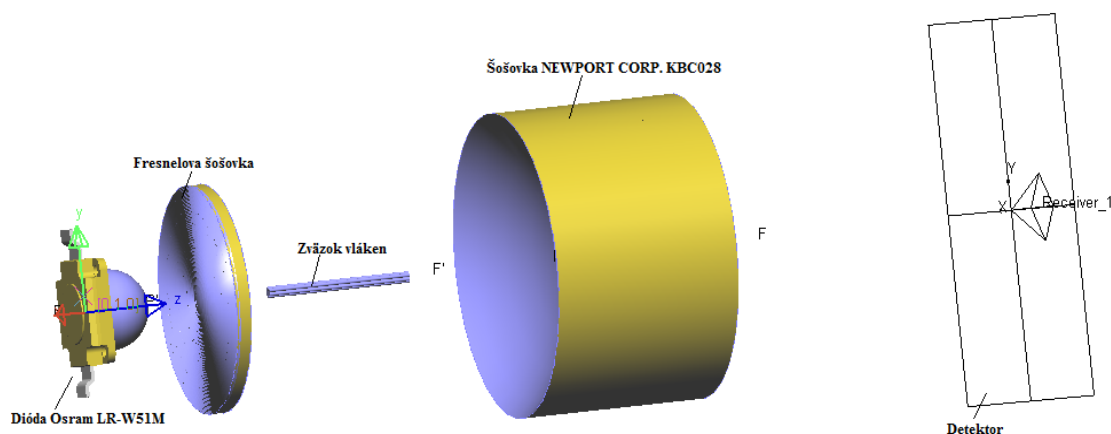
Popis parametrov, obrázkov rozloženia výkonu a ďalším popisom u zväzku s tromi optickými vláknami bude obsahom prílohy A (Príloha A). Ten istý popis u zväzku s piatimi optickými vláknami bude zahrnutý v prílohe B (Príloha B).

Pre ukážku uvádzam v prílohe C (Príloha C) optický vysielač tvorený plastovým optickým vláknom, ktorého priemer jadra je 980 μm a priemer plášťa 1000 μm .

11.1 Vysielač tvorený zväzkom 7 optických vláken

Ako bolo spomenuté vyššie, optický vysielač tvorený zväzkom siedmich optických vláken sa v porovnaní so zväzkami troch a piatich vláken javil ako najlepšia možnosť, pri ktorej sme schopní dosiahnuť najrovnomernejšieho rozloženia optického výkonu v priestore.

Na obrázku 11.4 môžeme vidieť model daného vysielača, na ktorom sme uskutočňovali dané simulácie.



Obrázok 11.4: Model vysielača tvoreného zväzkom 7 vláken

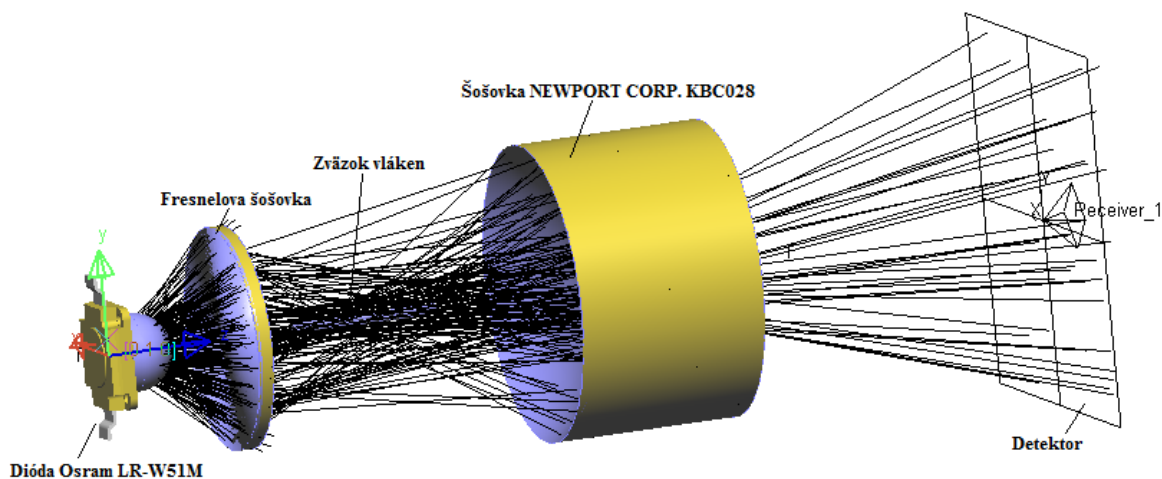
Parametre jednotlivých komponent modelu sú nasledujúce:

- Typ diódy – Osram LR-W51M, vyžarovací uhol 120°, vlnová dĺžka: 620-632 nm
- Použité vlákno – MM 50/125 μm (pre porovnanie tiež 62,5/125 μm), dĺžka= 10 mm
- Fresnelova šošovka – priemer= 15 mm; hrúbka= 1 mm, materiál= PMMA, ohnisková vzdialenosť= 5 mm

- Šošovka – NEWPORT CORP. KBC028, priemer= 12,7 mm; materiál= BK7, ohnisková vzdialenosť= -12,5 mm

Ako z obrázka 11.4 môžeme vidieť, pre dosiahnutie lepšieho rozloženia optického výkonu bolo ohnisko rozptylnej šošovky NEWPORT CORP. KBC028 umiestnené vo vzdialenosti 2 mm od konca vláken.

Na nasledujúcom obrázku 11.5 je daný model zobrazený v priebehu simulácie pri šírení optických lúčov.



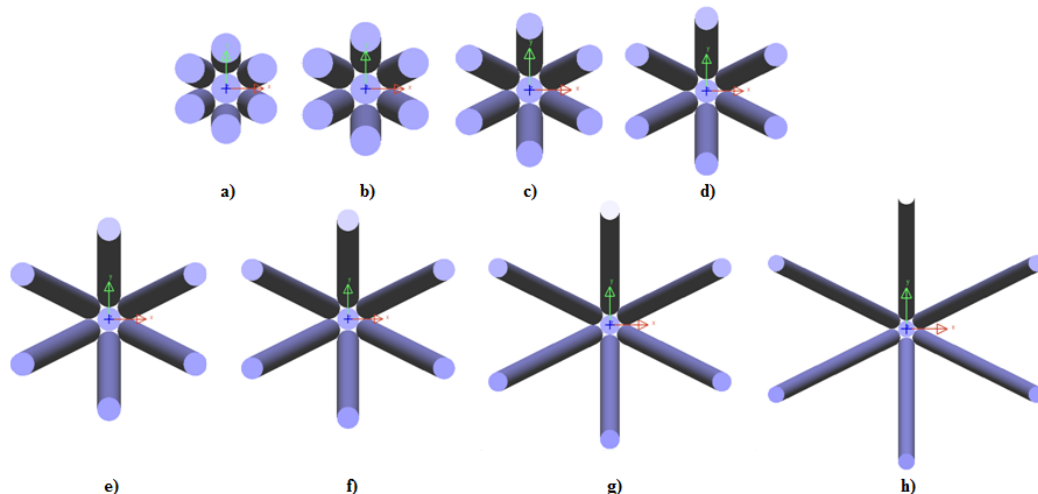
Obrázok 11.5: Šírenie optických lúčov

Ako môžeme z obrázka 11.5 vidieť, Fresnelova šošovka plní úlohu spojnej šošovky, čo znamená, že nám optické lúče spája (fokusuje) tak, aby sa ich čo najviac naviazalo do zväzku optických vláken. Po prechode týmito vláknami sa tieto lúče dostávajú na rozptylnú šošovku (NEWPORT CORP. KBC028), ktorej úlohou je dané lúče rozptýliť na plochu detektora, aby sa vytvorila čo najväčšia stopa. Na detektore je nastavený filter, ktorý prijíma len optické lúče, ktoré prejdú optickými vláknami a ostatné lúče odfiltruje.

11.1.1 Vychýlenie vláken vo zväzku

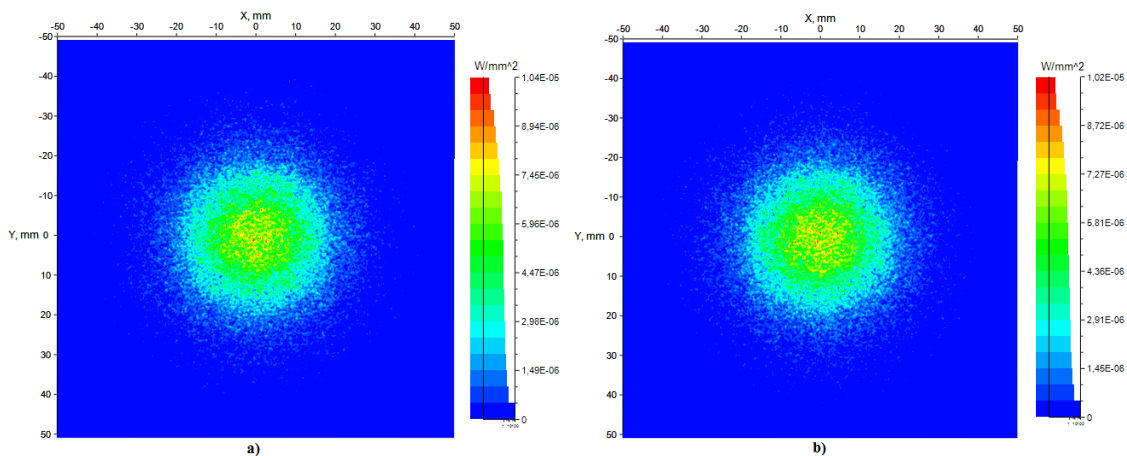
Úlohou tohto vychýľovania vláken bolo dosiahnuť to, aby sa uprostred danej stopy nenachádzalo výkonové maximum (ako je vidieť na obrázku 11.2 a 11.3), ale aby bol výkon rozložený viacej v priestore. Ďalším cieľom bolo zväčšenie danej výkonovej stopy zobrazovanej detektorom. Vláka vo zväzku boli vychýľované pod uhlami 0,5°, 1°, 2°, 3°, 4°, 5°, 7° a 10° (viď obrázok 11.6). V tejto práci sú rozobraté a znázornené rozloženia optického výkonu pri vychýlení vláken 4°, 5° a 7°, pretože u týchto vychýlení sa rozloženie optického výkonu javilo

ako najideálnejšie. Simulácie ostatných vychýlení vlákien sú obsahom priloženého CD. Pri každej simulácii pod určitým uhlom sa porovnávalo rovnomerne rozloženie výkonu u oboch druhov vlákien (MM 50/125 μm a 62,5/125 μm).



Obrázok 11.6: Vychýlenie vlákien vo zväzku – a) 0,5°; b) 1°; c) 2°; d) 3°; e) 4°; f) 5°; g) 7°; h) 10°

Na obrázku 11.7 vidíme porovnanie rozloženia výkonu medzi MM vláknami, ktoré sú vychýlené pod uhlom 4°, pričom na obrázku 11.7a je zobrazené vlákno 50/125 μm , a na obrázku 11.7b vlákno 62,5/125 μm .

