



VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ–TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
VŠB–TECHNICAL UNIVERSITY OF OSTRAVA

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTER
SCIENCE



KATEDRA TELEKOMUNIKAČNÍ TECHNIKY
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

Studium vlivu zakončení optických vláken na distribuci světla v prostoru pro vláknové segmentové vysílače

Study of the Optical Fiber Ends Influence on Light Distribution in Space for Fiber Segment Transmitters

DIZERTAČNÍ PRÁCE
DISSERTATION THESIS

AUTOR PRÁCE

Ing. Jan LÁTAL

VEDOUCÍ PRÁCE

prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.

OSTRAVA, 2015

ABSTRAKT

Tato práce pojednává o možnostech využití optických vláken jako vysílačů pro mobilní optické bezvláknové sítě pro vnitřní použití technologií VLC (Visible Light Communications). VLC v současné době podporuje dvě hlavní funkcionality, osvětlení a komunikaci. Práce je systematicky rozdělena do několika kapitol. Jednotlivé kapitoly mají za cíl uvést do problematiky přístupu a návrhu optického segmentového vysílače. Práce je rozdělena na část teoretickou, která se věnuje na svém začátku úvodu do bezdrátových rádiových systémů až po postupný vývoj v oblasti komunikací a hledání alternativních možností budoucích komunikací a přechodu na optické bezvláknové komunikační systémy. U obou komunikačních technologií jsou uvedeny historické milníky a současný stav vývoje. V rámci dalších kapitol je pozornost soustředěna na optické bezvláknové systémy a jejich využití jako vysílačů. K tomu, aby se dala zvládnout problematika návrhu optického vysílače je využito softwarové aplikace LightTools. V softwarové aplikaci LightTools jsou studovány a simulovány vlastnosti, jak najít vhodné uspořádání segmentového optického vysílače do geometrického obrazce tvořeného optickými vlákny, volbu typu vlákna, počtu vláken, vychýlení vláken, zakončení vláken a v neposlední řadě i volba měření v prostoru. Všechny uvedené parametry musely v konečném důsledku splňovat kritérium efektivního pokrytí části místnosti s rovnoměrným rozložením optické intenzity v prostoru, kdy míra kolísání hustoty optického výkonu nepřesáhne 3 dB. Při volbě optického vlákna bylo zjištěno, že lepších parametrů z pohledu vykrytí plochy místnosti s rovnoměrným rozložením optické intenzity či výkonu bude dosaženo za pomoci mnohovidových optických vláken. Hlavní část práce se pak zabývá simulacemi v softwarové aplikaci LightTools ohledně návrhu modelů optických segmentových vysílačů na bázi optických vláken a vyhodnocením jejich optických parametrů. Simulované modely optických vysílačů jsou předlohou pro tvorbu reálných prototypů optických segmentových vysílačů proměřených v temné místnosti. Hlavním přínosem práce je pak simulace a konstrukce různých prototypů optických vysílačů pro rovnoměrné ozáření definované plochy. Práce ve svém závěru shrnuje hlavní přínosy a budoucí směr vývoje optických segmentových vysílačů na bázi optických vláken.

KLÍČOVÁ SLOVA

Optické bezvláknové sítě, LED, LD, vysílač, přijímač, optické vlákno, PDMS, infračervený přenos, mnohovidové vlákno, segment, osmina.

ABSTRACT

This thesis deals with possibilities of optical fibres utilization as transmitters for mobile indoor optical fibreless networks through the Visible Light Communications (VLC) technology. The VLC currently includes together two main functions, illumination and communication. This thesis is systematically divided in several chapters, individual chapters introduce approach and design of optical segment transmitter. The thesis is divided in the theoretical part, which at the beginning deals with the wireless radio systems State of Art, then with development in communications and its transition to optical fibreless communication systems. The historic milestones and current state of art are described for both communication technologies. In the following chapters, the attention is directly led to optical fibreless systems particularly with regard to optical fibres utilizing for transmitters construction. In order to manage the task of this complicated transmitter design, the software LightTools was used. In LightTools software were studied and simulated conditions how to find an usable arrangement of fibres in geometric pattern compound of optical fibres, choice of optical fibres types, number of optical fibres, a misalignment of optical fibres, shapes of optical fibres ends and finally choice of measurement in space. All these mentioned parameters had to, in the final consequence, fulfil the criterion of effective coverage of a part of room with uniform optical intensity distribution in space when the optical power fluctuation does not exceed 3 dB. During selection of used optical fibre was found that better parameters, from the point of view of uniform optical intensity distribution in space, were obtained with multi-mode optical fibres. The main thesis part is devoted to simulations. The model design of optical segment transmitter on the basis of optical fibres was created in the LightTools software, which was followed by evaluation of its optical properties. Designed models of optical transmitters were then ground for fabrication of real optical segment transmitters prototypes measured in the dark room. The pivotal assets of this thesis are then simulations and different prototypes fabrication of optical transmitters for uniform elimination of defined area. Thesis in its conclusion summarise main benefits and feasible future development directions of optical segment transmitters on the basis of optical fibres.

KEYWORDS

Optical wireless communications, LED, LD, transmitter, receiver, optical fiber, PDMS, infrared transmission, multimode fiber, segment, octant.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem svou dizertační práci na téma "Studium vlivu zakončení optických vláken na distribuci světla v prostoru pro vláknové segmentové vysílače" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího dizertační práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

Ostrava

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu dizertační práce panu prof. RNDr. Vladimíru Vašinkovi, CSc. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci, které vedly k jejímu zdárnému ukončení. Rovněž si vážím i lidského přístupu prof. Vašinka po celou dobu mého studia. Děkuji také svým kolegům za veškerou pomoc při řešení této práce, jejich myšlenky a nápady jsou rovněž zahrnuty v rámci práce a tím jí značně obohacují. Rovněž bych chtěl poděkovat doc. RNDr. Petru Hlubinovi, CSc. z Katedry fyziky naší univerzity za konzultace v oblasti geometrické optiky a prof. Ing. Dušanu Pudišovi, PhD. z Katedry fyziky, Fakulty elektrotechnické, Žilinské univerzity za pomoc při osvětlení problematiky polydimetylsiloxanu a Ing. Lukáši Rapantovi z národního superpočítačového centra IT4Innovations. V neposlední řadě bych chtěl rovněž poděkovat kolegům z firmy LightTec Dr. Quentinovi Kuperman-Le Bihan, Dr. Cyrille Porninovi a Dr. Martinovi Djiango za cenné rady při tvorbě modelu optického vysílače v programu LightTools a zároveň kolegům z firmy SQS vláknová optika a.s. Ing. Michaelovi Písaříkovi a Ing. Radomíru Hendrychovi za technologické zázemí.

Na závěr bych chtěl především vyjádřit své hluboké přesvědčení, že tato práce by nemohla vzniknout nebýt mé manželky Lenky, našeho malého syna Tomáška a rodiny, kdy mi všichni zajistili tolik nutné rodinné pohody a klidu pro její finální dokončení.

Práce vznikla rovněž za přispění několika vědeckých grantů: SP2011/135, SP2012/160, SP2013/88, SP2014/77, SP2015/182, GA102/06/1202, GA102/09/0550, TA03020439, TA04021263.

Ostrava

.....

(podpis autora)

Věnováno Vincencovi Látalovi

životní motto:

„Uč se, to neděláš pro nikoho jiného, jenom pro sebe!“

OBSAH

1 Úvod	16
2 Úvod do bezdrátových systémů založených na rádiových vlnách	17
2.1 Bezdrátové systémy založené na rádiových vlnách	17
2.2 Dílčí závěr k bezdrátovým systémům pracujících na rádiových vlnách . . .	23
3 Úvod do optických komunikačních systémů	25
3.1 Dílčí závěr k optickým komunikačním systémům	27
4 Úvod do problematiky vnitřních bezvláknových optických sítí	29
4.1 Bezpečnostní normy pro vnitřní osvětlovací systémy	30
4.2 Určení bezpečnosti vyzařovaného výkonu pro lidský zrak	31
4.3 Norma o osvětlování vnitřních prostor	32
4.4 Koncepty vnitřních bezvláknových optických sítí	33
5 Vnitřní optické bezvláknové sítě podle použitého spektra	35
5.1 Vnitřní optické bezvláknové sítě ve viditelné i neviditelné části spektra . .	36
6 Optické vysílače pro vnitřní optické bezvláknové sítě	39
6.1 Optické vysílače pro vnitřní optické bezvláknové sítě s nepřímou viditelností	39
6.1.1 Konvenční difúzní systém	39
6.1.2 Jednopásový vícesvazkový vysílač	40
6.1.3 Vícepásový vícesvazkový optický vysílač	40
6.1.4 Diamantový vícesvazkový vysílač	41
6.2 Optické vysílače pro vnitřní optické bezvláknové sítě s přímou viditelností .	42
7 Optické bezvláknové sítě s využitím optického vlákna jako vysílače	45
7.1 Studium problematiky návrhů architektury buňkového systému s využitím optických vláken	49
7.2 Shrnutí vnitřních bezvláknových sítí a jejich budoucnost	59
8 Cíle dizertační práce	61
9 Využití specializovaného programu pro řešení modelování a návrh optického vysílače	62
9.1 Softwarová aplikace LightTools	62
9.2 Funkce programu LightTools a jeho metody výpočtu	63
9.2.1 Metoda Monte Carlo	63
9.2.2 Metoda trasování paprsků	63
9.2.3 Metoda trasování dráhy paprsků	64

9.2.4	Nesequenční metoda trasování paprsků	64
10	Rozložení optické intenzity svazku vystupujícího z optického vlákna	65
10.1	Charakteristická rovnice slabě vedoucího vlákna	68
11	Popis základních světelně technických veličin a pojmů	70
11.1	Základní fotometrické veličiny	70
11.2	Základní radiometrické veličiny	72
11.3	Radiometrie optického detektoru	73
12	Úvod do řešení problematiky návrhu segmentu optického vysílače na bázi optických vláken	75
12.1	Měření a volba zdroje záření	78
12.2	Vytvoření výkonové LED diody v softwarové aplikaci LightTools	79
12.3	Volba optimalizace vazby zářivý zdroj optické vlákno	81
12.4	Obecné řešení optimalizace vazby zářivý zdroj do optického vlákna či vláken	82
12.5	Metody tvarování optického svazku	85
12.5.1	Teorie tvarování svazku	88
12.5.2	Teorie tvarování svazku na Top-Hat svazek	90
12.5.3	Popis Top-Hat svazku	92
12.6	Volba optického vlákna pro zhotovení prototypu segmentu optického vysílače na bázi optických vláken	94
12.7	Volba počtu optických vláken v segmentu	95
12.8	Inovativní řešení konců optických vláken pomocí PDMS (polydimetylsiloxanu)	100
12.8.1	Sylgard 184	102
12.8.2	Vlastnosti polydimetylsiloxanu	102
12.8.3	Typické, mechanické a elektrické vlastnosti	102
12.8.4	Optické vlastnosti	103
12.8.5	Postup výroby PDMS a nanesení na konce optických vláken	104
12.8.6	Volba zakončení optických vláken pro dosažení rovnoměrného rozložení světla	105
12.8.7	Měření numerické apertury optického vlákna S105/125-22A s a bez čoček	106
12.9	Návrh plochy pro vyhodnocení rovnoměrného rozložení optické intenzity a volba místnosti pro měření	109
13	Zhodnocení výsledků ze simulací a reálného měření prototypů optických segmentových vysílačů	112
13.1	Výsledky ze simulace návrhu optického segmentového vysílače pro 7 vláken	115
13.2	Výsledky ze simulace návrhu optického segmentového vysílače pro 19 vláken	122

13.3	Dílčí závěr z výsledků ze simulace návrhu optického segmentového vysílače pro 7 a 19 vláken	129
13.4	Výsledky z reálného měření návrhu optického segmentového vysílače pro 7 a 19 vláken	130
13.5	Dílčí závěr z výsledků z reálného měření a návrhu optického segmentového vysílače pro 7 a 19 vláken	135
14	Závěr	137
	Literatura	143
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	158
	Publikační činnost	167
	Seznam příloh	178
	A Fotografie z měření	179
	B Simulace dalších typů optických segmentových vysílačů	185

SEZNAM OBRÁZKŮ

3.1	Schématické rozdělení optických komunikačních systémů	27
4.1	Koncepty vnitřních bezvláknových optických sítí mezi vysílačem (V) a přijímačem (P)[32]	34
6.1	Konvenční difúzní systém	39
6.2	Jednopásový vícesvazkový vysílač	40
6.3	Vícepásový vícesvazkový vysílač	41
6.4	Diamantový vícesvazkový vysílač	41
6.5	Různé konfigurace umístění vysílačů [49]	43
6.6	Počítačem generovaný hologram [53]	44
7.1	Optické ukončení vlákna se specifikovaným rozdílem podél různě vytaženého vlákna, [56]	46
7.2	Schématický diagram ztrátového vlnovodu s D-profilem využitý jako vysílač, [30]	46
7.3	Struktura vysílače pro vzestupný směr umístěného na stropě, [57]	47
7.4	Upřesnění pozice ukončení optického vlákna a buněk [58]	47
7.5	Jednoduchý návrh struktury vysílače pro systém v sestupném směru [58]	48
7.6	Schéma návrhu vysílače pro vzestupný směr při simulaci, [58]	48
7.7	Experimentální zapojení optické bezvláknové sítě, [58], [59]	49
7.8	Experimentální zapojení optické bezvláknové sítě na bázi POF vláken, [65], [66]	51
7.9	Topologie optické bezvláknové sítě založené na využití stropních vysílačů, [72]	52
7.10	Experimentální zapojení optické bezvláknové sítě-směr sestupný, [77]	53
7.11	Experimentální zapojení optické bezvláknové sítě-směr vzestupný, [77]	53
7.12	Experimentální zapojení obousměrné optické bezvláknové sítě IWON, [77]	54
7.13	Prvotní verze IWON systému, [77]	54
7.14	Systém optického vysílače a přijímače na bázi vláken s mikro-čočkami, [88]	57
7.15	Experimentální zapojení směrovaného optického vysílače a přijímače, [90]	58
7.16	Optický fázový vysílač (QPM-LN) pro komunikaci ve viditelném spektru, [98]	59
11.1	Závislost proudové citlivosti na vlnové délce	74
12.1	Zapojení pro měření spektrální charakteristiky LED HPA8b-43K5GAx	78
12.2	Spektrum výkonové LED diody HPA8b-43K5GAx	79
12.3	Návrh výkonové LED diody HPA8b-43K5GAx v softwarové aplikaci LightTools	79
12.4	Spektrum výkonové LED diody HPA8b-43K5GAx v softwarové aplikaci LightTools získané v reálného měření	80
12.5	Spektrum výkonové bílé LED diody v softwarové aplikaci LightTools	80

12.6	Optické parametry achromatické čočky EDMUND OPTICS VIS-NIR Coated, Achromatic Lens #49-321	81
12.7	Vybraná čočka EDMUND OPTICS MgF2 Coated, Achromatic Doublet Lens #45-209 v softwarové aplikaci LightTools	82
12.8	Analýza chování vazebních podmínek pro vlákno/vlákna	82
12.9	Základní problém tvarování optického svazku	85
12.10	Tvarování svazku pomocí apertury či metody malého otvoru [138]	86
12.11	Princip činnosti mapovače polí pro úpravu tvaru svazku [137]	86
12.12	Princip činnosti integrátoru pro úpravu tvaru svazku [138]	87
12.13	Tvarování Gaussovského svazku [137], [138]	88
12.14	Simulované výstupní Top-Hat svazky pro různá β_s (a) $\beta_s=4$, (b) $\beta_s=8$, (c) $\beta_s=16$	90
12.15	Profil optických intenzit Gaussova a Top-Hat svazku	90
12.16	Příklad rozdělení jednotlivých oblastí energie u Gaussovského svazku a Top-Hat svazku	91
12.17	Příklad rozdělení jednotlivých oblastí energie u Gaussovského svazku a Top-Hat svazku	91
12.18	Příklad rozdělení jednotlivých oblastí energie u Gaussovského svazku a Top-Hat svazku	92
12.19	Vytvoření Top-Hat svazku z Gaussovského svazku	93
12.20	Rozvržení vláken do kruhu při tvorbě segmentu tvořeného 7 optickými vlákny typu S105/125-22A	96
12.21	Rozvržení vláken do kruhu při tvorbě segmentu tvořeného 19 optickými vlákny typu S105/125-22A	96
12.22	Reálné uspořádání vazby zářivý zdroj do SMA905 konektoru pro segmentový vláknový vysílač	97
12.23	Řez osou x pro optický svazek dopadající na čelo SMA905 konektoru pro segmentový vláknový vysílač ze softwaru LightTools	98
12.24	Řez osou y pro optický svazek dopadající na čelo SMA905 konektoru pro segmentový vláknový vysílač ze softwaru LightTools	98
12.25	Vazební podmínky pro SMA905 konektor (s průměry ferule 410 μm či 630 μm) pro segmentový vláknový vysílač ze softwaru LightTools	99
12.26	Analýza vazebních podmínek pro segmentový vláknový vysílač ze softwaru LightTools a optický svazek dopadající na čelo SMA905 konektoru (s průměrem ferule 410 μm)	100
12.27	Analýza vazebních podmínek pro segmentový vláknový vysílač ze softwaru LightTools a optický svazek dopadající na čelo SMA905 konektoru (s průměrem ferule 630 μm)	100
12.28	Organický substinent je většinou reprezentován metylem (CH_3)	101

12.29	Návrh simulace rovného zakončení optických vláken v rámci segmentu tvořeného 19 vlákny	105
12.30	Návrh simulace využití PDMS zakončení optických vláken v rámci segmentu tvořeného 19 vlákny	106
12.31	Vizuální kontrola konců optických vláken pomocí mikroskopu s PDMS pro vlákno průměru jádra 105 μm a pláště 125 μm	107
12.32	Měření velikosti čoček z PDMS pro vlákno Nufern S105/125-22A	107
12.33	Numerická apertura optického vlákna	107
12.34	Zařízení pro měření numerické apertury optických vláken	108
12.35	Měření numerické apertury optického vlákna s rovným zakončením a s čočkou	109
12.36	Umístění optického segmentového vysílače v místnosti	110
12.37	Model osminy koule simulující plochu rohu místnosti	110
12.38	Model poloviny koule s výřezem na osminu simulující plochu umístění vysílače v rohu místnosti	111
13.1	Zobrazení uspořádání počátků vláken v segmentu a jejich označení	113
13.2	Schéma modelu simulace optického segmentového vysílače vůči detekční ploše poloviny koule pro vyhodnocení simulovaných dat	114
13.3	Zobrazení řezů skrze definovanou plochu pro vyhodnocení míry kolísání výkonové hustoty	114
13.4	Výsledky ze simulací pro změnu rozložení optické intenzity na detektoru poloviny koule pro 7 vláken bez čoček při zarovnání do roviny	115
13.5	Výsledky ze simulací pro změnu rozložení optické intenzity bez a s vložením detektoru osminy koule pro 7 vláken bez čoček při zarovnání do roviny	116
13.6	Výsledky ze simulací pro změnu rozložení optické intenzity bez a s vložením detektoru osminy koule pro 7 vláken bez čoček při zarovnání do roviny v řezu	117
13.7	Výsledky ze simulací pro změnu zářivosti pro 7 vláken bez čoček při zarovnání do roviny	117
13.8	Výsledky ze simulací pro rozložení intenzity na detektoru poloviny koule pro 7 vláken s čočkami při zarovnání do roviny	118
13.9	Výsledky ze simulací pro změnu rozložení optické intenzity bez a s vložením detektoru osminy koule pro 7 vláken s čočkami při zarovnání do roviny	118
13.10	Výsledky ze simulací pro změnu rozložení optické intenzity bez a s vložením detektoru osminy koule pro 7 vláken s čočkami při zarovnání do roviny v řezu	119
13.11	Výsledky ze simulací pro změnu zářivosti pro 7 vláken s čočkami při zarovnání do roviny	119
13.12	Výsledky ze simulací pro těžnice (t_1 , t_2 a t_3) u 7 vláken bez a s čočkami při zarovnání do roviny	120

13.13	Výsledky ze simulací těžnic (t_1 , t_2 a t_3) pro 7 vláken bez a s čočkami při zarovnání do roviny	121
13.14	Výsledky ze simulací pro změnu rozložení optické intenzity na detektoru poloviny koule pro 19 vláken bez čoček při zarovnání do roviny	122
13.15	Výsledky ze simulací pro změnu rozložení optické intenzity bez a s vložením detektoru osminy koule pro 19 vláken bez čoček při zarovnání do roviny . .	123
13.16	Výsledky ze simulací pro změnu rozložení optické intenzity bez a s vložením detektoru osminy koule pro 19 vláken bez čoček při zarovnání do roviny v řezu	124
13.17	Výsledky ze simulací pro změnu zářivosti pro 19 vláken bez čoček při zarovnání do roviny	124
13.18	Výsledky ze simulací pro rozložení intenzity na detektoru poloviny koule pro 19 vláken s čočkami při zarovnání do roviny	125
13.19	Výsledky ze simulací pro změnu rozložení optické intenzity bez a s vložením detektoru osminy koule pro 19 vláken s čočkami při zarovnání do roviny . .	125
13.20	Výsledky ze simulací pro změnu rozložení optické intenzity bez a s vložením detektoru osminy koule pro 19 vláken s čočkami při zarovnání do roviny v řezu	126
13.21	Výsledky ze simulací pro změnu zářivosti pro 7 vláken s čočkami při zarovnání do roviny	126
13.22	Výsledky ze simulací pro těžnice (t_1 , t_2 a t_3) u 19 vláken bez a s čočkami při zarovnání do roviny	127
13.23	Výsledky ze simulací těžnic (t_1 , t_2 a t_3) pro 19 vláken bez a s čočkami při zarovnání do roviny	128
13.24	Schématický obrázek při měření s prototypy optických segmentových vysílačů	130
13.25	Výsledky z reálného měření rozložení optického výkonu pro těžnice (t_1 , t_2 a t_3) pro 7 vláken bez a s čočkami při zarovnání do roviny	131
13.26	Výsledky z reálného měření rozložení optického výkonu pro těžnice (t_1 , t_2 a t_3) pro 7 vláken bez a s čočkami při zarovnání do roviny	132
13.27	Výsledky z reálného měření rozložení optického výkonu pro těžnice (t_1 , t_2 a t_3) pro 19 vláken bez a s čočkami při zarovnání do roviny	133
13.28	Výsledky z reálného měření rozložení optického výkonu pro těžnice (t_1 , t_2 a t_3) pro 19 vláken bez a s čočkami při zarovnání do roviny	134
A.1	Pracoviště pro vrtání otvorů do výřezu z polystyrénu pro uchycení optických vláken v rámci segmentu	179
A.2	Detail na pracoviště pro nanášení PDMS na rovinné konce optických vláken	180
A.3	Celkový pohled na pracoviště pro nanášení PDMS na rovinné konce optických vláken	180
A.4	Výstředování prototypu segmentu optického vysílače se 7 vlákny vůči středu osminy koule pomocí laseru	180