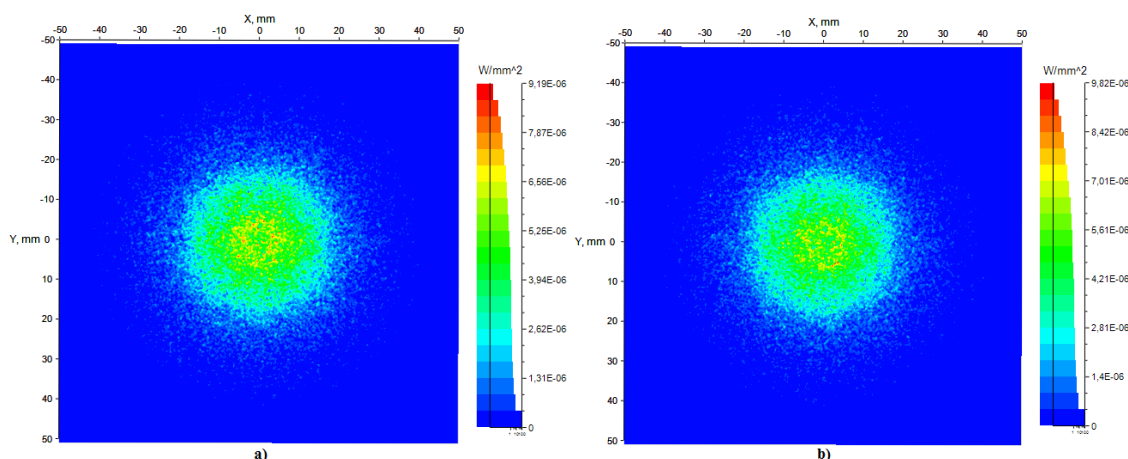


Obrázok 11.7: Rozloženie optického výkonu pri vychýlení vlákien 4° – a) 50/125 μm ; b) 62,5/125 μm

Ako môžeme z obrázka 11.7 vidieť, pri vychýlení vlákien vo zväzku o 4° dochádza k rovnomernejšiemu rozloženiu optického výkonu zachyteného detektorom. Toto rozloženie

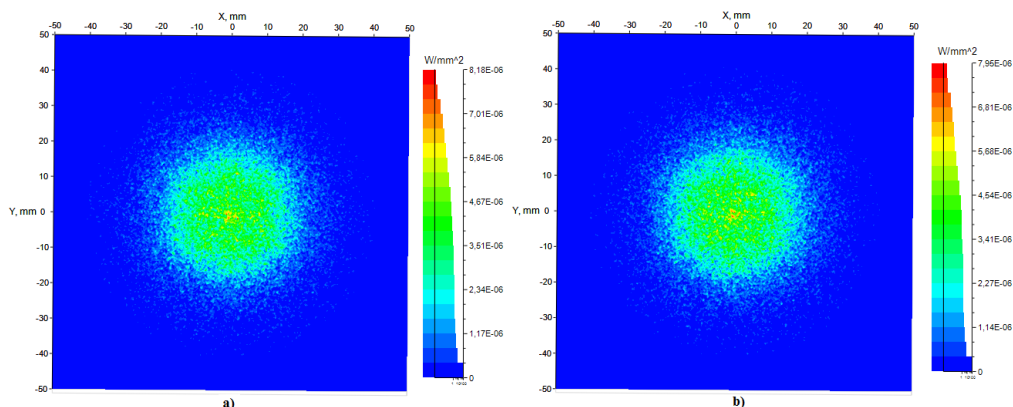
však ešte stále obsahuje uprostred stopy výkonové maxima, čo je dôkazom toho, že vlákna môžeme vychýliť o viac stupňov. U zväzku vláken MM 50/125 μm majú výkonové maxima o niečo nižšiu úroveň ako je to pri zväzku MM 62,5/125 μm . Hodnota maximálneho výkonu je u zväzku vláken MM 50/125 μm $1,04\text{E}-05 \text{ W/mm}^2$. U zväzku vláken MM 62,5/125 μm je táto hodnota $1,02\text{E}-05 \text{ W/mm}^2$. Priemer stopy je zhruba 5,5 cm.

Na nasledujúcom obrázku (obrázok 11.8) môžeme sledovať najideálnejšie rozloženie optického výkonu, ktoré sa mi podarilo nasimulovať. Je to rozloženie pri vychýlení vláken vo zväzku o 5° . Zachytená výkonová úroveň je dostatočne vysoká, a aj keď stopa obsahuje výkonové maxima, ich veľkosť nie je výrazne veľká ako u vychýlenia vláken o 4° a sú rozložené rovnomerne. Pri porovnaní oboch druhov vláken sa ako ideálnejšie javí rozloženie optického výkonu u vlákna MM 50/125 μm (viď. obrázok 11.8a). Hodnota maximálneho výkonu je u zväzku vláken MM 50/125 μm $9,19\text{E}-06 \text{ W/mm}^2$. U zväzku vláken MM 62,5/125 μm je táto hodnota $9,82\text{E}-06 \text{ W/mm}^2$. Priemer stopy sa pohybuje okolo 6 cm.



Obrázok 11.8: Rozloženie optického výkonu pri vychýlení vláken 5° – a) 50/125 μm ;
b) 62,5/125 μm

Pri vychýlení vláken vo zväzku o 7° môžeme sledovať, že sa z rozloženia optického výkonu stratili výkonové maxima, avšak zachytená úroveň výkonu je veľmi nízka (obrázok 11.9), takže toto vychýlenie vláken považujeme už za príliš veľké a nevhodné. Hodnota maximálneho výkonu je u zväzku vláken MM 50/125 μm $8,18\text{E}-06 \text{ W/mm}^2$. U zväzku vláken MM 62,5/125 μm je táto hodnota $7,95\text{E}-06 \text{ W/mm}^2$. Priemer stopy sa pohybuje okolo 7 cm.

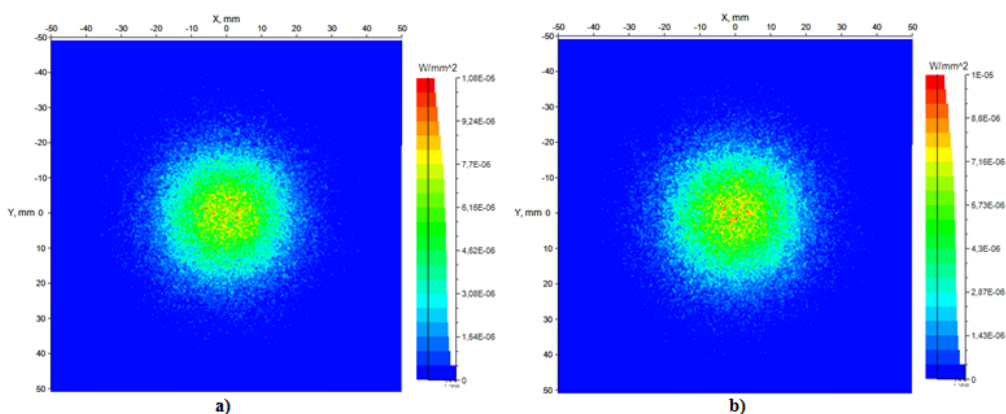


Obrázok 11.9: Rozloženie optického výkonu pri vychýlení vlákien 7° – a) $50/125 \mu\text{m}$;
b) $62,5/125 \mu\text{m}$

11.1.2 Zmena numerickej apertúry

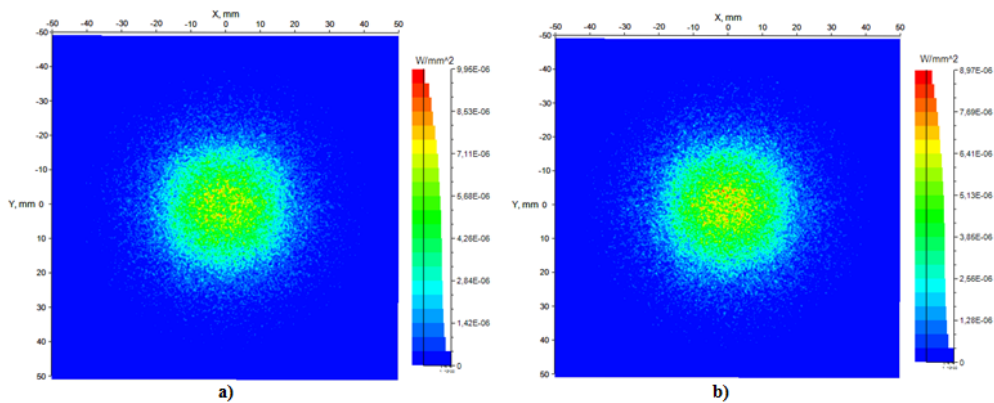
Zmenou numerickej apertúry NA som chcel dosiahnuť rovnomerné rozloženie optického výkonu na väčšej ploche. Hodnotu numerickej apertúry som znížil z hodnoty 0,34 na hodnotu 0,12, čo bolo dosiahnuté zmenou indexu lomu plášťa z hodnoty 1,5 na hodnotu 1,455. To spôsobilo u optických vlákien zväčšenie vyžarovacieho kužela, a dôsledkom toho malo byť zväčšenie stopy zachytenej detektorom.

Pri simuláciách som však zistil, že daná zmena numerickej apertúry sa nijako výrazne na zväčšení stopy nepodieľa, takže v práci uvádzam iba ukážku rozloženia optického výkonu u zväzku vlákien vychýlených o 4° a 5° (viď. obrázok 11.10 a obrázok 11.11). U ostatných vychýlení vlákien som danú zmenu numerickej apertúry neaplikoval, keďže nemala výrazný vplyv na rozloženie optického výkonu.



Obrázok 11.10: Zmena numerickej apertúry pri vychýlení vlákien vo zväzku o 4° - a) $50/125 \mu\text{m}$;
b) $62,5/125 \mu\text{m}$

Hodnota maximálneho výkonu je u zväzku vlákien MM 50/125 μm vychýlených o 4° $1,06\text{E-}05 \text{ W/mm}^2$. U zväzku vlákien MM 62,5/125 μm vychýlených o ten istý uhol je táto hodnota $1\text{E-}05 \text{ W/mm}^2$. Priemer stopy je zhruba 6 cm.



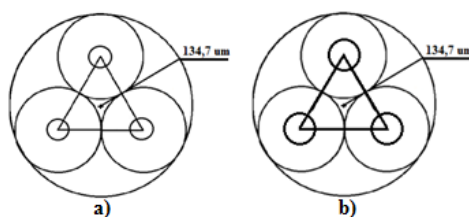
Obrázok 11.11: Zmena numerickej apertúry pri vychýlení vlákien vo zväzku o 5° - a) 50/125 μm ;
b) 62,5/125 μm

Hodnota maximálneho výkonu je u zväzku vlákien MM 50/125 μm vychýlených o 5° $9,98\text{E-}06 \text{ W/mm}^2$. U zväzku vlákien MM 62,5/125 μm vychýlených o ten istý uhol je táto hodnota $8,97\text{E-}06 \text{ W/mm}^2$. Priemer stopy je zhruba 6 cm.

12 Experimentálne meranie

V tomto experimentálnom meraní bolo mojou úlohou vytvoriť optický vysielateľ s rovnomerným rozložením optického výkonu v priestore, a porovnať toto rozloženie s výsledkami simulácií z kapitoly 11. Toto meranie bolo však v dôsledku nedostatočných komponent pre zhotovenie experimentálneho merania rozloženia optického výkonu nahradené meraním veľkosti výkonových stôp vytvorených optickým segmentovým vysielateľom zachytených na milimetrovom papieri.

V prvom rade bolo nutné zvoliť si typ vlákna, pomocou ktorého sa bude daný optický vysielateľ zostrojovať. V dnešnej dobe sa dá použiť množstvo typov optických vlákien s rôznymi typmi priemerov jadra a plášťa. Ja som pre toto meranie zvolil dva druhy mnohovidového optického vlákna s rôznym priemerom jadier a pracovnými vlnovými dĺžkami 850 a 1300 nm. Numerická apertúra vlákien je $0,34 \pm 0,015$, priemer jadra jedného vlákna je $50 \pm 2,5 \mu\text{m}$, druhého $62,5 \pm 2,5 \mu\text{m}$. Priemer plášťa u oboch vlákien je $125 \pm 1,0 \mu\text{m}$. Po tom ako som si zvolil dané vlákna bolo nutné zamerať pozornosť na špecifikáciu počtu optických vlákien pre vytvorenie optického vysielateľa s ohľadom na maximálnu efektivitu užitočnej plochy pri rôznych kombináciách optických vlákien. Vytvoril som vysielateľ tvorený zväzkom 3, 5 a 7 optických vlákien, avšak vždy je nutné brať v úvahu celkovú plochu, ktorá bude využitá voči ploche, ktorá ostane nevyužitá. Pri 3 optických vláknach sa dá zo stredov týchto vlákien vytvoriť rovnostranný trojuholník, u ktorého sme schopní vypočítať efektívnu užitočnú plochu jadra či plášťa (viď obrázok 12.1).



Obrázok 12.1: Optický vysielateľ tvorený 3 mnohovidovými optickými vláknami – a) 50/125 μm ;
b) 62,5/125 μm

Na základe jednoduchých matematických operácií sa dá vypočítať polomer vonkajšej kružnice, ktorý má u MM vlákna 50/125 μm hodnotu 134,7 μm . Obsah užitočnej plochy jadra s priemerom 50 μm vypočítame zo vzťahu:

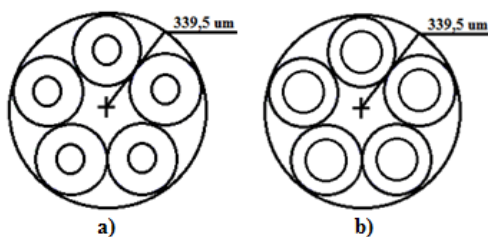
$$S_j = (\pi r^2) \cdot 3 \quad (12.1)$$

kde r je polomer jadra, ktorého hodnota je $25 \mu\text{m}$ a konštanta 3 označuje počet jadier/plášťov. Výsledný obsah užitočnej plochy jadier u troch vlákien je $5890,48 \mu\text{m}^2$.

Pri výpočte užitočnej plochy plášťa postupujeme obdobne ako pri výpočte užitočnej plochy jadra, avšak s tým rozdielom, že u vzťahu 12.1 zmeníme hodnotu polomeru jadra na polomer plášťa, ktorého hodnota je $r=62,5 \mu\text{m}$. Takže hodnota užitočnej plochy plášťa s priemerom $125 \mu\text{m}$ má hodnotu $36\,815,5 \mu\text{m}^2$.

U MM vlákna $62,5/125 \mu\text{m}$ je taktiež polomer vonkajšej kružnice $134,7 \mu\text{m}$. U týchto vlákien dôjde k zväčšeniu užitočnej plochy jadra, pretože ich polomer má hodnotu $r=31,25 \mu\text{m}$, čiže väčšiu ako je to u vlákna MM $50/125 \mu\text{m}$. Obsah užitočnej plochy jadra s priemerom $62,5 \mu\text{m}$ je teda $9203,88 \mu\text{m}^2$ a plášťa s priemerom $125 \mu\text{m}$ je $36\,815,5 \mu\text{m}^2$.

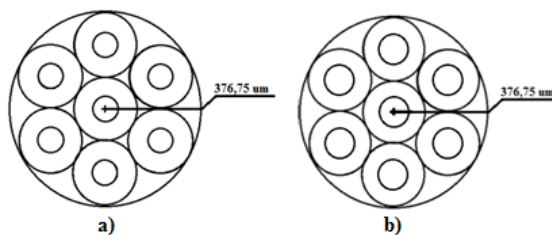
Takýto istý vysielateľ sme vytvorili aj z piatich optických vlákien s veľkosťou jadra a plášťa $50/125 \mu\text{m}$ a $62,5/125 \mu\text{m}$ (vid'. obrázok 12.2).



Obrázok 12.2: Optický vysielateľ tvorený 5 mnohovidovými optickými vláknami – a) $50/125 \mu\text{m}$; b) $62,5/125 \mu\text{m}$

Opäť s vedomosťou základných jednoduchých matematických operácií môžeme vypočítať polomer vonkajšej kružnice, ktorý má u MM vlákna $50/125 \mu\text{m}$ hodnotu $339,5 \mu\text{m}$. Obsah užitočnej plochy jadra s priemerom $50 \mu\text{m}$ má potom hodnotu $9817,48 \mu\text{m}^2$ a plášťa s priemerom $125 \mu\text{m}$ hodnotu $61\,359,23 \mu\text{m}^2$. U MM vlákna $62,5/125 \mu\text{m}$ je taktiež polomer vonkajšej kružnice $339,5 \mu\text{m}$. Obsah užitočnej plochy jadra s priemerom $62,5 \mu\text{m}$ je však $15\,095,35 \mu\text{m}^2$ a plášťa s priemerom $125 \mu\text{m}$ je $61\,359,23 \mu\text{m}^2$.

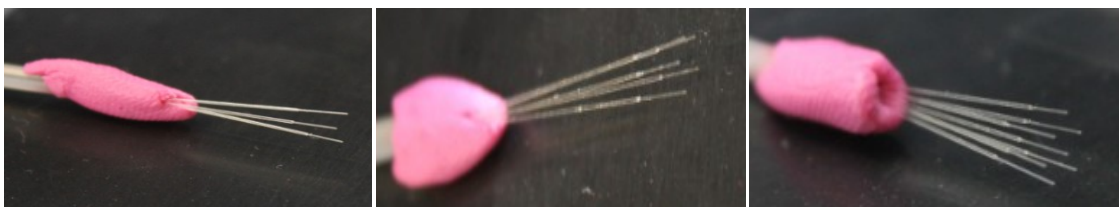
Posledným vysielateľom bol vysielateľ tvorený siedmimi optickými vláknami, taktiež s veľkosťou jadra a plášťa $50/125 \mu\text{m}$ a $62,5/125 \mu\text{m}$ (vid'. obrázok 12.3).



Obrázok 12.3: Optický vysielateľ tvorený 7 mnohovidovými optickými vláknami – a) 50/125 μm ;
b) 62,5/125 μm

Na základe jednoduchých matematických operácií sme opäť mohli vypočítať polomer vonkajšej kružnice, ktorý má u MM vlákna 50/125 μm hodnotu 376,75 μm . Obsah užitočnej plochy jadra s priemerom 50 μm má potom hodnotu 13 737,5 μm^2 a plášťa s priemerom 125 μm hodnotu 85 859,375 μm^2 . U MM vlákna 62,5/125 μm je taktiež polomer vonkajšej kružnice 376,75 μm . Obsah užitočnej plochy jadra s priemerom 62,5 μm je však 21 133,49 μm^2 a plášťa s priemerom 125 μm je 85 859,375 μm^2 .

Ďalšou úlohou bolo riešenie usporiadania jednotlivých vlákien vo zväzku, aby boli aspoň približne rovnako usporiadané ako pri simulácií. Tento krok bol veľmi obtiažne realizovateľný, avšak ako môžeme vidieť z obrázka 12.4, podarilo sa vlákna vychýliť za pomoci plastelíny, aj keď nebolo toto vychýlenie úplne presné. Toto vychýlenie som uskutočnil pre oba druhy MM vlákien (50/125 μm a 62,5/125 μm).



Obrázok 12.4: Usporiadanie vlákien vo zväzku pre meranie

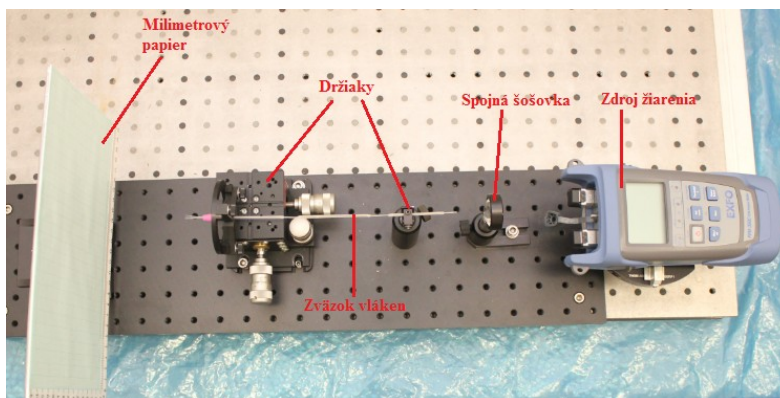
Predtým ako som vlákna pomocou plastelíny vychyľoval, boli jednotlivé konce zalomené v lámačke, aby boli dosiahnuté rovné čelá vlákien. Následne boli tieto vlákna vložené do ochrany zvarov, ktorú som v zvaračke zmrštil a tak vznikol pevný zväzok vlákien.

Ďalším krokom bolo zostrojenie modelov, na ktorých sa dané experimentálne meranie uskutočňovalo. Ako môžeme z obrázka 12.5 vidieť, model „1“ sa skladal zo zdroja žiarenia (obrázok 12.7), ktorým bol VFL lokátor (červený laser), spojnej šošovky, zväzku vlákien uchytených v držiakoch (obrázok 12.6) a dosky s milimetrovým papierom, na ktorej sme zachytávali a sledovali veľkosť stopy vytvorenej optickým segmentovým vysielateľom. Pri

všetkých meraniach bola vzdialenosť medzi zdrojom žiarenia a šošovkou 55 mm, a medzi šošovkou a začiatkom vlákien bola vzdialenosť 50 mm. U modelu „2“ bola zdrojom žiarenia LED dióda (viď. obrázok 12.16).

12.1 Model „1“

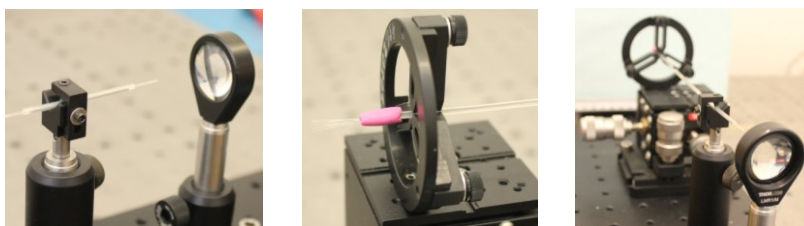
Zdrojom žiarenia je EPON Power Meter (VFL lokátor), čo je červený laser (obrázok 12.7), ktorý je koherentným zdrojom žiarenia.



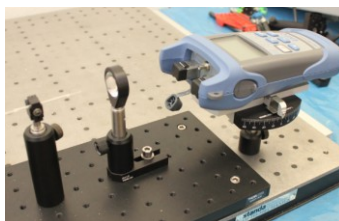
Obrázok 12.5: Model vysielacza pre experimentálne meranie s laserom

Parametre jednotlivých komponent modelu:

- Zdroj žiarenia – EPON Power Meter PPM-350C (VFL lokátor-červený laser)
- Spojná šošovka – EDMUND OPTICS VIS-NIR Coated PCX LENS #45-504
- Vlákno – MM 50/125 μm a 62,5/125 μm v počte 3, 5 a 7, dĺžka vlákien – 225 mm

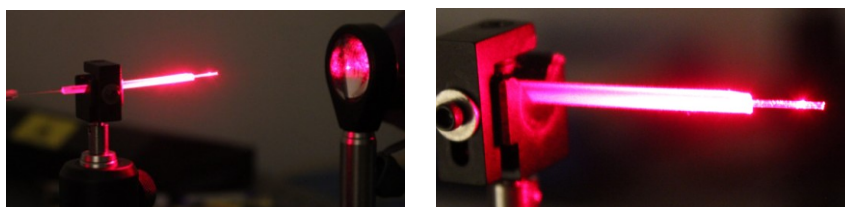


Obrázok 12.6: Uchytenie zväzku vlákien v držiakoch



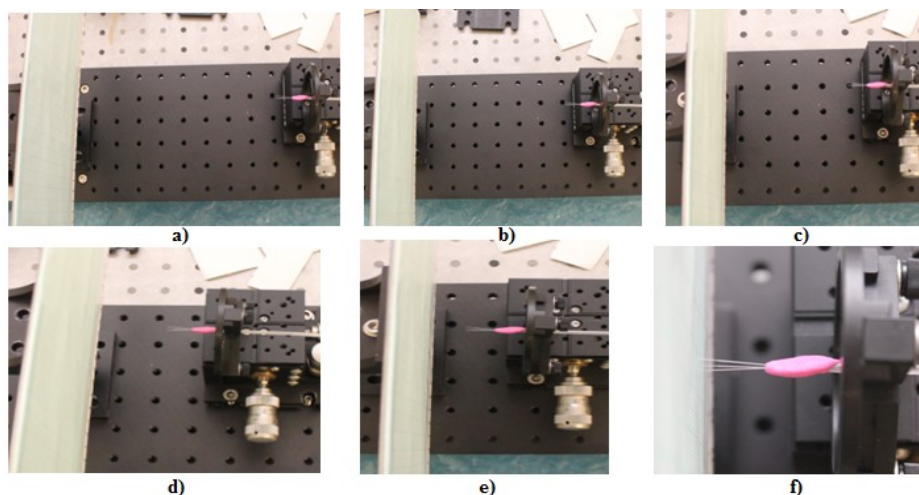
Obrázok 12.7: Zdroj žiarenia

Po zapnutí zdroja žiarenia bolo nutné nastaviť spojnú šošovku a zdroj tak, aby sa do zväzku vlákien naviazalo čo najviac svetla. Tu bol použitý biely papier, ktorý som si postavil pred začiatok vlákien a natočením zdroja žiarenia som nastavil presne stopu lúčov, ktorá sa bude naväzovať. Pri oboch druhoch vlákien a všetkých zväzkoch vlákien bolo nutné zdroj žiarenia natočiť vo vodorovnej osi o 40 mm, aby bola stopa ideálna. Na obrázku 12.8 môžeme vidieť naväzovanie svetla do vlákien.