A.5	Sestrojené pracoviště s 1/8 koule připevněnou na stativ STABILA 18194 pro měření optického výkonu	181
A.6	Boční pohled na prototyp optického vysílače tvořeného 7 optickými vlákny	182
A.7	Fotografie z měření rozložení optického výkonu na osmině koule pro optický vysílač tvořený 7 optickými vlákny bez čoček	182
A.8	Fotografie z měření rozložení optického výkonu na osmině koule pro optický vysílač tvořený 7 optickými vlákny s čočkami	183
A.9	Boční pohled na prototyp optického vysílače tvořeného 19 optickými vlákny	183
A.10	Fotografie z měření rozložení optického výkonu na osmině koule pro optický vysílač tvořený 19 optickými vlákny bez čoček	184
A.11	Fotografie z měření rozložení optického výkonu na osmině koule pro optický vysílač tvořený 19 optickými vlákny s čočkami	184
B.1	Výsledky ze simulací rozložení optické intenzity pro těžnice (t_1 , t_2 a t_3) pro 7 vláken bez a s čočkami při zarovnání do oblouku	185
B.2	Výsledky ze simulací rozložení optické intenzity pro těžnice (t_1 , t_2 a t_3) pro 19 vláken bez a s čočkami při zarovnání do oblouku	186
B.3	Výsledky ze simulací rozložení optické intenzity pro těžnice (t_1 , t_2 a t_3) pro 7 vláken bez a s čočkami při zarovnání do oblouku	188
B.4	Výsledky ze simulací rozložení optické intenzity pro těžnice (t_1 , t_2 a t_3) pro 19 vláken bez a s čočkami při zarovnání do oblouku	189

SEZNAM TABULEK

4.1	Limity emitovaného výkonu ze zdroje optického záření [26]	31
11.1	Radiometrické a fotometrické veličiny a jednotky	70
12.1	Srovnání parametrů křemenných vláken [134]	94
12.2	Typické vlastnosti Sylgardu 182 a 184 [141]	102
12.3	Mechanické vlastnosti Sylgardu 182 a 184 [141]	103
12.4	Elektrické vlastnosti Sylgardu 182 a 184, [141]	103
12.5	Porovnání optických vlastností materiálů nejčastěji používaných ve foto- nických komunikacích z pohledu indexu lomu, [134],[141],[142],[143]	104
B.1	Úhly vychýlení pro optická vlákna pro segment tvořený 7 optickými vlákny	187
B.2	Úhly vychýlení pro optická vlákna pro segment tvořený 19 optickými vlákny	189

1 ÚVOD

Dnešní doba je silně poznamenána touhou lidí po informacích a jejich dostupností všude, kde se nacházejí. Bezdrátová komunikace se již od svého počátku stala progresivní telekomunikační technologií. Velkou výhodou bezdrátových technologií je mobilita, která dává možnost se volně pohybovat a přitom neztratit kontakt se sítí potažmo s informacemi. S příchodem nových telekomunikačních služeb a nových bezdrátových datových sítí, které umí přenášet velké objemy dat, se tyto technologie staly velice preferovanými. Avšak s rostoucím budováním bezdrátových technologií se rovněž rychle vyčerpaly možnosti rádiového spektra. Jednotlivé bezdrátové technologie mají svá přidělená kmitočtová pásma, dány mezinárodními telekomunikačními instituty či národními telekomunikačními úřady. Licenční pásma jsou drahá a jejich nákup se vyplatí pouze velkým telekomunikačním společnostem. V oblasti bezlicenčního pásma se setkáváme s velkým zarušením a hustotou bezdrátových technologií pracujících v tomto pásmu. Velcí poskytovatelé internetového připojení řeší nové optické páteřní sítě, zatímco malí poskytovatelé se soustředili v minulosti právě na využití některé z bezdrátových technologií, především z důvodu finančních nároků na vytvoření jejich infrastruktury.

V dnešní době je velký počet bezdrátových technologií, které mezi sebou sdílejí stejná kmitočtová pásma, což s sebou přináší nejen jeden problém. Tím nejzásadnějším je zasahování do stejných kanálů mezi nejbližšími bezdrátovými technologiemi, vysílaný výkon a také bezpečnost přenášených informací.

Velice zajímavou technologií se staly bezvláknové optické sítě pro vnější i vnitřní použití. Zatímco u vnějších bezvláknových technologií může být rychlost až $10 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$, tak u vnitřních bezvláknových technologií jsme byli donedávna omezeni (přenosové rychlosti, dosah atd.). S příchodem nových optických vysílačů a typů modulačních formátů v kombinaci s kvalitními zdroji záření se rychlosti i pro vnitřní bezvláknové optické sítě pohybují v řádech jednotek $\text{Gb}\cdot\text{s}^{-1}$. Tato práce se zabývá vybranými aspekty vnitřních bezvláknových optických sítí, které mají perspektivu stát se v budoucnu dalším komunikačním nástrojem.

2 ÚVOD DO BEZDRÁTOVÝCH SYSTÉMŮ ZALOŽENÝCH NA RÁDIOVÝCH VLNÁCH

V současné době rapidně narůstá počet zařízení a osobních počítačů, které využívají ke své činnosti vzdálenou komunikaci a koncentrují se ve vnitřních či venkovních prostorách. S vývojem telekomunikačních služeb a systémů vzrůstají požadavky koncových uživatelů na stabilitu, mobilitu a kvalitu poskytovaných služeb. Stabilitu můžeme definovat jako dostatečné pokrytí dané lokality operátorem. Mobilita je určena technologií, pomocí které jsou poskytovány telekomunikační služby a kvalita je svázána s dostatečnou kapacitou sítě a souborem parametrů QoS (Quality of Service). Bezdrátové systémy mají za sebou několik let vývoje, kdy v počátcích fungovaly jako komunikační nástroj, až s postupem času se začaly využívat i pro přenos dat. V následující kapitole bude v krátkosti shrnut vývoj v oblasti rádiových bezdrátových systémů.

2.1 Bezdrátové systémy založené na rádiových vlnách

Je to již dlouho, co se používají bezdrátové systémy založené na rádiových vlnách [1]. Tyto rádiové vlny se dělí do několika skupin, dle frekvenčního rozpětí a to na [1], [2]:

- Extrémně dlouhé vlny ELF (Extremely Low Frequency) - o frekvencích 300 Hz až 3 kHz.
- Velmi dlouhé vlny VLF (Very Low Frequency) - o frekvencích 3 až 30 kHz. Použití v námořní a letecká navigace či pro meteorologické služby.
- Dlouhé vlny LF (Low Frequency) - mají frekvence 30 až 300 kHz. Použití pro rozhlasové dlouhé vlny, radiokomunikace, meteorologické služby.
- Střední vlny MW (Medium Wave) - Střední vlny mají frekvence 0,3 až 3 MHz a běžně se používají k přenosu rozhlasového vysílání, radionavigaci a komunikaci na malé a střední vzdálenosti.
- Krátké vlny - nebo také SW (Short Wave) jsou kmitočty o frekvencích 3 až 30 MHz. Radiokomunikace na střední a velké vzdálenosti, rozhlasové krátké vlny, amatérská pásma.
- Velmi krátké vlny - VHF (Very High Frequency) jsou kmitočty o frekvencích 30 až 300 MHz. Na těchto vlnách se vysílá frekvenčně modulované rozhlasové vysílání a některé televizní kanály (I., II. a III. tel. pásmo).
- Ultra krátké vlny - UHF (Ultra High Frequency) o frekvencích 0,3 až 3 GHz. Vysílají se na nich další televizní kanály (IV. a V. pásmo) a digitální televize. Pracují zde i další radiokomunikační služby (mobilní telefony).
- Super krátké vlny - SHF (Super High Frequency) frekvence 3 až 30 GHz. Zde řadíme např. radiolokace, radioreléové spoje, telekomunikace a satelitní spojení.
- Extrémně krátké vlny - EHF (Extremely High Frequency) frekvenční rozpětí 30 až 300 GHz. Pásmo určené především pro přistávací a říční radiolokátory, letecké

výškoměry, radary.

Postupem času začal růst význam bezdrátových sítí, a to především díky rozvoji telekomunikačních služeb a požadavků od koncových uživatelů na mobilitu a flexibilitu. Právě mobilita a flexibilita se staly dnešním fenoménem, kdy každý zákazník požaduje dostupnost signálů, ať je kdekoliv a v dostatečné kvalitě. I v praxi se ukázala výhoda využívání bezdrátových systémů lepší, neboť oproti pevným sítím nabízely úsporu peněz při budování infrastruktury, efektivnější provoz a využívání sítě či dostupnost sítě v dané lokalitě. S příchodem mobilní technologie přišlo masivní rozšíření bezdrátových sítí. Vývoj mobilních digitálních sítí začal v 80. letech 20. století, kdy byla pod hlavičkou organizace CEPT (European Conference of Postal and Telecommunications Administrations) zformována skupina GSM (Global System for Mobile Communications) mající na starosti vývoj celoevropského standardu pro digitální mobilní komunikaci.

Zodpovědnost za vydávání standardů přešla koncem 80. let na Evropský standardizační institut ETSI (European Telecommunications Standards Institute) [3]. Mobilní sítě od svého začátku neměly povahu datovou jako spíše komunikační. Postupem času se však rychle změnil postoj k datovým přenosům v mobilních sítích. První mobilní sítě označované jako GSM fáze jedna (Phase One) nebo jako 2G generace pracují ve frekvenčním pásmu s primární frekvencí 900 MHz a sekundární frekvencí na 1800 MHz [2]. Tato mobilní síť GSM fáze jedna poskytovala primárně hlasové služby, ale dokázala poskytovat i okruhové orientované datové přenosy CSD (Circuit Switched Data) do $9,6 \text{ kb}\cdot\text{s}^{-1}$.