Obrázok 12.8: *Naväzovanie svetla do vlákien*

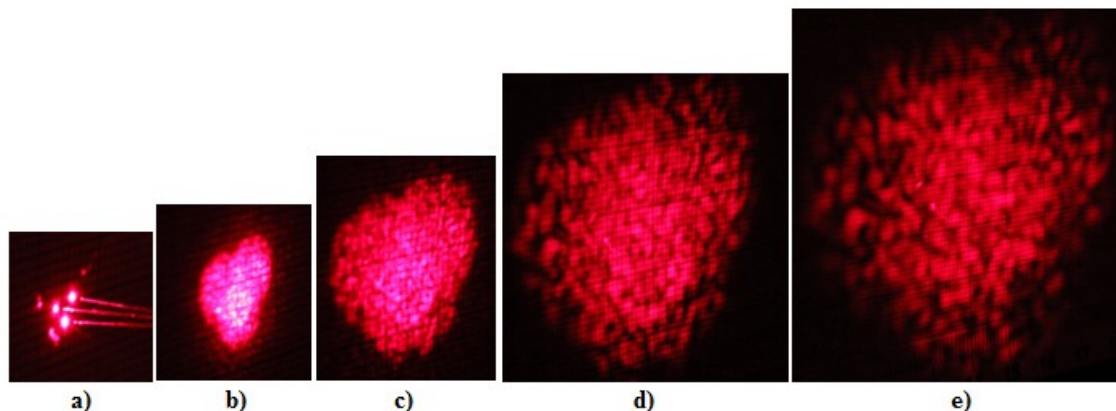
Meranie bolo uskutočnené v temnej miestnosti, pričom v priebehu merania som posúval milimetrový papier od konca vlákien do vzdialeností tesne pred vláknami, následne 2,5, 5, 10, 15 a 20 cm a sledoval som rozloženie a veľkosť stopy na milimetrovom papieri. Zo zväčšením vzdialenosti medzi koncom vlákien a milimetrovým papierom dochádza k zníženiu výkonovej úrovne a k nesymetrickosti stopy. Meranie bolo vykonané u oboch druhoch MM vlákien, pričom výsledky môžeme vidieť na obrázkoch 12.10-12.15, 12.17 a 12.18.



Obrázok 12.9: *Vzdialovanie milimetrového papiera od konca vlákien – a) 20cm; b) 15cm; c) 10cm; d) 5cm; e) 2,5cm; f) tesne pre vláknami*

12.1.1 Zväzky MM vláken 50/125 μm

Na nasledujúcich obrázkoch (obrázok 12.10) uvidíme rozloženie optického výkonu na milimetrovom papieri a tiež zväčšovanie viditeľnej stopy pri vzdialovaní milimetrového papiera od konca vláken, pri ktorom bude však hodnota výkonu klesať. Vychýlenie vláken vo zväzku je 2° . Obrázky týchto rozložení sú u zväzku troch vláken MM 50/125 μm .

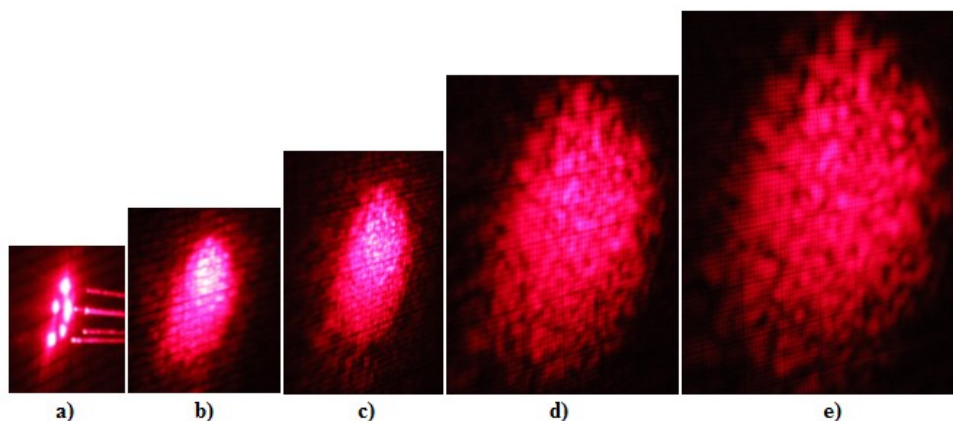


Obrázok 12.10: Rozloženie optického výkonu u troch MM vláken 50/125 μm v rôznych vzdialenostiach od konca vláken – a) tesne pred vláknami; b) 2,5 cm; c) 5 cm; d) 10 cm; e) 15 cm

Pri troch MM vláknach 50/125 μm sa nám stopu výkonového rozloženia nepodarilo zachytiť fotoaparátom. Priemer stopy pri vzdialenosti 2,5 cm je zhruba 1,5 cm. Pri vzdialenosti 5 cm má táto stopa priemer okolo 2,5 cm. U vzdialenosti 10 cm už priemer stopy dosahuje 4 cm a u 15 cm je priemer stopy 7 cm.

Vplyvom interferencie, pri ktorej dochádza k skladaniu koherentných vlnení rovnakého druhu do jedného výsledného vlnenia vzniká na obrázkoch 12.10b a 12.10c uprostred stopy jedno výkonové maximum. Toto maximum sa rozkladá pri vzdialovaní milimetrového papiera od konca vláken (viď. obrázky 12.10d a 12.10e).

Ďalším krokom bolo zmeranie tých istých stôp optického výkonu vytvorených optickým segmentovým vysielačom u piatich optických vláken MM 50/125 μm . Do tohto zväzku sa podarilo samozrejme naviazať viacej optického výkonu ako to bolo u troch vláken, preto je aj stopa rozloženia optického výkonu na milimetrovom papieri intenzívnejšia a pri vzdialovaní papiera od konca vláken vzniká tiež väčšia stopa. Vychýlenie vláken vo zväzku je 3° .

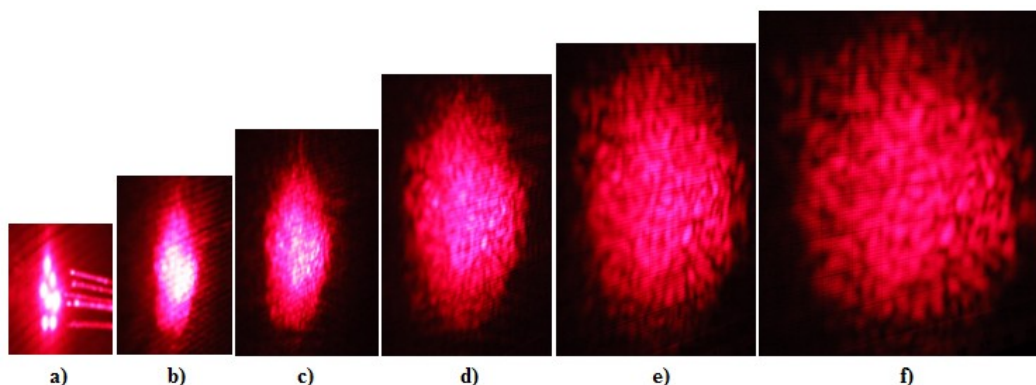


Obrázok 12.11: Rozloženie optického výkonu u troch MM vláken $50/125\ \mu\text{m}$ v rôznych vzdialenostiach od konca vláken – a) tesne pred vláknami; b) 2,5 cm; c) 5 cm; d) 10 cm; e) 15 cm

Ako je z obrázka 12.11a vidieť, rozloženie piatich vláken sa nám nepodarilo ideálne, čo môžeme vidieť aj z nasledujúcich obrázkov 12.11b a 12.11c, na ktorých vidíme, že výkon z jedného vlákna je výrazne väčší ako z ostatných. Preto sa na daných obrázkoch zobrazuje jedno výkonové maximum, ktoré je veľmi intenzívne. Taktiež aj tu môžeme sledovať vplyv interferencie, vďaka ktorej dochádza k skladaniu koherentných vln.

Pri piatich MM vláknach $50/125\ \mu\text{m}$ sa nám stopu výkonového rozloženia opäť nepodarilo zachytiť fotoaparátom. Priemer stopy pri vzdialenosti 2,5 cm je zhruba 1,8 cm. Pri vzdialenosti 5 cm má táto stopa priemer okolo 3 cm. U vzdialenosti 10 cm už priemer stopy dosahuje 5 cm a u 15 cm je priemer stopy 8 cm. Môžeme teda potvrdiť, že s rastúcim počtom vláken sa daná stopa výkonového rozloženia zväčšuje.

V ďalšom kroku sme merali opäť veľkosti stôp u siedmich vláken MM $50/125\ \mu\text{m}$. Do tohto zväzku sa podarilo samozrejme naviazať opäť viacej optického výkonu ako to bolo u troch a piatich vláken, preto sa stopa rozloženia optického výkonu na milimetrovom papieri znova zväčšila a zintenzívnela. Vychýlenie vláken vo zväzku je 2° .



Obrázok 12.12: Rozloženie optického výkonu u troch MM vláken 50/125 μm v rôznych vzdialenostiach od konca vláken – a) tesne pred vláknami; b) 2,5 cm; c) 5 cm; d) 10 cm; e) 15 cm; f) 20cm

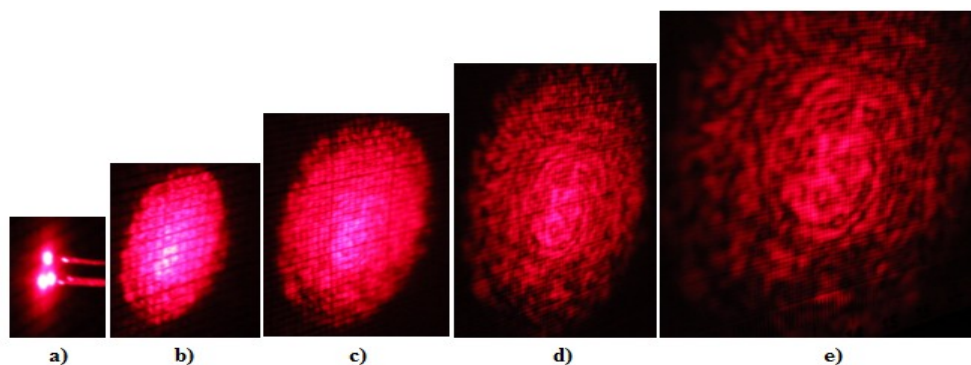
Ako aj v predchádzajúcich prípadoch u troch a piatich vláken, tak aj u siedmich dochádza k interferencii a skladaniu koherentných vln. V porovnaní s predchádzajúcimi prípadmi sa stopa výkonového rozloženia opäť značne zväčšila (viď. obrázok 12.12).

Priemer stopy pri vzdialenosti 2,5 cm je zhruba 2,3 cm. Pri vzdialenosti 5 cm má táto stopa priemer okolo 3,2 cm. U vzdialenosti 10 cm už priemer stopy dosahuje 6,2 cm a u 15 cm je priemer stopy 8,5 cm. Pri zväzku siedmich vláken sa nám podarilo zachytiť aj stopu vo vzdialenosti 20 cm, ktorej priemer je takmer 10 cm. Môžeme teda potvrdiť, že s rastúcim počtom vláken sa daná stopa výkonového rozloženia zväčšuje.

V porovnaní vysieláčov tvorených zväzkami 3, 5 a 7 vláken sa ako aj u simulácií tak aj u experimentálneho merania najviac osvedčilo použitie optického vysieláča zo 7 optickými vláknami. Dôvodom tohto tvrdenia je fakt, že stopa rozloženia optického výkonu je najviac rovnomerná a tiež najväčšia.

12.1.2 Zväzky MM vláken 62,5/125 μm

Nasledujúcim krokom bolo vykonanie toho istého merania veľkosti výkonových stôp vytvorených optickým segmentovým vysieláčom aj u zväzkov vláken MM 62,5/125 μm . Ako z obrázkov uvidíme, stopy z týchto vláken sú rovnomernejšie a symetrickejšie (napr. viď. obrázok 12.10b a 12.13b) než u vláken MM 50/125 μm . To znamená, že ani hodnoty výkonu nevytvárajú také veľké výkonové maxima. Vychýlenie vláken vo zväzku je 1° .

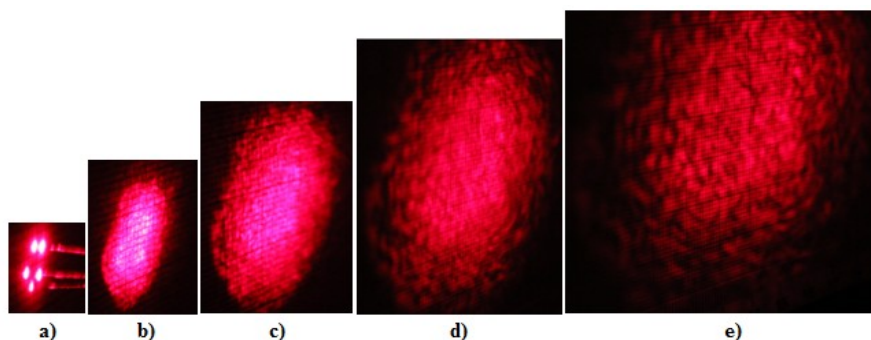


Obrázok 12.13: Rozloženie optického výkonu u troch MM vláken 62,5/125 μm v rôznych vzdialenostiach od konca vláken – a) tesne pred vláknami; b) 2,5 cm; c) 5 cm; d) 10 cm; e) 15 cm

Na obrázkoch 12.13 môžeme opäť sledovať vplyv interferencie, ktorý však nie je až taký výrazný ako u MM 50/125 μm (vid'. obrázok 12.11). Pri porovnaní veľkosti stôp výkonového rozloženia je na tom znova lepšie vlákno MM 62,5/125 μm , u ktorého sledujeme značný nárast stopy a jej symetrickosť.

Priemer stopy pri vzdialenosti 2,5 cm je zhruba 2,5 cm. Pri vzdialenosti 5 cm má táto stopa priemer okolo 3,5 cm. U vzdialenosti 10 cm už priemer stopy dosahuje 5,5 cm a u 15 cm je priemer stopy 8 cm. Stopa vo vzdialenosti 20 cm sa nepodarilo zachytiť fotoaparátom.

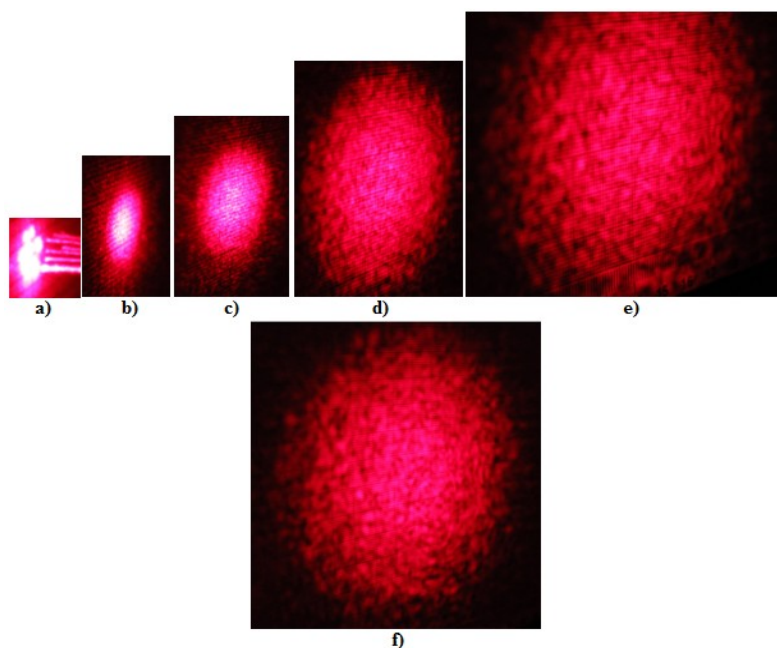
Ďalším krokom bolo zmeranie tých istých stôp výkonu u piatich vláken MM 62,5/125 μm . Stopa rozloženia optického výkonu je na milimetrovom papieri intenzívnejšia a pri vzdialovaní papiera od konca vláken vzniká tiež stopa väčšia (obrázok 12.14). Vychýlenie vláken vo zväzku je 2° .



Obrázok 12.14: Rozloženie optického výkonu u piatich MM vláken 62,5/125 μm v rôznych vzdialenostiach od konca vláken – a) tesne pred vláknami; b) 2,5 cm; c) 5 cm; d) 10 cm; e) 15 cm

Priemer stopy pri vzdialenosti 2,5 cm je zhruba 3,5 cm. Pri vzdialenosti 5 cm má táto stopa priemer okolo 5 cm. U vzdialenosti 10 cm už priemer stopy dosahuje 6,5 cm a u 15 cm je priemer stopy 7,5 cm. Stopa vo vzdialenosti 20 cm sa nepodarila zachytiť fotoaparátom.

V poslednom rade môžeme na obrázku 12.15 vidieť stopy rozloženia optického výkonu u vysieláča tvoreného zväzkom 7 vlákien 62,5/125 μm . Tak ako aj u 7 vlákien 50/125 μm , tak aj teraz sa nám podarilo dosiahnuť zväčšenie stopy rozloženia výkonu, a to v oveľa väčších rozmeroch (viď. obrázok 12.12f a 12.15f). Vychýlenie vlákien vo zväzku je 2°.



Obrázok 12.15: Rozloženie optického výkonu u siedmich MM vlákien 62,5/125 μm v rôznych vzdialenostiach od konca vlákien – a) tesne pred vláknami; b) 2,5 cm; c) 5 cm; d) 10 cm; e) 15 cm; f) 20 cm

U obrázka 12.15b vidíme vplyv interferencie a skladania jednotlivých koherentných vln. Uprostred stopy tak vzniká výkonové maximum, ktoré sa však pri zväčšovaní vzdialenosti rozkladá (viď. obrázok 12.15c-12.15f).

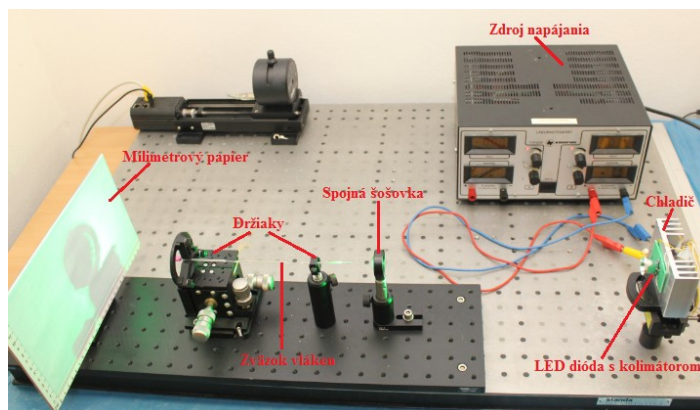
Priemer stopy pri vzdialenosti 2,5 cm je zhruba 4,5 cm. Pri vzdialenosti 5 cm má táto stopa priemer okolo 6 cm. U vzdialenosti 10 cm už priemer stopy dosahuje 7,8 cm a u 15 cm je priemer stopy 9,5 cm. Stopa vo vzdialenosti 20 cm sa podarila zachytiť, a jej priemer bol okolo 11,5 cm.

Zhodnotenie

Ako u všetkých obrázkov vidieť, stopy rozloženia optického výkonu na milimetrovom papieri sú ovplyvnené interferenciou. Stopy nie sú vyhladené, čo je spôsobené koherentným zdrojom žiarenia. Pri zvyšovaní počtu vlákien vo zväzku a pri zväčšovaní vzdialenosti medzi koncom vlákien a milimetrovým papierom dochádza k zväčšovaniu stopy rozloženia výkonu. U vlákien MM 62,5/125 μm je sú stopy rozloženia optického výkonu symetrickejšie a hodnota výkonu je vyššia ako u vlákien MM 50/125 μm .

12.2 Model „2“

Zdrojom žiarenia je zelená LED dióda s kolimátorom, ktorá je nekoherentným zdrojom žiarenia. Tento zdroj žiarenia sme použili pre porovnanie stôp rozloženia výkonu na milimetrovom papieri so stopami vytvorenými laserovým zdrojom žiarenia. Dôvod bol ten, že LED dióda danú stopu vyhladzuje. Uchytenie vlákien v držiakoch, ich veľkosť aj vzdialenosť medzi šošovkou a začiatkom vlákien je rovnaká. Zmenila sa akurát vzdialenosť medzi zdrojom žiarenia a šošovkou, ktorá bola 30 cm (obrázok 12.16). U LED diódy bol použitý taktiež chladič, pretože jej výkon bol 1 W.



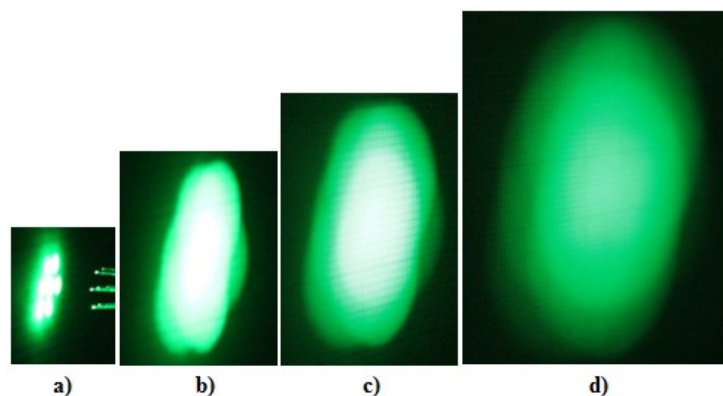
Obrázok 12.16: Model vysielajúceho zariadenia pre experimentálne meranie s LED diódou

Parametre jednotlivých komponent modelu:

- Zdroj žiarenia – zelená výkonová LED dióda s kolimátorom, typ: Luxeon LXHL-PM01 350 mA 3,15 V, vlnová dĺžka: 530 nm, vyžarovací uhol: 160°
- Spojná šošovka – EDMUND OPTICS VIS-NIR Coated PCX LENS #45-504
- Vlákno – MM 50/125 μm a 62,5/125 μm v počte 7, dĺžka vlákien – 225 mm
- Zdroj napájania diódy – STATRON Typ 2229, 230 V ~ 50 Hz max. 1,6 mA

U tohto modelu s LED zdrojom žiarenia sme pre porovnanie merali veľkosť stôp rozloženia optického výkonu iba u zväzku siedmich MM vláken, a to u 50/125 μm a aj u 62,5/125 μm . Výsledky u zväzku vláken 50/125 μm vidíme na obrázku 12.17, a u zväzku vláken 62,5/125 μm na obrázku 12.18. Vychýlenie vláken vo zväzku je 2° .

12.2.1 Zväzky MM vláken 50/125 μm

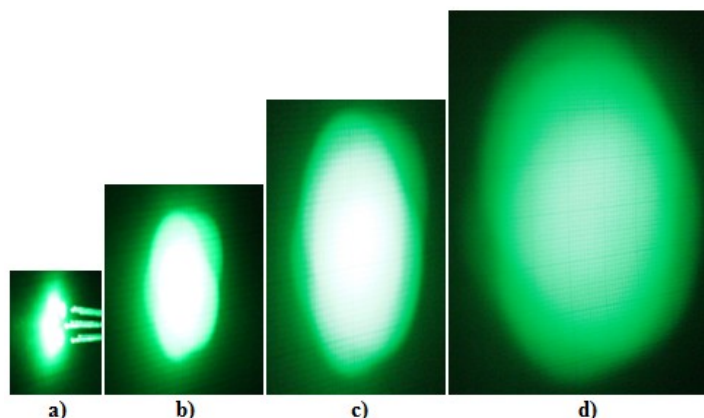


Obrázok 12.17: Rozloženie optického výkonu u siedmich MM vláken 50/125 μm v rôznych vzdialenostiach od konca vláken – a) tesne pred vláknami; b) 2,5 cm; c) 5 cm; d) 10 cm

Pri zdroji žiarenia, ktorým bola zelená výkonová LED dióda sa nám stopu výkonového rozloženia podarilo zachytiť fotoaparátom iba do vzdialenosti 10 cm od konca vláken. Aj keď stopa vo väčšej vzdialenosti bola viditeľná, fotoaparát mal problém zaostriť a zachytiť dané svetlo. Aj keď sme mali na dióde kolimátor, tak sa nám nepodarilo naviazať do vláken príliš veľa výkonu, čo sa odráža aj na daných stopách rozloženia, ktoré sú v porovnaní s meraniami u laserového zdroja žiarenia o niečo menšie. Ako bolo však spomenuté vyššie, jednotlivé stopy sú však vyhladené, čo je spôsobené použitím nekoherentného zdroja žiarenia.