Mobilní síť GSM fáze dva (Phase Two) s použitím speciální komprese a kvalitního signálu dosahovala rychlost pro datové přenosy až $14,4 \text{ kb}\cdot\text{s}^{-1}$. Dalším vývojovým krokem v GSM byla implementace technologie HSCSD (High-Speed Circuit-Switched Data) do GSM sítí. Technologie je založena na přepojování okruhů, umožňuje sdružovat a používat více časových slotů TS (Time Slot) současně. Teoretická rychlost přenosu dat se pohybuje až na hranici $115 \text{ kb}\cdot\text{s}^{-1}$ (využití všech 8 slotů) v jednom směru. V praxi je možno však dosáhnout rychlosti kolem $43,2 \text{ kb}\cdot\text{s}^{-1}$ [4]. Nicméně, stále se jednalo o okruhově orientovaný přenos nevhodný pro IP (Internet Protocol) komunikaci.

Jako první, cíleně datovou mobilní síť lze označit síť GPRS (General Packet Radio Service). GPRS služba je označována za 2,5 generaci GSM. Služba GPRS zavádí paketové přenosy do mobilních sítí. Zavedení této služby vyžadovalo mnohem rozsáhlejší a nákladnější zásahy nejen do struktury GSM sítě, ale také do mobilních zařízení. V rámci GPRS již dochází k efektivnímu přidělování přenosových prostředků, tzn., že přenosové prostředky jsou mobilní stanicí přiděleny pouze tehdy, pokud má data k odeslání nebo pokud přijímá data. GPRS nemění modulační formát a zůstává u GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying), ale zavádí tzv. kódovací schémata CS (Code Scheme), které na základě síly dosaženého mobilního signálu a vytížení základnové stanice v dané lokalitě upravuje přenosovou rychlost na základě vybraného CS1–CS4 pro jeden časový slot. Při nejhorších podmínkách a velkém zatížení základnové stanice má CS-1 jednoho časového slotu teoretickou přenosovou rychlost $9,05 \text{ kb}\cdot\text{s}^{-1}$. Pokud by GPRS mohlo využít ma-

ximální počet 8 časových slotů současně, pak by to při optimálních podmínkách šíření signálu, kdy lze použít kódovací schéma CS-4, odpovídalo rychlosti $8 \times 21,4 \text{ kb}\cdot\text{s}^{-1}$, což je $171,2 \text{ kb}\cdot\text{s}^{-1}$ [3], [5].

Technologie EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution) představuje další krok na cestě k mobilním sítím nové generace označovanou jako 2,75G s výraznou podporou datových přenosů. Tato síť vychází ze sítě GSM. U této technologie se mění typ použité modulace z GMSK na 8-PSK (Phase Shift Keying), což jinými slovy znamená, že přenášený symbol je vyjádřen 3 bity a přenosová rychlost tak vzroste 3x. Stejně jako u GPRS technologie i zde jsou definována kódová schémata MSC (Modulation and Coding Schemes). Tyto MSC se dále dělí podle způsobu opravy chyb v přenosu. Tato technologie umožňuje na stávajících GSM sítích dosáhnout teoretických přenosových rychlostí až $473,6 \text{ kb}\cdot\text{s}^{-1}$. Maximální dosažitelná užitečná přenosová rychlost je $384 \text{ kb}\cdot\text{s}^{-1}$ [6], [7].

Mezním krokem kupředu v mobilních datových sítích bylo uvedení technologie UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) označované jako 3G. UMTS používá pro přístup WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access). V roce 1998 je standardizován organizací 3GPP (3rd Generation Partnership Project) a je evropským standardem, který splňuje požadavky ITU-T (International Telecommunications Union) IMT-2000 pro mobilní buňkové sítě třetí generace. v roce 1992 organizace ITU-T stanovila pro systémy 3G frekvenční pásma [8], [9]:

- párové pásmo - 1920 až 1980 MHz a 2110 až 2170 MHz,
- nepárové pásmo - 1910 až 1920 MHz a 2010 až 2025 MHz.

K těmto frekvenčním pásmům z roku 1992, byla v roce 2000 přidána další tři pásma: 806 až 960MHz, 1710 až 1885 MHz, a 2500 až 2690 MHz. Nicméně v rámci Evropy je použitelné pouze třetí pásmo, jelikož první a druhé frekvenční pásmo je již obsazeno technologií GSM.

V roce 1999 dokončila organizace ETSI normu pro UMTS fáze jedna (verze '99, verze 3) a další verze následovaly záhy po ní. Skupina okolo 3GPP vydává nové verze specifikací technologie UMTS (současnosti se připravuje verze 11 a 12), které přináší do UMTS modifikace vedoucí k vyšší přenosové rychlosti, lepší propustnosti sítě či rozšířenou servisní přepojovací vrstvu pro IP služby mezi státy. UMTS využívá pro duplexní přenos jak FDD (Frequency Division Duplex) pro párové pásmo tak TDD (Time Division Duplex) pro pásmo nepárové [4], [5]. Pro FDD byla zvolena přístupová metoda WCDMA, kdežto pro TDD přístupová metoda TD-CDMA (Time Division CDMA).

První verze UMTS (verze '99) poskytovala pomocí přepojování okruhů rychlost $64 \text{ kb}\cdot\text{s}^{-1}$, a pomocí přepojování pomocí paketů až $384 \text{ kb}\cdot\text{s}^{-1}$, což je rychlost, jež umožňovala i technologie EDGE. Avšak horší parametry a nemožnost využít lepších přenosových rychlostí vedlo k vydání nové verze UMTS (verze 4), která do sebe implementovala lépe možnosti EDGE a nových služeb. Přelomovou verzí v oblasti datových přenosů u UMTS technologie byla verze 5 označována jako HSDPA (High Speed Downlink Packet Access), v rámci které přenosová rychlost směrem k uživateli dosahuje až $14 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ (maximální

teoretická rychlost na jednu buňku). Předpokládá se, že mobilní terminály budou schopny využít ve směru k uživateli $1,1 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ a od uživatele $384 \text{ kb}\cdot\text{s}^{-1}$. Podstatnou výhodou této verze bylo lepší řízení výkonové úrovně mezi účastníky. Tuto technologii v rámci telekomunikací označujeme někdy i jako 3,5G. Další verze 6 přináší sebou rozšíření přenosových rychlostí, tentokrát však ne směrem k uživateli (teoretická přenosová rychlost $14 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$), ale spíše směrem od uživatele, na rychlost až $5,76 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$. Toho se dosáhlo díky implementaci nové technologie zvané HSUPA (High Speed Uplink Packet Access). Název HSUPA byl vytvořen společností Nokia. Verze 6 umožňuje, jak HSDPA, tak i HSUPA jde o hybrid, který nese sebou i označení v telekomunikacích na technologii 3,75G. Verze 7 až 9 se zabývá implementací HSPA+, jenž poskytuje teoretickou přenosovou rychlost k uživateli až $672 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ a od uživatele $168 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$. Technicky se to řeší za pomoci implementace více anténní techniky zvané MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) a využití lepší modulační techniky 64 QAM (Quadrature Amplitude Modulation) či kombinací více buněk do jedné velké buňky, kterou nazýváme jako HSPA+DC (HSPA+Dual-Cell či Dual Carrier). Nicméně se jedná o čistě teoretické přenosové rychlosti. V reálných podmínkách jsme omezeni atmosférickým přenosovým prostředím, kde se šíří rádiové vlny, a také vytížením buňky v daném sektoru.

Verze 8 z roku 2008 přináší novou technologii na poli mobilních sítí a to LTE (Long Term Evolution) označovanou jako 4G. Teoretická přenosová rychlost dosažitelná touto technologií v mobilních komunikacích by měla být až $100 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ (20 MHz kanál) ve směru k uživateli (downlink) a $50 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ (20 MHz kanál) ve směru od uživatele (uplink) s minimální latencí kolem 10 ms, ačkoliv inter-system HO značně latenci zvýší (až 500 ms). Celkový koncept byl navržen pro dynamicky měnící se šířku přenosového kanálu kolísající mezi 1,25 MHz až 20 MHz, OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) multiplex pro downlink, SC-FDMA (Single Carrier-Frequency Division Multiple Access) pro uplink a MIMO anténní systém. Maximální možná rychlost pohybu koncového uživatele oproti GSM vzrůstá z $250 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ na $350 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Verze 10 vydaná v prvním kvartálu roku 2011 přinesla sebou vylepšenou verzi LTE Advanced, která je plně kompatibilní s verzí 8 a HSDPA-MC (High-Speed Downlink Packet Access-Multi-Cell) navíc podporuje vyšší modulační schéma 128 QAM, mobilita se zvyšuje až na rychlost $500 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ a teoretické přenosové rychlosti jsou až do $3,3 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$ na sektor. Reálně se však počítá s rychlostmi $1 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$ pro směr k uživateli a od uživatele $500 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ [8], [9].

V roce 1994 přichází proprietární bezdrátový standard s označením IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 802.15.1, který je více známý pod svým názvem Bluetooth. Iniciátorem vzniku byla firma Ericsson, která měla původně představu, že tento standard spíše nahradí sériovou komunikaci RS-232, v praxi hojně používanou. Zařízení podporující standard Bluetooth nepotřebují přímou viditelnost pro komunikaci a zároveň využívají bezlicenčního pásma ISM (Industrial, Scientific and Medical band). Ve své první verzi podporoval Bluetooth přenosové rychlosti pro symetrický přenos $432,6 \text{ kb}\cdot\text{s}^{-1}$ a asymetricky k uživateli $723 \text{ kb}\cdot\text{s}^{-1}$ a od uživatele $57,6 \text{ kb}\cdot\text{s}^{-1}$ v asynchronním přenosovém

módu. Maximální dosah Bluetooth se liší podle třídy (Class), do které zařízení spadá. Tyto třídy jsou definovány podle maximálního výstupního výkonu a to Třída 1 s dosahem 100 m a maximálním výkonem 100 mW, Třída 2 s dosahem 50 m s max. výkonem 2,5 mW a Třída 3 s dosahem 10 m a max. výkonem 1 mW. Postupem času i Bluetooth doznalo nových verzí, se kterými přišlo i zvýšení přenosové rychlosti a to u verze 1.2 na $1 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$, verze 2.0 + EDR (Enhanced Data Rate) na $3 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$, verze 3.0 + HS na $24 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ a poslední verze 4.0 má stejnou přenosovou rychlost jako verze 3.0 + HS, avšak vyšší dosah až 100 metrů. Toto zvýšení dosahu je spjato se snížením spotřeby elektrické energie u verze Bluetooth 4.0 a zvýšením zabezpečení dat pomocí šifrování AES-128 (Advanced Encryption Standard) [10].

Standard pro bezdrátové sítě IEEE 802.11x, označovaný jako WLAN (Wireless Local Area Network) nebo WiFi (Wireless Fidelity) vznikl v červenci roku 1997 a ke své činnosti využíval bez-licenční pásmo ISM od 2,4 do 2,4835 GHz. Toto pásmo je primárně určeno telekomunikačními úřady po celém světě pro průmysl, lékařství a vědecká pracoviště. Díky cenové dostupnosti a jednoduchosti vytvoření požadované infrastruktury se daný typ bezdrátové technologie WiFi více rozšířilo mezi firmami a koncovými uživateli. V roce 1999 přibýlo nové přenosové pásmo 5 GHz pro WiFi. Důvodem rozšíření bylo velké zarušení pásma ISM v pásmu 2,4 GHz a vývoj nových standardů [11]. Původní standard 802.11a poskytoval rychlost $54 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ v pásmu 5 GHz. Tentýž rok vznikl nový standard 802.11b poskytující až $11 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ v pásmu 2,4 GHz. v dnešní době se nejvíce používají standardy IEEE 802.11a, IEEE 802.11n a IEEE 802.11g, které poskytují rychlost v rozpětí $54 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ až $320 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$. IEEE 802.11g je WiFi standard rozšiřující IEEE 802.11b. Je zpětně kompatibilní, vysílá ve stejném frekvenčním pásmu 2400 - 2485 MHz, ale maximální nominální rychlost je $54 \text{ Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$, což odpovídá přenosům přibližně o rychlosti $25 \text{ Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$. Použité modulační schéma je OFDM pro rychlosti 6 až $54 \text{ Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$, přičemž pro rychlosti 1; 2; 5,5 a $11 \text{ Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$ je použito stejné schéma jako ve standardu IEEE 802.11b. Vysílací výkon je snížen oproti IEEE 802.11b z 200 mW na 65 mW. Přenosové rychlosti jsou však definované pouze pro malé dosahy a kvalitní signál. Je třeba si také uvědomit, že přenosová rychlost je sdílená s dalšími účastníky. V dalších letech přišel prudký vývoj v oblasti normy IEEE 802.x, kdy jsou vydávány nové normy podporující přenosové rychlosti až do výše $7 \text{ G}\cdot\text{s}^{-1}$, dle IEEE 802.11ad. S ohledem na vývoj nových norem se definují i zcela nové frekvenční pásma na úrovni 2,4; 5 a 60 GHz. Jednotlivé standardy IEEE 802.11 se od sebe liší především typem použité modulace a metodou přístupu k fyzické vrstvě [12].

V roce 2000 byla vydána pod standardem IEEE 802.15.3a poměrně zajímavá bezdrátová technologie UWB (Ultra Wideband), která přinášela do portfolia bezdrátových technologií velmi významné využití frekvenčního spektra a navíc vysokou míru zabezpečení dat. U bezdrátových technologií se stále více potýkáme s nedostatečným spektrem, přitom UWB rádiová zařízení umožňují efektivně sdílet již obsazené kmitočtové spektrum, a to prostřednictvím překryvného modelu. UWB technologie je primárně určena pro velmi krátké dosahy co se týče přenosu širokopásmových dat. UWB k přenosu informace pou-

žívá frekvenční pásmo širší než 500 MHz. Vysílání chápeme tak, že je pulsní s tím, že frekvence pulsů může být od jednotek MHz až po vysokofrekvenční s maximem na 2 GHz. Pulsy jsou velice krátké (0,2–1,5 ns) a jsou jich řádově miliardy. Vysílač a přijímač musí zkoordinovat příjem a vysílání signálu na 10–15 sekundy. Přenosová rychlost u UWB se mění dle frekvence pulzů a dosahu sítě [13]. Rychlost se pohybuje v řádech stovek $\text{Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ až $\text{Gb}\cdot\text{s}^{-1}$. UWB sítě však nemají velký dosah, jejich přenosová rychlost rychle klesá s každým metrem, takže optimální jsou vzdálenosti do 10–50 m. Maximální spektrální výkonová hustota nepřesahuje v celém pásmu stanovených $0,5 \text{ dBm}\cdot\text{MHz}^{-1}$. Vysílací výkon je okolo 0,5 mW [14].

V roce 2002 byla založena organizace ZigBee Alliance, která sdružuje přes 150 nadnárodních firem a korporací a vyvinula novou technologii ZigBee. Tato technologie byla v témže roce organizací IEEE standardizována pod označením IEEE 802.15.4. ZigBee je jednoduchý bezdrátový komunikační standard, který umožňuje vzájemnou komunikaci mnoha zařízení na vzdálenost desítek metrů. Pro tento standard bylo definováno několik rádiových pásem tak, aby byly akceptovatelné v různých zemích s odlišnými předpisy a kritérii. Proto, aby se mohl standard uplatnit, jsou pro něj definována tři rádiová pásma a to [15]:

- 2,4 GHz s 16 kanály a přenosovou rychlostí $250 \text{ kb}\cdot\text{s}^{-1}$,
- Amerika a Austrálie: pásmo 915 MHz s 10 kanály a přenosovou rychlostí $40 \text{ kb}\cdot\text{s}^{-1}$,
- Evropa: pásmo 868 MHz s jedním kanálem a přenosovou rychlostí $20 \text{ kb}\cdot\text{s}^{-1}$.

Dosah ZigBee je přibližně 10 až 50 metrů v závislosti na lokálních podmínkách šíření signálu. Vysílací výkon se pohybuje okolo 1 mW [15].

Postupem času začala organizace IEEE hledat možnosti zvýšení dosahu u bezdrátových sítí na řádově kilometry tak, aby efektivně pokryly velká města či hustě obydlené aglomerace, kde se kladl důraz i na vyšší přenosové vlastnosti bezdrátové technologie. V roce 2002 vznikl nový standard WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), který má označení IEEE 802.16. Standard WiMAX podporuje datové přenosy v licencovaném (2,5–2,7; 3,5; 10,5 GHz) i nelicencovaném pásmu (2,4; 5,725–5,825 GHz) a obsahuje několik druhů fyzického rozhraní pro přímou i nepřímou viditelnost u vysokorychlostního přenosu dat. WiMAX přinesl sebou vyšší podporu kvality služeb QoS, možnosti správy a řízení sítě. Dosah bezdrátové sítě pro WiMAX definovaný v normě je 40–70 km, kdy vznik normy je datován do roku 2003. Avšak zatím, co v původním standardu 802.16 byla přenosová rychlost až $134 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ pro přímou viditelnost, tak v případě 802.16a klesá přenosová rychlost zhruba na polovinu, tedy $70 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ při nepřímé viditelnosti. Pro základní stanici se uvažuje vysílací výkon o hodnotě +43 dBm (20 W) a pro mobilní vysílací stanice +23 dBm (200mW) [16].

Poslední verze standardu IEEE 802.16m z roku 2011 se nazývá Mobile WiMAX 2.0 či jako WirelessMAN-Advanced a přináší zvýšení přenosové rychlosti až na $100 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ pro mobilní zařízení a pro stacionární na $1 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$. IEEE 802.16m vychází z původního WiMAXu 802.16e, přidává však nové schopnosti, přičemž zachovává zpětnou kompatibilitu.

Kromě vyšších rychlostí došlo mimo jiné i k vylepšení latencí, aby bylo ještě lépe možné využívat VoIP (Voice over IP) [16].

Poslední normy dle IEEE 802.x pak specifikují více možnosti nasazení bezdrátových technologií do dopravy či pro propojení s mobilními systémy [17]:

- IEEE 802.17 Resilient packet ring
- IEEE 802.18 Radio Regulatory TAG (Technical Advisory Group)
- IEEE 802.19 Coexistence TAG
- IEEE 802.20 Mobile Broadband Wireless Access
- IEEE 802.21 Media Independent Handoff
- IEEE 802.22 Wireless Regional Area Network
- IEEE 802.23 Emergency Services Working Group
- IEEE 802.24 Smart Grid TAG New
- IEEE 802.25 Omni-Range Area Network

Norma IEEE 802.17 umožňuje přepínat datové přenosy skrze kruhově orientované optické sítě typu SONET/SDH. IEEE 802.17 je cílena především do metropolitních sítí a snaží se kombinovat spolehlivost a velmi rychlé zotavení s efektivitou a cenovou dostupností. Tato technologie je využívána především ve Švédsku, kde tamní síť SUNet využívající RPR (Resilient Packet Ring) s okruhy při přenosových rychlostech $10 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$, zároveň rovněž nasadila i DPT (Dynamic Packet Transport), což je název, pod kterým RPR technologii prodává firma Cisco Systems [17].

Norma IEEE 802.20 je standard označovaný jako MBWA (Mobile Broadband Wireless Access). Tento standard vznikl v roce 2002. Za vznikem pracovní skupiny IEEE 802.20 stojí americká společnost Flarion Technologies, která na počátku tohoto tisíciletí vyvinula systém Flash OFDM splňující požadavky na MBWA. Tento standard podporuje přenosové rychlosti až $80 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ při rychlosti $250 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ pro komunikaci za jízdy v automobilu v licencovaném frekvenčním pásmu 3,5 GHz. Šířka pásma je různá a definují se tři 5, 10 a 20 MHz [17].

Norma IEEE 802.22 je standard označovaný jako WRAN (Wireless Regional Area Network). Standard definuje komunikaci v pásmu 54 až 862 MHz. Cílem je lepší využití tohoto pásma pro sdílení spektra, pokud je širokopásmový televizní signál vypnut či méně využíván. Dosah tohoto systému za dobrých atmosférických podmínek činí až 100 km. Využívá se modulačních formátů QPSK (Quadrature Phase-shift keying), 16 QAM (Quadrature amplitude modulation), 64 QAM. Přenosové rychlosti jsou $1,5 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ pro směr k uživateli a $384 \text{ kb}\cdot\text{s}^{-1}$ od uživatele [17].

2.2 Dílčí závěr k bezdrátovým systémům pracujících na rádiových vlnách

Bezdrátové systémy založené na rádiových vlnách mají bezesporu hlavní podíl na tom, že využívání tzv. mobilního přenosu dat se rozšířilo až do dnešní podoby. Nicméně je

jich nevýhody v dnešní době začínají převyšovat nad výhodami s nimi spojenými. Hlavní nevýhodou, kterou lze spatřovat u systémů využívající rádiové vlny je např. již v dnešní době nízká přenosová rychlost, rušení jinými systémy pracujícími ve stejném kmitočtovém pásmu, nejednotnost kmitočtových pásem pro jednotlivé systémy v rámci kontinentů, nízká odolnost vůči odposlechům a s nimi spojená problematika zabezpečení dat, vysílaný výkon daný základnovou stanicí či vysílacím bodem. Vysílaný výkon EIRP (Equivalent Isotropically Radiated Power) pro WiFi zařízení v pásmu 2,4 GHz může být za anténou maximálně 100 mW, což odpovídá hodnotě 20 dB. Pro pásmo 5 GHz je povolený vysílací výkon na úrovni 30 dB s technikou ATPC (Automatic Transmit Power Control). Tato technika ATPC v případě detekce kolize (např. s radarem vojenským, letištním či meteorologickým) automaticky sníží vysílací výkon o 3 dB (polovina vysílacího výkonu). V oblasti 5 GHz v pásmu 5,15 až 5,35 GHz (pouze uvnitř budov), v pásmu 5,470 až 5,725 GHz (standard IEEE 802.11a) a pásmu 5,725 až 5,875 GHz lze využít vysílací zařízení s maximálně 25 mW vyzařování EIRP. U standardu IEEE 802.11a je dle normy vyzářený výkon povolen až na úroveň 1 W pro venkovní systémy [16], [17]. V současnosti, však rychlost výstavby bezdrátových technologií není jenom doménou telekomunikačních poskytovatelů ale i koncových uživatelů a různých spolků.

Rovněž nesmíme opomenout ten fakt, že přidělení kmitočtového pásma pro jakoukoliv bezdrátovou technologii se řídí podmínkami telekomunikačních orgánů a za licencovaná pásma se platí vysoké finanční částky. Rádiové systémy v současnosti jsou již na vrcholu a nemohou nabídnout dostačující přenosovou rychlost pro širokopásmové služby, které jsou na vzestupu využívání u koncových uživatelů. Proto alternativou vůči rádiovým systémům mohou být optické systémy pracující mimo licencovaná pásma s dostatečnou přenosovou kapacitou.