Priemer stopy pri vzdialenosti 2,5 cm je zhruba 3 cm. Pri vzdialenosti 5 cm má táto stopa priemer okolo 4,5 cm. U vzdialenosti 10 cm už priemer stopy dosahuje zhruba 6,5 cm.

12.2.2 Zväzky MM vláken 62,5/125 μm



Obrázok 12.18: Rozloženie optického výkonu u siedmich MM vláken 62,5/125 μm v rôznych vzdialenostiach od konca vláken – a) tesne pred vláknami; b) 2,5 cm; c) 5 cm; d) 10 cm

Rovnaký prípad nastal aj pri zväzku MM vláken 62,5/125 μm , pri ktorom sa nám taktiež podarilo zachytiť stopu iba do vzdialenosti 10 cm od konca vláken. Stopy rozloženia optického výkonu pri LED zdroji žiarenia sú opäť v porovnaní so stopami u laserového zdroja menšie, menej intenzívne, ale naopak znova vyhladené. Vychýlenie vláken vo zväzku je 2°.

Priemer stopy pri vzdialenosti 2,5 cm je zhruba 3,5 cm. Pri vzdialenosti 5 cm má táto stopa priemer okolo 5 cm. U vzdialenosti 10 cm už priemer stopy dosahuje zhruba 7,5 cm. Takže môžeme potvrdiť, že u vláken MM 62,5/125 μm je stopa znova o niečo väčšia ako u vláken 50/125 μm . K takému istému výsledku sme dospeli aj pri použití laserového zdroja žiarenia.

Zhodnotenie

Ako u obrázkov 12.17 a 12.18 vidieť, stopy rozloženia optického výkonu na milimetrovom papieri sú taktiež ovplyvnené interferenciou ako to bolo v prípade použitia laserového zdroja. Stopy sú však vyhladené, čo je spôsobené použitím nekoherentného zdroja žiarenia. Pri zväčšovaní vzdialenosti medzi koncom vláken a milimetrovým papierom dochádza k zväčšovaniu stopy rozloženia výkonu, ale k poklesu výkonu. U vláken MM 62,5/125 μm sú stopy rozloženia optického výkonu symetrickejšie a hodnota výkonu je vyššia ako u vláken MM 50/125 μm .

Záver

Cieľom tejto diplomovej práce bolo vytvorenie optického vysielača pre optickú bezvláknovú sieť, ktorý bude mať najrovnomernejšie rozloženie optického výkonu v priestore. Úlohou bolo vytvoriť simulácie daného vysielača s rôznym počtom optických vláken v softvérovej aplikácii LightTools a analyzovať dané rozloženie optického výkonu. Rozloženie optického výkonu sme sledovali u zväzkov troch, piatich a siedmich vláken, pričom sme uskutočnili aj simulácie, pri ktorých dochádzalo k vychýľovaniu vláken do rôznych uhlov alebo zmene numerickej apertúry jednotlivých optických vláken vo zväzku. Detailne je v tejto práci rozobratý vysielač tvorený zväzkom siedmich optických vláken vychýlených o 4° , 5° a 7° , u ktorého sme merali rozloženie optického výkonu v priestore pre dva druhy optických vláken, a to pre MM 50/125 μm a 62,5/125 μm . Pri vychýlení vláken vo zväzku o 4° sa stopa rozloženia výkonu zväčšila o 22,2% o u oboch druhoch vláken. Pri vychýlení o 5° táto hodnota vzrástla na 33,3%. Najväčšiu stopu sme dostali pri vychýlení vláken o 7° , kde sa stopa zväčšila v porovnaní so stopou bez vychýlenia vláken o 55,5%. Pri zmene numerickej apertúry nedošlo k výraznému zväčšeniu stopy rozloženia optického výkonu. Výsledky simulácií boli následne medzi sebou porovnané s tým výsledkom, že najrovnomernejšie rozloženie optického výkonu bolo dosiahnuté u zväzku siedmich MM 50/125 μm vláken, ktoré boli vychýlené pod uhlom 5° . U tohto vychýlenia vláken výsledné rozloženie neobsahovalo veľké množstvo výkonových maxim ako to bolo u vychýlenia pri menších uhloch.

Posledným krokom tejto práce bolo uskutočnenie reálneho experimentálneho merania rozloženia optického výkonu v temnej miestnosti. Toto meranie bolo však v dôsledku nedostatočných komponent pre meranie rozloženia optického výkonu nahradené meraním veľkosti stôp rozloženia výkonu na milimetrovom papieri. Pri meraní boli zostrojené dva druhy modelov, kde u prvého bol ako zdroj žiarenia použitý červený laser, čiže koherentné svetlo a u druhého modelu bol použitý nekoherentný zdroj žiarenia a to výkonová LED dióda. Oba modely boli medzi sebou porovnané s tým výsledkom, že použitie zväzku siedmich vláken sa javilo ako najideálnejšie a s najväčšími stopami rozloženia optického výkonu. U modelu s nekoherentným zdrojom žiarenia boli však tieto stopy rozloženia symetrickejšie a vyhladené, ale hodnota výkonu bola menšia ako u laserového zdroja žiarenia. U modelu s laserovým zdrojom žiarenia sa veľmi prejavovala interferencia, ktorá spôsobovala skladanie jednotlivých koherentných vln, čím uprostred stopy vznikalo veľké výkonové maximum, ktoré sa však po vzdialovaní milimetrového papiera od konca vláken rozložilo. Tieto modely môžu byť použité

i s väčším počtom zväzkov optických vláken, a tým sa môže doceliť výrazného zlepšenia a zväčšenia stôp rozloženia optického výkonu aj na väčšie vzdialenosti než sú merané v tejto práci.

Ako prínos tejto diplomovej práce uvádzam vytvorenie nového smeru pri komunikácií pomocou optických bezvláknových sietí s využitím zväzku viacerých optických vláken. Ďalším prínosom je použitie konfigurácie pre vytváranie ďalších simulácií, využiteľných pri zisťovaní rôznych ďalších parametrov optických bezvláknových sietí.

Použitá literatura

- [1] AL-GHAMDI, Abdullah G., ELMIRGHANI, M. H. Spot diffusing technique and angle diversity performance for high speed indoor diffuse infra-red wireless transmission. IEE Proceedings Optoelectronics. London: The Institution of Electrical Engineers, 2004, roč. 151, č. 1. ISSN 1350-2433.
- [2] BOUCOUVALAS, A. C. Indoor ambient light noise and its effect on wireless optical links. IEE Proceedings - Optoelectronics. 1996, roč. 143, č. 6, s. 334-338. ISSN 13502433. DOI: 10.1049/ip-opt:19960881. Dostupné z: <http://link.aip.org/link/IPOPE8/v143/i6/p334/s1>.
- [3] COSSU, Giulio, KHALID, Amir Masood, CHOUDHURY, Robin, CORSINI, Raffaele, CIARAMELLA, Ernesto. 3.4 Gbit/s visible optical wireless transmission based on RGB LED. [online]. [cit.2014-04-26]. Dostupné z: <http://www.opticsinfobase.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-20-26-B501>.
- [4] ELGALA, Hanz, MESLEH, Raed, HAAS, Harald, PRICOPE, Bogdan. OFDM Visible Light Wireless Communication Based on White LEDs. 2007 IEEE 65th Vehicular Technology Conference - VTC2007-Spring [online]. IEEE, 2007, s. 2185-2189 [cit. 2014-04-26]. DOI: 10.1109/VETECS.2007.451. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4212879>
- [5] FILIP, Martin. MĚŘENÍ A SIMULACE OPTICKÝCH VLASTNOSTÍ ČOČEK A KONCENTRÁTORŮ. Brno, 2008. Bakalárska práca. VUT Brno.
- [6] GFELLER, F. R. A U. BAPST. Wireless in-House Data Communication via Diffuse Infrared Radiation. Proceedings of the IEEE. 1979, č. 11, s. 1474-1486. ISSN 0018-9219.
- [7] GHASSEMLOOY, Zabih. Optical wireless communications system and channel modelling with MATLAB. Boca Raton, FL: CRC Press, 2013, 557 s. ISBN 978-143-9852-354.
- [8] GREEN, R. J., JOSHI, H., HIGGINS, M. D., LEESON, M. S. Recent developments in indoor optical wireless systems. IET Communications. 2008, roč. 2, č. 1, s. 3-. ISSN 17518628. DOI: 10.1049/iet-com:20060475.
- [9] GREENWOOD, N., EARNSHAW, Alan. Chemie prvků. 1. vyd. Praha: Informatorium, 1993, s.794-1635. ISBN 80-854-2738-9.
- [10] HAAS, Harald. Wireless data from every light bulb. [online]. [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: http://www.ted.com/talks/harald_haas_wireless_data_from_every_light_bulb.
- [11] HAJDUK, Peter. Studium rozložení světla mikrobuňky optické bezvláknové sítě. Ostrava, 2013. Bakalárska práca. VŠB-TU ostrava.
- [12] HALLIDAY, David, RESNICK, Robert; Walker, Jearl: Fyzika. Vysokoškolská učebnice obecné fyziky. Část 4: Elektromagnetické vlny – optika – relativita. Brno a Praha: VUTIUM a Prometheus, 2000, ISBN 80-214-1868-0.

- [13] HARUYAMA, Shinichiro. Visible Light Communications: Recent Activities in Japan. [online]. [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: http://www.docstoc.com/docs/77224282/Smart_Lighting_ERC_Haruyama_2011_02_08.
- [14] HARUYAMA, Shinichiro. Japan's Visible Light Communications Consortium and Its Standardization Activities. In: [online]. [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/08/15-08-0061-00-0v1c-japan-s-visible-light-communications-consortium-and-its.pdf>.
- [15] HEJDUK, Stanislav. Vysílače pro bezvláknové optické difúzní sítě: Využití RGBY modelu pro komunikaci a osvětlování. Ostrava, 2013. Písemný referát ke státní doktorské zkoušce. VŠB-TU Ostrava.
- [16] HRANILOVIC, Steve, KSCHISCHANG, Frank R. A pixelated MIMO wireless optical communication system. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics [online]. 2006, vol. 12, issue 4, s. 859-874 [cit. 2014-04-26]. DOI: 10.1109/JSTQE.2006.876601.
- [17] IEC 60825-1. Safety of Laser Products. Švýcarsko: International Electrotechnical Commission. Ženeva, 1998.
- [18] JAMIESON, Isaac. Visible Light Communication (VLC) Systems. [online]. [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: <http://bemri.org/visible-light-communication.html>.
- [19] KOLEV, Dimitar, KUBO, Takahiro, YAMADA, Takashi, YOSHIMOTO, Naoto, WAKAMORI, Kazuhiko. NON-DIRECTED INDOOR OPTICAL WIRELESS NETWORK WITH A GRID OF DIRECT FIBER COUPLED CEILING TRANSCEIVERS FOR WIRELESS EPON CONNECTIVITY. [online]. [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6533779&tag=1.
- [20] KOUDELKA, Petr. Studium vlastností optické bezvláknové datové sítě pro vnitřní prostory v oblasti viditelného optického záření. 2012. Vedoucí práce prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.
- [21] KRAEMER, Rolf, KATZ, Marcos. Short-range wireless communications: emerging technologies and applications. Hoboken, NJ: J. Wiley, 2009, 350 s., ISBN 978-047-0699-959.
- [22] KUPKA, Karel, KUBINYI, Jozef. Nukleární medicína. Praha : [s.n.], 2007. 185 s. ISBN 978-80-903584-9-2.
- [23] LÁTAL, Jan. Studium vlivu zakončení optických vláken na distribuci světla v prostoru pro vláknové segmentové vysílače. Ostrava, 2012. Písemný referát ke státní doktorské zkoušce. VŠB-TU Ostrava.
- [24] LE MINH, Hoa, O'BRIEN, Dominic, FAULKNER, Grahame, BOUCHET, Olivier, WOLF, Mike, GROBE, Liane, LI, Jianhui. A 1.25-Gb/s Indoor Cellular Optical Wireless Communications Demonstrator. IEEE Photonics Technology Letters. 2010, roč. 22, č. 21, s. 1598-1600. ISSN 1041-1135.