3 ÚVOD DO OPTICKÝCH KOMUNIKAČNÍCH SYSTÉMŮ

Optické komunikační systémy lze rozdělit do několika podskupin, které jsou význačné několika parametry. Optické komunikační systémy rozdělujeme do dvou skupin, a to na vláknové (k přenosu využívající optická vlákna) a bezvláknové (vyžívající atmosférického přenosového prostředí). Optické sítě mají mnohé rozdíly v principu funkce a současně výhody i své nevýhody. V dnešní době výhody jasně předurčují optické sítě jako budoucnost v oblasti datových komunikačních sítí. Zatímco v metalických sítích se šíří elektrický signál, u optických sítí je to světelný signál. U metalických sítí je problém s rušením EMI (Electromagnetic Interference) mezi sdílenými kabely či přeslechy na blízkém nebo vzdáleném konci. Přenosové rychlosti u metalických kabelů dosahují okolo $10 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$ a v přípravě jsou i novější specifikace pro vyšší rychlosti. Dosah metalické sítě je okolo 350 metrů, pak je nutný aktivní prvek provádějící regeneraci elektrického signálu.

Pokud bychom porovnávali optické vláknové sítě s metalickými, pak je nutno vyzdvihnout možnou kapacitu optických vláken a přenosových rychlostí při využití xWDM (xWavelength Division Multiplex) systémů a odolnosti optických vláken vůči elektromagnetickému rušení či odposlechům. Dosah optických vláknových sítí se pohybuje, dle použitého optického vlákna v řádech desítek kilometrů. Při použití aktivních zesilovačů se dosah zvyšuje na stovky kilometrů, proto jsou všechny páteřní sítě tvořeny optickými vlákny.

Druhou, již uvedenou, skupinou optických komunikačních systémů jsou bezvláknové sítě. Je to typ optické sítě bez využití optického vlákna jako přenosového média. V tomto případě je přenosovým médiem atmosférické přenosové prostředí. U bezvláknových optických systémů definujeme dvě velké skupiny a to vnitřní a vnější. Vnější optické bezvláknové systémy mají několik ekvivalentů, avšak nejvíce využívaným je optický atmosférický spoj FSO (Free Space Optics). Vnější bezvláknové spoje mají využití tam, kde nemáme možnost využití jiné kabelové či vláknové sítě, např. místa, která se vyznačují zhoršenou dostupností s vysokou mírou penetrace obyvatelstva či průmyslu. Vnitřní bezvláknové sítě využíváme primárně ve vnitřních prostorách pro komunikaci mezi řídicí a koncovou jednotkou.

Bezvláknové atmosférické optické spoje se dají dělit do dvou menších skupin, a to na stacionární a mobilní. Nejčastěji se v telekomunikacích setkáme se stacionárními atmosférickými optickými spoji, kdy se přenosové rychlosti pohybují okolo $10 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$ při dosahu 350 metrů [18]. Nejčastěji se pro stacionární venkovní spoje setkáme s přenosovými rychlostmi okolo $1 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$.

U bezvláknových atmosférických optických spojů se používají nejčastěji vlnové délky v oblasti 850 nm, či 1550 nm, nicméně vědecké studie poukazují i na možnosti využití na jiných vlnových délkách. Všechny tyto vlnové délky se používají z důvodu dobrých přenosových vlastností pro atmosféru. Zároveň tyto systémy jsou připojitelné i do současných datových sítí (je zde protokolová transparentnost v návaznosti na jiných typech sítí) a není potřeba speciálních protokolových konvertorů. Pro ochranu zraku se, volí vyšší

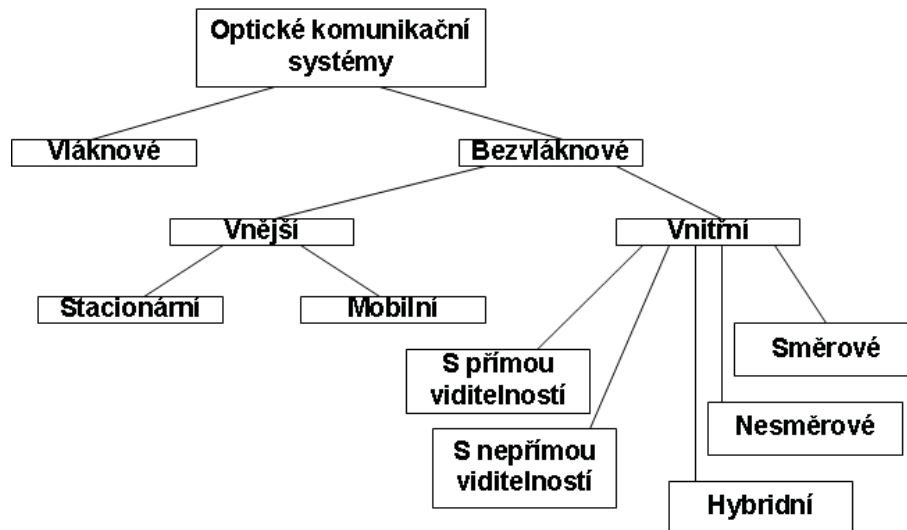
pracovní vlnové délky. Během let se vědecká komunita zaměřila i na jiné perspektivní komunikační vlnové délky pro atmosférické optické spoje a to např. na 1064 nm, které využívají systémy TESAT [19]. Další zajímavou vlnovou délkou je oblast okolo 1000 nm. Ta má velice dobré vlastnosti vůči atmosférickým jevům a lépe jim odolává, než jiné komunikační vlnové délky.

Bylo prokázáno, že v oblasti vlnových délek okolo 1000 nm nedojde k takové fluktuaci optického výkonu jako je tomu u vlnových délek 850, 1300 a 1550 nm. Výhodou bezvláknových optických systémů jsou jejich možnosti topologie sítě, a to na spojení bod - bod P2P (Point To Point) či bod-více-bodů P2MP (Point To Multipoint), což je v podstatě obdoba bezdrátových rádiových sítí. Druhou skupinou u vnějších bezvláknových systémů jsou mobilní atmosférické optické spoje M-FSOL (Mobile Free-Space Optical Link). Zatímco u stacionárních systémů jsou hlavice vůči sobě neměnné a potřebují přímou viditelnost LOS (Line Of Sight), tak u mobilních atmosférických optických spojů se neustále mění vzájemná poloha mezi hlavicemi. M-FSOL jsou pro svoji flexibilitu a mobilitu velice atraktivní i v kombinaci s dostupnými přenosovými rychlostmi okolo $\text{Gb}\cdot\text{s}^{-1}$. Vysílací výkon pro M-FSOL se pohybuje v rozmezí 100 μW až několik Wattů. Pro komunikaci se používá většinou pracovní vlnová délka 1550 nm [20]. Komunikace pomocí vnějších bezvláknových optických systémů se uskutečňuje v troposféře, která sahá od povrchu země až do 7 km v polárních oblastech a 17 km okolo rovníku [20], [21].

V troposféře se vyskytují mlhy, déšť, sníh, větrné turbulence, prach a jiné atmosférické jevy, které snižují výkonovou úroveň přenášeného signálu a tudíž i zhoršují přenosové vlastnosti optických bezvláknových sítí. Některé z atmosférických jevů mohou způsobit svoji povahou až kompletní nefunkčnost spoje po dobu svého výskytu a působení. Dalším problémem u atmosférických jevů je, že jsou stochastické a těžko předpověditelné, nicméně statisticky popsatelné. Proto je v dnešní době u většiny atmosférických optických spojů pro venkovní prostředí dodatečně přiřazen systém založený na rádiových vlnách RF, který kompenzuje případné zhoršené prostředí tím, že je záložním zdrojem komunikace. Zatímco atmosférické optické spoje jsou citlivé převážně na husté mlhy či těžký sníh, (kdy útlum může být až $350 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$, jak bylo prokázáno zde [21], [22]) a hustý smog, tak mikrovlnné spoje degraduje nejvíce hustý déšť (hydrometeory) [23]. V podstatě se jedná o záložní komunikaci v případě, kdy atmosférický optický spoj je již nefunkční nebo generuje velké množství chyb. Zajímavým projektem, který využívá tohoto systému FSO/RF je např. FOENEX MANET síť pro vojenské účely [21], [22].

Na obrázku 3.1 můžeme vidět schématické rozdělení optických komunikačních systémů. Není zde detailně rozebrána kapitola vláknových optických sítí, která není předmětem této práce a je mnohem rozvinutější, nežli je tomu u vnějších bezvláknových optických systémů.

Vnitřní bezvláknové systémy budou rozebrány podrobněji v následujících kapitolách, nicméně mají právě výhodu v tom, že ve vnitřních prostorách se nesetkáme s atmosférickými jevy v takové intenzitě a některé zde nepůsobí vůbec (např. déšť, mlha, sníh).



Obr. 3.1: Schématické rozdělení optických komunikačních systémů

Vnitřní bezvláknové optické systémy se v posledních letech začaly rapidně rozšiřovat, a to díky rozvoji širokopásmových telekomunikačních služeb. Vysoké přenosové rychlosti v kombinaci s velkou šířkou pásma se staly významným činitelem pro využívání vnitřních optických bezvláknových systémů. Rovněž mobilita je dalším kladem pro vnitřní optické bezvláknové systémy. Ve vnitřních optických bezvláknových systémech definujeme dle obrázku 3.1 několik typů sítí. Ty se dělí podle vysílání, přenosu a příjmu optického signálu. Rozhodujícím faktorem pro dělení vnitřních optických bezvláknových systémů je pozice vysílače a přijímače. Vnitřní optické bezvláknové systémy mohou být realizovány pomocí následujících konceptů, dle šíření optického signálu na přímou viditelnost mezi vysílačem a přijímačem LOS a nepřímou viditelnost NLOS (Non Line Of Sight). Dle směrovosti dělíme vnitřní optické bezvláknové systémy na směrové, nesměrové a hybridní systémy.

3.1 Dílčí závěr k optickým komunikačním systémům

Optické komunikační systémy jsou v dnešní době velice populární a tomu odpovídá i jejich masivní využívání v posledních letech především v telekomunikacích, a to v oblasti páteřních sítí. Potenciál optických komunikačních systémů zdaleka nebyl ještě využit a v budoucnu asi ještě nebude z důvodu nedostatečně rychlých detektorů. Výhodou všech typů optických sítí je, že jejich napadnutí z pohledu odposlechů je téměř nemožné. Mezi další výhody se řadí i o transparentnost protokolů s navazujícími různými typy sítí Ethernet, FDDI (Fiber Distributed Data Interface), SONET/SDH, ATM (Asynchronous Transfer Mode) aj. V rámci šíření optického paprsku nedochází k žádnému vzájemnému rušení, pokud se jedná o vysoce směrový paprsek, jenž zaručuje vysokou prostorovou selektivitu přenosového signálu, a tedy nehrozí interference s jinými spoji. Velmi důležitou výhodou u optických bezvláknových spojů je absence potřeby kmitočtového přidělu - pásmo optické

nosné vlny leží mimo oblast působnosti ČTÚ (Český telekomunikační úřad), proto při instalaci a provozu spoje nevznikají legislativní překážky a optická síť je tak naprosto nezávislá na omezeném a regulovaném spektru a kmitočtové licenci. Další výhodou je pak přenositelnost, mobilita a flexibilita řešení optických bezvláknových systémů a frekvenční nezávislost umožňuje případné přesunutí spoje na jiné lokality bez nutnosti přeladění.