- [25] LEPIL, Oldřich. Fyzika pro gymnázia. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010, 207 s., [8] s. barev. obr. příl. ISBN 978-80-7196-384-4.
- [26] MILLAR, C. A., AINSLIE, B. J., BRIERLEY, M. C., CRAIG, S. P. Fabrication and characterisation of D-fibres with a range of accurately controlled core/flat distances: optical subsystems designs and their impact on channel characteristics. Electronics Letters. 1986, roč. 22, č. 6, s. 322-324. ISSN 0013-5194.
- [27] NAVRÁTIL, Leoš, ROSINA Josef, a kolektiv. Medicínská biofyzika. Praha : Grada, 2005. 524 s. ISBN 80-247-1152-4.
- [28] O'BRIEN, Dominic, FAULKNER Grahame, GHASSEMLOOY Zabih. Indoor Gigabit Optical Wireless Communications: Challenges and Possibilities. [online]. [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5549136&tag=1.
- [29] O'BRIEN, Dominic. Visible light communications: achieving high data rates. [online]. [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: http://smartlighting.rpi.edu/resources/PDFs/Smart_Lighting_ERC_O'Brien_11_02_08.pdf.
- [30] POHLMANN, Christian. Visible Light Communication. In: [online]. [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: http://www-old.itm.uni-luebeck.de/teaching/ss10/sem_kim/ausarbeitungen/2010-06-29%20Pohlmann.%20Visible%20Light%20Communication.pdf?lang=en.
- [31] PUTMANOVÁ, Rita. Bezdrátová optika a její možnosti. Dostupné z: <http://www.dsl.cz/clanek/533-bezdratova-optika-a-jeji-moznosti>.
- [32] PUTMANOVÁ, Rita. Bílé LED – světlo budoucnosti. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=36149.
- [33] RAMIREZ-INIGUEZ, Roberto, IDRUS Sevia M, SUN Ziran. Optical wireless communications: IR for wireless connectivity. Boca Raton: CRC Press, 2008, 344 s. ISBN 08-493-7209-7.
- [34] SPONSOR, LAN/MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society. IEEE standard for local and metropolitan area networks [online]. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011 [cit. 2014-04-26]. ISBN 978-073-8166-650.
- [35] SUGIYAMA, Hidemitsu , HARUYAMA, Shinichiro, NAKAGAWA, Masao. Experimental investigation of modulation method for visible-light communications; IEICE TRANSACTIONS on Communications. Japa, 2006, 425 s. ISSN 1745-1345.
- [36] SÝKORA, Jan. Teorie digitální komunikace. Dotisk 1. vyd. Praha: ČVUT, 2005, 329 s. ISBN 80-010-2478-4.
- [37] WANG, Ke, NIRMALATHAS, Ampalavanapillai, LIM, Christina, SKAFIDAS, Efstratios. High-speed duplex optical wireless communication system for indoor personal area networks. Optics Express. 2010, roč. 18, č. 24, s. 25199-25216. ISSN 1094-4087.

- [38] WANG, Ke, NIRMALATHAS, Ampalavanapillai, LIM, Christina, SKAFIDAS, Efstratios. Gigabit optical wireless communication system for indoor applications. In: Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP), 2010 Asia. Shanghai: IEEE, 2010, 453 - 454. ISBN 978-1-4244-7111-9.
- [39] WANG, Ke, NIRMALATHAS, Ampalavanapillai, LIM, Christina, SKAFIDAS, Efstratios. High-Speed Optical Wireless Communication System for Indoor Applications. IEEE Photonics Technology Letters. 2011, roč. 23, č. 8, s. 519-521. ISSN 1041-1135.
- [40] WANG, Ke, NIRMALATHAS, Ampalavanapillai, LIM, Christina, SKAFIDAS, Efstratios. 4x12.5 Gb/s WDM Optical Wireless Communication System for Indoor Applications. Journal of Lightwave Technology. 2011, roč. 29, č. 13, s. 1988-1996. ISSN 0733-8724.
- [41] WINTR, Aleš. MĚŘENÍ PARAMETRŮ OPTICKÝCH ČOČEK. Brno, 2011. Diplomová práce. VUT Brno.
- [42] YUN, Gang, KAVEHRAD, Mohsen. Spot-diffusing and fly-eye receivers for indoor infrared wireless communications. In: BHARGAVA, Vijay K, Michael CALLENDAR a Norman TOMS. 1992 IEEE International Conference on Selected Topics in Wireless Communications: conference proceedings, June 25-26, 1992, Vancouver, B. C., Canada. Piscataway, N. J., U.S.A.: IEEE, 1992, 262 - 265. ISBN 0-7803-0723-2.

Internetové zdroje:

- [43] Collimator. [online]. [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Collimator>.
- [44] Collimators. [online]. [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: http://www.trioptics.com/test_equipment/collimators/description.php.
- [45] ČSN EN 12464-1. [online]. [cit. 2014-03-18]. Dostupné z: http://www.technicke-normy-csn.cz/360450-csn-en-12464-1_4_69656.html.
- [46] Kolimátor. [online]. [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Kolim%C3%A1tor>.
- [47] LightTools. [online]. [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: <http://optics.synopsys.com/lighttools/>.
- [48] Zobrazení čočkami. [online]. [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: http://www.gymhol.cz/projekt/fyzika/06_zobr_rce/06_rovnice.htm.

Prilohy

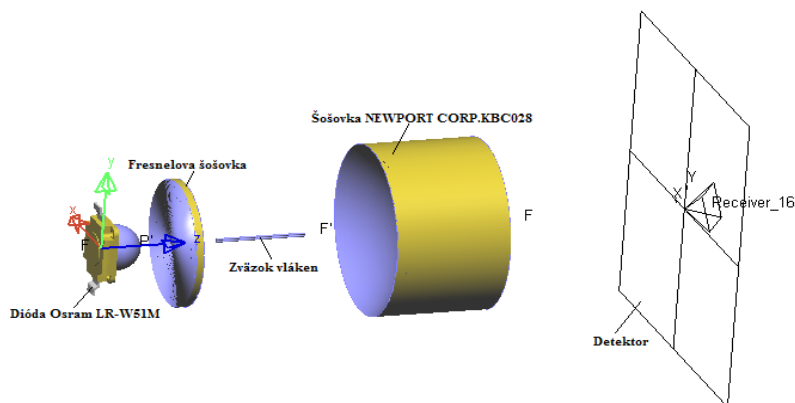
Zoznam príloh

Príloha A:	Vysielač tvorený zväzkom 3 optických vláken	VII
Príloha B:	Vysielač tvorený zväzkom 5 optických vláken	IX
Príloha C:	Vysielač tvorený plastovým vláknom POF 980/1000 μm	XI

Súčasťou DP je DVD.

Príloha A: *Vysielač tvorený zväzkom 3 optických vláken*

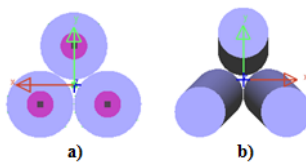
Model vysielača tvoreného zväzkom troch vláken (obrázok 1) sa v porovnaní s modelom vysielača tvoreným siedmimi vláknami nejavil ako vhodný, pretože rovnomerné rozloženie výkonu u tohto vysielača nebolo ideálne (obrázok 3 a obrázok 4). Preto je v tejto práci spomenutý len okrajovo, rozloženia výkonu sú zobrazené len pre rovnomerné usporiadanie vláken vo zväzku a s $0,5^\circ$ vychýlením (obrázok 2). Ako aj u vysielača tvoreného siedmimi vláknami, tak aj teraz sú použité vlákna MM 50/125 μm a 62,5/125 μm .



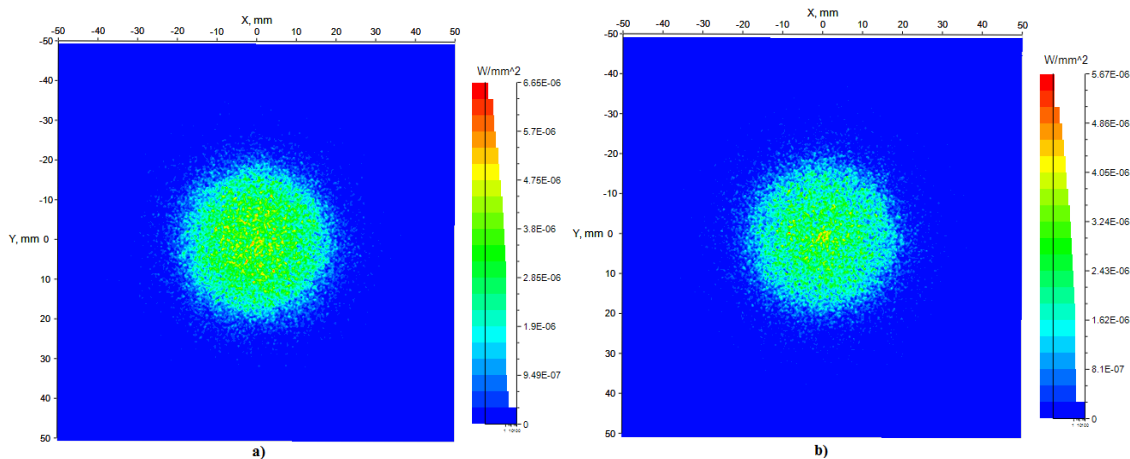
Obrázok 1: *Model vysielača tvoreného zväzkom 3 vláken*

Parametre jednotlivých komponent modelu sú nasledujúce:

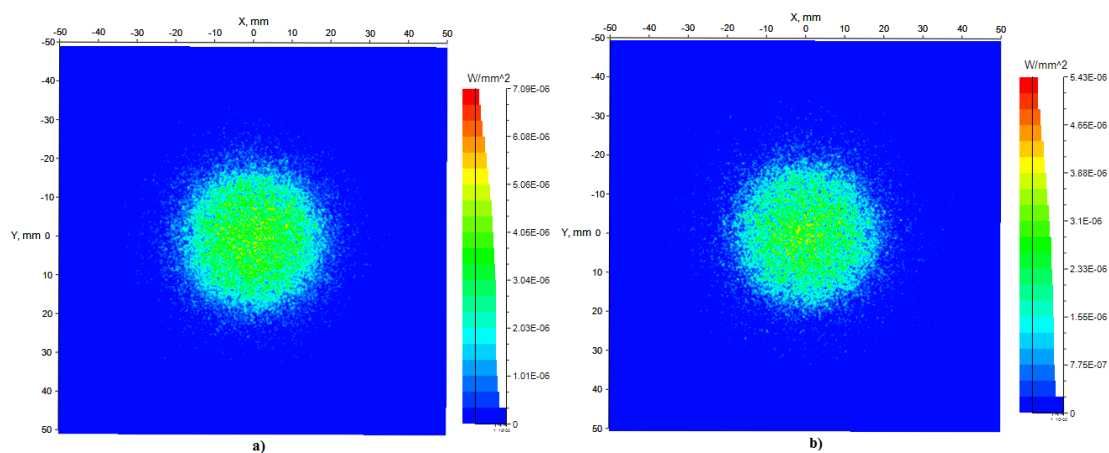
- Typ diódy – Osram LR-W51M, vyžarovací uhol 120° , vlnová dĺžka: 620-632 nm
- Použité vlákno – MM 50/125 μm (pre porovnanie tiež 62,5/125 μm), dĺžka= 10 mm
- Fresnelova šošovka – priemer=15 mm; hrúbka=1 mm, materiál=PMMA, ohnisková vzdialenosť=5 mm
- Šošovka – NEWPORT CORP. KBC028, priemer=12,7 mm; materiál=BK7, ohnisková vzdialenosť= - 12,5 mm



Obrázok 2: *Usporiadanie vláken vo zväzku – a) rovnomerné; b) vychýlené o $0,5^\circ$*



Obrázok 3: Rozloženie optického výkonu pre rovnomerné usporiadanie vláken – a) 50/125 μm ;
b) 62,5/125 μm

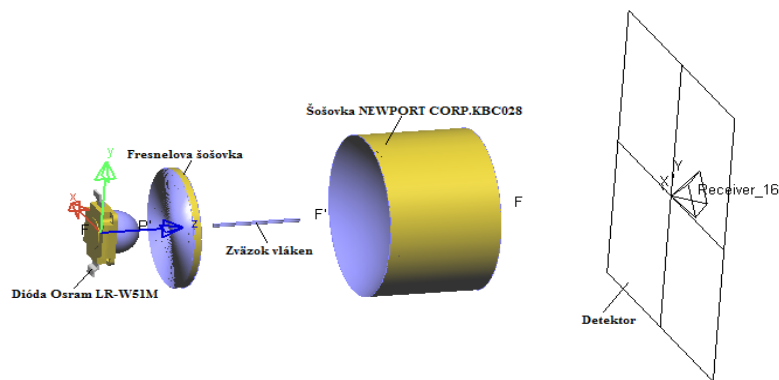


Obrázok 4: Rozloženie optického výkonu pre vlákna vychýlené o $0,5^\circ$ – a) 50/125 μm ;
b) 62,5/125 μm

Ako je z obrázkov 3 a 4 vidieť, rozloženie optického výkonu nieje rovnomerné, jeho hodnota zachytená detektorom je veľmi nízka. V porovnaní vláken je u zväzku vláken MM 50/125 μm úroveň výkonu vyššia ako u zväzku vláken 62,5/125 μm . Hodnota maximálneho výkonu je u zväzku vláken MM 50/125 μm $6,65\text{E-}06 \text{ W/mm}^2$, pri vychýlení vláken o $0,5^\circ$ je maximálna hodnota výkonu rovná $5,67\text{E-}06 \text{ W/mm}^2$. U zväzku vláken MM 62,5/125 μm je táto hodnota $7,09\text{E-}06 \text{ W/mm}^2$, a pri vychýlení o $0,5^\circ$ je maximálna hodnota výkonu $5,43\text{E-}06 \text{ W/mm}^2$. Priemer stopy je zhruba 5,5 cm.

Príloha B: *Vysielač tvorený zväzkom 5 optických vláken*

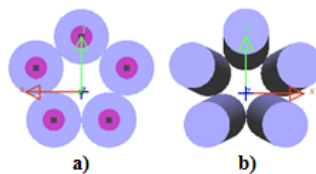
Model vysielača tvoreného zväzkom piatich vláken (obrázok 5) sa v porovnaní s modelom vysielača tvoreným zväzkom troch vláken javí výhodnejšie avšak v porovnaní s modelom vysielača tvoreného siedmimi vláknami sa nejavil ako vhodný, pretože rovnomerné rozloženie výkonu u tohto vysielača nebolo opäť ideálne (obrázok 7 a obrázok 8). Preto je v tejto práci spomenutý len okrajovo, rozloženia výkonu sú zobrazené len pre rovnomerné usporiadanie vláken vo zväzku a s $0,5^\circ$ vychýlením (obrázok 6). Znova sú použité vlákna MM 50/125 μm a 62,5/125 μm .



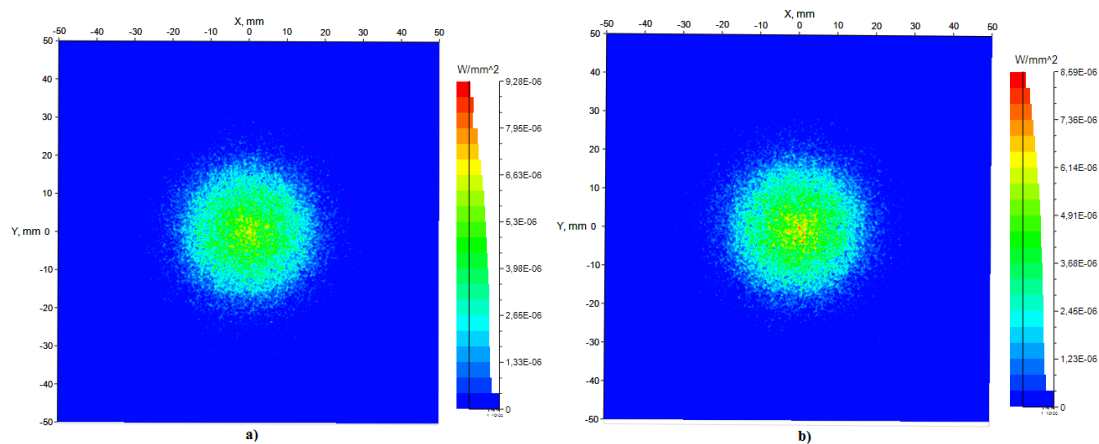
Obrázok 5: *Model vysielača tvoreného zväzkom 5 vláken*

Parametre jednotlivých komponent modelu sú nasledujúce:

- Typ diódy – Osram LR-W51M, vyžarovací uhol 120° , vlnová dĺžka: 620-632 nm
- Použité vlákno – MM 50/125 μm (pre porovnanie tiež 62,5/125 μm), dĺžka= 10 mm
- Fresnelova šošovka – priemer=15 mm; hrúbka=1 mm, materiál=PMMA, ohnisková vzdialenosť=5 mm
- Šošovka – NEWPORT CORP. KBC028, priemer=12,7 mm; materiál=BK7, ohnisková vzdialenosť= - 12,5 mm

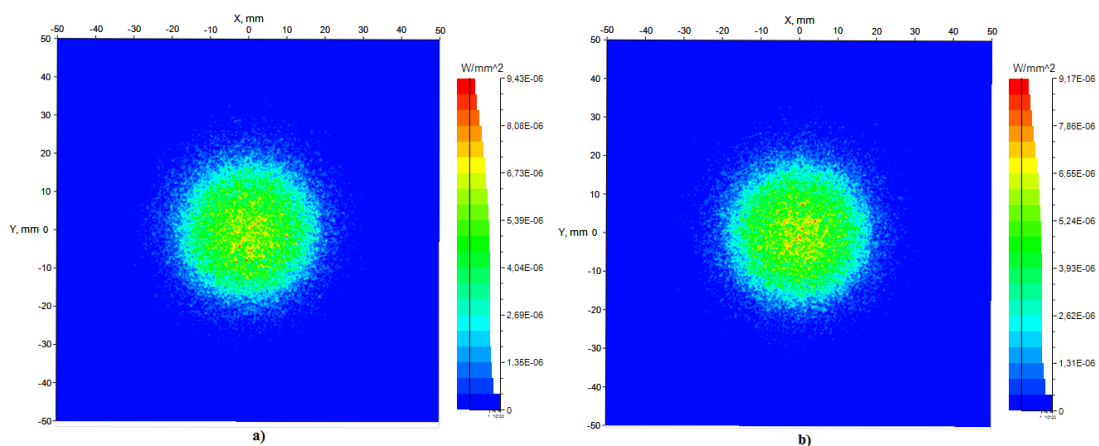


Obrázok 6: *Usporiadanie vláken vo zväzku – a) rovnomerné; b) vychýlené o $0,5^\circ$*



Obrázok 7: Rozloženie optického výkonu pre rovnomerné usporiadanie vlákien – a) 50/125 μm ;
b) 62,5/125 μm

Ako môžeme z obrázka 5 vidieť, u zväzku MM vlákien 62,5/125 μm sa uprostred stopy nachádzajú výkonové maximá, čiže rozloženie optického výkonu nieje rovnomerné. U zväzku vlákien 50/125 μm nie sú tieto maximá také intenzívne.

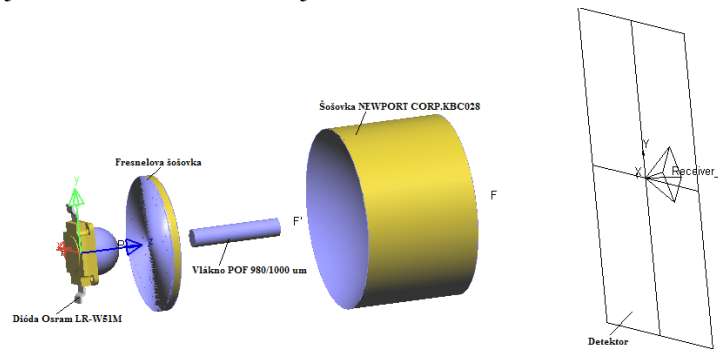


Obrázok 8: Rozloženie optického výkonu pre vlákna vychýlené o $0,5^\circ$ – a) 50/125 μm ;
b) 62,5/125 μm

S vychýľovaním vlákien dosiahneme rozloženie výkonových maxim tak, aby tvorili jedno veľké maximum uprostred stopy. Hodnota maximálneho výkonu je u zväzku vlákien MM 50/125 μm $9,28\text{E-}06 \text{ W/mm}^2$, pri vychýlení vlákien o $0,5^\circ$ je maximálna hodnota výkonu rovná $8,59\text{E-}06 \text{ W/mm}^2$. U zväzku vlákien MM 62,5/125 μm je táto hodnota $9,43\text{E-}06 \text{ W/mm}^2$, a pri vychýlení o $0,5^\circ$ je maximálna hodnota výkonu $9,17\text{E-}06 \text{ W/mm}^2$. Priemer stopy je zhruba 5,5 cm.

Príloha C: *Vysielač tvorený plastovým vláknom POF 980/1000 μm*

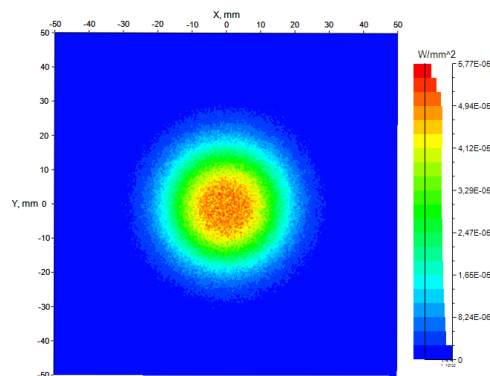
Model tohto vysielača tvoreného plastovým vláknom (obrázok 9) bol vytvorený pre porovnanie s klasickými vláknami MM 50/125 μm a 62,5/125 μm . Toto vlákno je optické vlákno, ktoré je zhotovené z polymerného materiálu. Väčšinou sa ako hlavný materiál pre jadro používa PMMA (akryl) a ako materiál pre obloženie jadra sa volia polyméry fluóru. Väčšina POF, ktoré sa používajú, má priemer 1000 μm , z čoho samotné jadro tvorí až 980 μm . Vlákná majú index lomu jadra 1,49 a 1,59 a vonkajší obal má index lomu 1,46.



Obrázok 9: *Model vysielača tvorený vláknom POF 980/1000 μm*

Parametre jednotlivých komponent modelu sú nasledujúce:

- Typ diódy – Osram LR-W51M, vyžarovací uhol 120°, vlnová dĺžka: 620-632 nm
- Použité vlákno – plastové optické vlákno POF 980/1000 μm , dĺžka= 10 mm
- Fresnelova šošovka – priemer=15 mm; hrúbka=1 mm, materiál=PMMA, ohnisková vzdialenosť=5 mm
- Šošovka – NEWPORT CORP. KBC028, priemer=12,7 mm; materiál=BK7, ohnisková vzdialenosť= - 12,5 mm



Obrázok 10: *Rozloženie optického výkonu u plastového vlákna POF 980/1000 μm*

Na obrázku 10 vidíme rozloženie optického výkonu u plastového vlákna. Toto rozloženie je symetrické, avšak uprostred stopy sú výkonové maxima, ktoré sú spôsobené interferenciou. Hodnota maximálneho výkonu u vlákna POF 980/1000 μm je 5,77E-05 W/mm². Môžeme však tvrdiť, že tento druh vlákna by mohol byť do budúcnosti veľmi dobrou voľbou pre konštrukciu optického vysielača založeného na optických vláknach.