4 ÚVOD DO PROBLEMATIKY VNITŘNÍCH BEZVLÁKNOVÝCH OPTICKÝCH SÍTÍ

Jak již název napovídá, jedná se o optické systémy používané ve vnitřních prostorech. Vnitřní optické bezvláknové sítě nabízejí alternativu vůči bezdrátovým rádiovým sítím. Z pohledu budoucího vývoje v oblasti telekomunikací bude využívání bezvláknových optických sítí větší, nežli je tomu doposud, z důvodu rozvoje širokopásmových služeb a výraznému nárůstu přenosových datových rychlostí. Plusy, které mluví pro vnitřní bezvláknové optické sítě jsou následující:

- Nízká míra atmosférického prostředí, jelikož ve vnitřních prostorech se nesetkáme s většinou druhů atmosférických jevů (např. sníh, déšť, mlha).
- Šířený světelný paprsek neproniká zdmi, a tudíž poskytuje dostatečnou ochranu před případným odposloucháváním.
- Vysílaný optický signál neovlivňuje již využívané rádiové systémy a není tak přísně regulováno vysílací spektrum.

Za určitou výhodu můžeme považovat i to, že cena komponent již v dnešní době není tak vysoká a v poměru výkon/cena je příznivá. Neustále dochází ke snižování nákladů na jednotku přenesené informace, což je základním předpokladem rozvoje nových komunikačních systémů. Je třeba se v dnešní době velice zajímat především o energetickou náročnost či spotřebu jakéhokoliv komunikačního řetězce. K tomu nás vede několik aspektů, kterými jsou cena za údržbu, a pak ekologická zátěž daného systému. Vysílaný optický paprsek se rozprostírá ve vnitřních prostorech a díky tomu můžeme vytvářet mobilní optické systémy. Pro vykrytí rozložení optické intenzity v prostoru se dá s výhodou využít buňkového systému, jako je tomu u mobilních sítí založených na rádiovém přenosu. Buňkový systém se již několikrát osvědčil, nicméně problém se zde vyskytuje s nerovnoměrným rozložením optické intenzity napříč celou místností. V rozích místnosti dochází k výraznému snížení optické intenzity, což pak vede k nárůstu chybovosti celého přenosového řetězce od vysílače k přijímači.

Z tohoto důvodu se v dnešní době využívá několika způsobů, jak tomu zamezit. Jedním z nich je využití optických komponentů jako je difuzor, koncentrátor či multisektorový vysílač s přijímačem. Stejně jako rádiové sítě i bezvláknové optické vnitřní sítě mají své nevýhody, které je doprovázejí. Optický paprsek šířený skrze vnitřní prostory je náchylný na objekty či překážky, které zamezují přímé viditelnosti mezi vysílačem a přijímačem při konfiguraci přímé viditelnosti. Distribuovaný optický výkon, který dopadá na fotodetektor tvořený fotodiodou typu APD (Avalanche Photo Diode) nebo PIN (p-i-n photodiode), snímá kromě užitečného světla i parazitní světlo tvořené různými typy zdrojů světelného záření. Tomuto dodatečnému neužitečnému světlu říkáme šum či parazitní světlo. Zdroji tohoto parazitního světla, kromě denního světla, mohou být např. wolframové žárovky, zářivky, výbojky, fluorescenční zářivky, halogenové zářivky, bezdrátová sluchátka založená na technologii IR (Infra Red) či televizní dálkové vysílače [24]. Toto parazitní světlo

se přičítá k výkonu, který je detekovaný pomocí fotodetektoru, a poté dochází k chybnému určení bitové sekvence nebo saturaci fotodetektoru, což může způsobit kompletní nefunkčnost komunikačního řetězce. Intenzita dopadajícího parazitního světla má často větší výkonovou úroveň nežli má komunikační signál. Nicméně je nutné si uvědomit, že kromě tohoto šumu zde působí i další šумы, které jsou svojí povahou dány typem použitých komponent. Jedná se především o využívání polovodičových součástek, ať už na straně vysílací nebo přijímací. V optických bezvláknových systémech nás především omezuje šum výstřelový, tepelný či blikavý ($\frac{1}{f}$), který se poté sdružuje do přídatného bílého Gaussovského šumu AGWN (Additive White Gaussian Noise).

Komunikační spoje v infračervené oblasti, které pracují s šířkou pásma menší než 5 MHz, jsou obzvláště postiženy vysokou frekvencí fluorescenčních zářivek, audio telefony a v menší míře i televizním dálkovým ovládáním, za předpokladu, že vnitřní intenzita světla je malá [24].

V současnosti je nutné řešit i problematiku bezpečnosti zraku s ohledem na typ používaného zdroje záření a zároveň z pohledu využití funkcionality osvětlování vnitřních prostor. Definice osvětlovacích parametrů se řeší buď za pomoci bezpečnostních norem či za pomoci fotometrických veličin a k nim příslušných norem. Z tohoto důvodu je v práci uvedena i následující kapitola, která se zabývá bezpečností světelného záření pro vnitřní prostory.

4.1 Bezpečnostní normy pro vnitřní osvětlovací systémy

Jak bylo uvedeno výše, pro VLC systémy je klíčovou výhodou spojování funkcionalit - komunikace a osvětlování. Vzhledem k tomu, že zdrojem světla pro obě funkcionality jsou výkonové LED (Light-Emitting Diode), je potřeba řešit problematiku osvětlování a zrakové bezpečnosti. Zdrojem optického záření jsou různé typy součástek, do kterých řadíme i polovodičové součástky, a to buď koherentní zdroje v podobě laserových diod LD (Laser Diode) nebo nekoherentní dioda emitující světlo LED. V případě zdrojů optického záření se pro vnitřní systémy využívá většinou LED diody, které nevyzařují tak vysoký optický výkon jako je tomu u LD diod. Právě velikost emitovaného optického výkonu zdroje záření je velice důležitá, kvůli ochraně lidského zraku před poškozením sítnice oka či popálením kůže. Pro lidské oko je největším nebezpečím záření vyvolané částí blízkého infračerveného záření v rozsahu (780 až 1400 nm). Regulací emitovaného záření ze zdrojů se zabývá Mezinárodní elektrotechnická komise IEC (International Electrotechnical Commission), která definovala bezpečnostní standardy pro zdroje záření [25]. Ty převzala i česká norma pod názvem ČSN EN 60825-1 ed. 2, dle nařízení vlády vyhlášky č. 480 z roku 2000 sbírky [26]. Tyto standardy se dělí dle vyzařovaného výkonu a vysílané vlnové délky do několika tříd. Vnitřní bezvláknové systémy využívají zdrojů záření ve Třídě 1. Pro vnější bezvláknové optické systémy se využívají laserové diody s vysokým vyzařovacím výkonem dle Třídy 3B, kde je nutno dbát i na bezpečnost pracovníků a obsluhy zařízení.

Při přenosu dat umožňují některé výrobky snížit výkon laseru automaticky, a to zejména tehdy, když se někdo nachází v dráze paprsku pomocí metody APR (Automatic Power Reduction). Lasery pro vlnovou délku $\lambda = 1550$ nm dovolují používat větší výkon při stálém bezpečném provozu pro lidské oko, proto dosahují i větší vzdálenosti. U laserů pracujících s vlnovou délkou $\lambda = 850$ nm bylo z důvodu bezpečnosti lidského zraku doporučeno snížení vyzařovaného výkonu. Paprsky, jejichž vlnová délka je $\lambda = 850$ nm jsou pro lidské oko sice neviditelné, ale i tak proniknou až na sítnici oka. Naopak paprsky s vlnovou délkou $\lambda = 1550$ nm jsou absorbovány rohovkou [27].

Z tabulky 4.1 tedy vyplývá, že pro vnitřní prostředí nemohou být využity, např. laserové zdroje záření, které emitují větší optický výkon nežli je 0,54 mW pro krátké vlnové délky [27]. Potřebujeme redukovat hodnotu emitovaného optického výkonu z LD, pak je možné využít např. difuzoru. Ten může být zkonstruován buď z vrstvy průsvitného plastu [28], nebo jako holografický difuzor generovaný pomocí počítače [29]. Holografický difuzor rozloží dopadající optický paprsek do různých vzorů, které si můžeme nadefinovat (např. obdélník, čtverec, pásek) [30]. Tímto způsobem rozložíme výkon vyzařovaného optického výkonu ze zdroje záření, a zároveň můžeme tvarovat paprsek, aby nebyl tak koncentrovaný [30].

Tab. 4.1: Limity emitovaného výkonu ze zdroje optického záření [26]

	650 nm	880 nm	1310 nm	1550 nm
Třída 1	<0,2 mW	<0,54 mW	<8,8 mW	<10 mW
Třída 2	0,2–1 mW	Definováno pouze pro viditelnou část spektra		
Třída 3A	1–5 mW	1–5 mW	8,8–45 mW	10–50 mW
Třída 3B	5–500 mW	5–500 mW	45–500 mW	50–500 mW

4.2 Určení bezpečnosti vyzařovaného výkonu pro lidský zrak

K podmínkám bezpečnosti očí se váží i dva důležité parametry, a to přístupný emisní limit AEL (Accessible Emission Limit) a maximální přípustný expoziční limit MPE (Maximum Permissible Exposure). MPE popisuje maximální výkon, kterým může být povrch vystaven. Obvykle se měří ve $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ a nebo $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$. Když vezmeme v úvahu oční povrch A_r pro nějakou danou vlnovou délku, která přijme laserové záření, můžeme definovat maximální bezpečný vyzařovaný výkon vztahem (4.1)[31]:

$$\text{AEL} = \text{MPE} \cdot A_r. \quad (4.1)$$

Pro expoziční dobu budeme volit, co nejdelší dobu trvání (např. 30000 s. (8 hodin)). Používáme široký paprsek, což znamená, že ne celá vysílací energie bude okem absorbována. Jestliže střed paprsku nasměrujeme přímo do středu oka, tak je maximální přijatý

výkon $P_{E_{ye}}$ na oku možné vypočítat z následujícího vzorce (4.2)[31]:

$$P_{E_{ye}}(z) = P_T \cdot \left(1 - e^{-\frac{2 \cdot R_r^2}{\omega^2(z)}} \right) \leq \text{AEL}_N, \quad (4.2)$$

kde P_T je celkový vysílací výkon, R_r je poloměr oka a $\omega(z) = z \cdot \tan(\phi)$. Pokud je $P_{E_{ye}} = \text{AEL}_N$, potom je vztah dán jako (4.3):

$$P_T = \frac{\text{AEL}_N}{1 - e^{-\frac{2 \cdot R_r^2}{\omega^2(z)}}}. \quad (4.3)$$

Pokud je znám celkový vysílací výkon ze systému vysílače, pak je nutné vypočítat jmenovitou nebezpečnou zónu NHZ (Nominal Hazard Zone) definovanou jako záření optického svazku, jenž je větší než expoziční limit MPE. Při NHZ je nutné vzít do úvahy typ zdroje, odrazivost od povrchu a pochopitelně hodnotu vlnové délky. Pro případ využití mnohovidového optického vlákna jako vysílače je definována NHZ následujícím vzorcem (4.4)[32]:

$$\text{NHZ} = \frac{1.7}{\text{NA}} \cdot \left[\frac{\phi}{\Phi \cdot \text{MPE}} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (4.4)$$

a vzorec pro jednovidová vlákna (4.5)[32]:

$$\text{NHZ} = \frac{\omega}{\lambda} \cdot \left[\frac{\pi \cdot \Phi}{2 \cdot \text{MPE}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.5)$$

kde NA je numerická apertura používaného vlákna, Φ je celkový vyzářený výkon pro kontinuální laser či průměrný vyzářený výkon pro pulzní opakující laser [W], ω je průměr vidového pole jednovidového vlákna a ϕ výstupní vychýlený optický svazek ze zdroje záření měřený v radiánech.

Pro zajištění bezpečnosti optického bezvláknového systému se důrazně doporučuje, aby uživatelé omezili výstupní výkon ve vysílači (AEL) podle normy na maximálně 10 mW [32].

4.3 Norma o osvětlování vnitřních prostor

Jelikož se v rámci práce zabírám problematikou rovnoměrného světelného pokrytí prostoru, a to především vnitřního, je třeba uvést i definice či hlavní podmínky technických norem, které se danou problematikou zabývají. Technická norma ČSN EN 12464-1 nesoucí název "Světlo a osvětlení - Osvětlení pracovních prostorů - Část 1: Vnitřní pracovní prostory", je přeložená norma EN 12464-1:2002. Uvedená norma definuje požadavky na osvětlení pro vnitřní pracovní prostory z hlediska zrakové pohody a zrakového výkonu. Norma stanovuje hlavní termíny, od nichž se dále odvíjí kritéria pro správnou volbu zdroje záření. Hlavními kritérii pro navrhování osvětlení je splnění kvalitativních a kvantitativních ukazatelů, kterými jsou následující [31]:

- zrakové pohody, když se pracovníci velmi dobře cítí; to nepřímo přispívá k vysoké úrovni produktivity,
- zrakového výkonu, když jsou pracovníci schopni vykonávat zrakové úkoly i při obtížných podmínkách a během dlouhé doby,
- bezpečnosti.

Hlavní parametry určující světelné prostředí [31]:

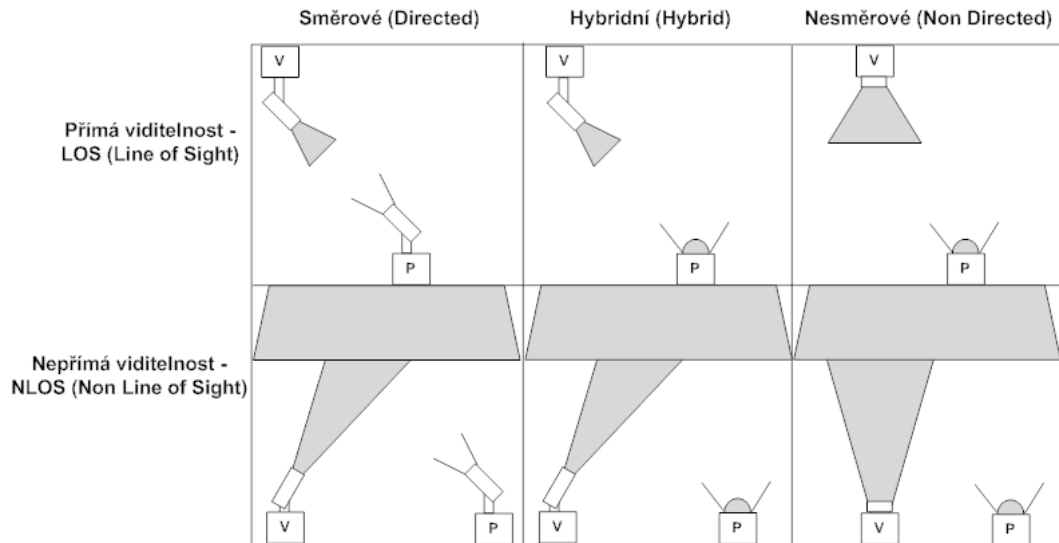
- rozložení jasu,
- osvětlenost,
- oslnění,
- směrovost světla,
- podání barev a barevný tón světla,
- míhání světla,
- denní světlo.

Protože navrhovaný model vysílače má být zhotoven pro vnitřní pokrytí, kde se předpokládá jeho využití pro kanceláře, stanovuje norma ČSN EN 12464-1 podle druhu práce v dané kanceláři hodnotu udržované osvětlenosti v rozmezí E_m 200 až 750 lx při UGR_L (Unified Glare Rating) 19 až 25, což je jednotné omezení oslnění ve vnitřním prostoru. Tato norma však je doporučující a neomezuje projektanty v úsilí najít jiné inovativní přístupy k dané problematice. Norma však definuje pravidla pouze pro vnitřní prostory, tudíž jí nelze aplikovat na venkovní osvětlení [33].

4.4 Koncepty vnitřních bezvláknových optických sítí

Vnitřní bezvláknové optické sítě dělíme podle několika konceptů, dle komunikační trasy mezi vysílačem a přijímačem. Optické bezvláknové sítě pro vnitřní použití se dělí na s přímou viditelností LOS (Line of Sight) a nepřímou viditelností NLOS (Non-Line of Sight), více zachycuje obrázek 4.1. Koncepty, které mají zaručenou přímou viditelnost, se nazývají i jako DBIR (Directed Beam Infrared) [32]. Koncept LOS má mezi vysílačem a přijímačem maximální energetickou účinnost, jelikož přenášený výkon je koncentrovaný do úzkého vyzařovacího kužele, to umožňuje využít na straně přijímačů s malým zorným polem tzv. FOV (Field of View).

Maximální energetickou účinnost u LOS koncepce zaručíme za předpokladu, že mezi vysílačem a přijímačem nedojde k přerušení spojení na komunikační trase. Ztráty vícecestným šířením optického paprsku, které vznikají u jiných konceptů, jsou minimální z důvodu přímé viditelnosti. Pro koncept bez přímé viditelnosti NLOS mezi vysílačem a přijímačem platí, že mezi nimi může být vložena překážka, aniž by to znemožnilo komunikaci. Optický paprsek je distribuován z vysílače k přijímači za pomoci odrazení paprsků od odrazných ploch např. zdivo, stropy, stěny v místnostech či difúzních materiálů. Takovouto koncepci pak nazýváme difúzní a byla dříve hojně využívána. Tento typ koncepce NLOS však trpí vícecestným šířením signálů, intersymbolovou interferencí a vyšší výkonovou ztrátou.



Obr. 4.1: Koncepty vnitřních bezvláknových optických sítí mezi vysílačem (V) a přijímačem (P)[32]

Vnitřní bezvláknové sítě se pak dělí podle směrovosti mezi vysílačem a přijímačem. Koncept s přímou viditelností může být směrový, hybridní nebo nesměrový. Rozdíly jsou ve využití širokosměrových či úzkosměrových vysílačů a přijímačů využitých při komunikaci. Směrové využívají úzkosměrové vysílače a přijímače. Hybridní využívají nesměrové vysílače a úzkosměrové přijímače. Nesměrové využívají nesměrové vysílače a přijímače. Koncept s nepřímou viditelností může být rovněž směrový, hybridní nebo nesměrový. Směrové využívají úzkosměrové vysílače a přijímače. Hybridní využívají nesměrové vysílače a úzkosměrové přijímače. Nesměrové využívají nesměrové vysílače a přijímače.

5 VNITŘNÍ OPTICKÉ BEZVLÁKNOVÉ SÍTĚ PODLE POUŽITÉHO SPEKTRA

Nejčastěji využívané spektrum ke komunikaci je buď neviditelné (infračervené), nebo viditelné. Infračervený přenos je již dlouhou dobu využíván, a to především u dálkových ovládaní pro televizory či v prvních mobilních telefonech. Výhodou byla nízká pořizovací cena komponent a dostatečná přenosová rychlost. Neopomenutelnou výhodou u infračervených vysílačů byla nízká energetická spotřeba. Infračervený přenos se již od počátku vývoje zabýval přímou komunikací mezi vysílačem a přijímačem v konfiguraci bod-bod (Point to Point). V infračervené oblasti se používají vlnové délky 850, 950, 1300, 1480 a 1550 nm [20]. U zdrojů záření ve viditelném spektru došlo k razantnímu využívání především díky dobrému zvládnutí technologie výroby LED zdrojů. Naproti tomu u LED zdrojů se potýkáme s vyšší energetickou spotřebou, jelikož se jedná o proudem řízené polovodičové součástky, jsou zde i problémy spojené s teplotní stabilizací. Dosah komunikace mezi vysílačem a přijímačem při využití zdrojů záření LED je, stejně jako u infračerveného přenosu, malý. Pro rychlé datové přenosy se v dnešní době využívá jak LED, tak i laserových diod s různým typem použité modulace. U laserových diod narážíme na problém s emitováním světelného záření v prostoru, jelikož se jedná o bodové zdroje, které na malou plochu distribuují vysoký výkon. Jak je již uvedeno v kapitole 4.1 využití laserových zdrojů záření pro vnitřní prostory je nebezpečné pro lidi z hlediska vlivů na jejich zrakové ústrojí.

Výkonové polovodičové zdroje záření PLED (Power Light Emitting Diode) přinesly sebou možnost využití zdrojů záření ve viditelné oblasti. Bílé LED diody jsou zatím posledním a nejmladším typem svítivých diod. Odstín bílého světla je udáván barevnou teplotou v Kelvinech, protože bílé světlo zahrnuje téměř všechny vlnové délky z viditelného spektra barev. Tyto zdroje záření bílé barvy mohou vzniknout při následujících konfiguracích. První možnost je výkonová LED složená z modře zářícího LED čipu zářícího na vlnové délce 450 nm, který je pokryt vrstvou žlutého luminoforu. Jako luminofor se v praxi používá tzv. již zmíněný žlutý luminofor označován YAG (Yttrium, Aluminium, Garnet) nebo-li Yttrito-hlinitý granát ($Y_3Al_5O_{12}$). YAG je bezbarvý, opticky izotropní krystal kubické struktury [33], [34].

Používaný luminofor yttrium granát hliníku se navíc dotuje Cerem (Ce). Výsledný žlutý luminofor se zapisuje ve tvaru $Y_3Al_5O_{12}:Ce_3$ (YAG:Ce). Ten se implementuje do čipu novou speciální metodou nazvanou Lumiramic, která zvýší kvalitu bílého světla [33]. V rámci publikací bylo studováno, zda je možné použít LED zdroje záření pro komunikaci na bázi YAG [34], [35]. Druhou možností je konfigurace při spojení diod červené a modré barvy s použitím zeleného luminoforu (Tri-chromatické bílé světlo) a nebo při spojení diod červené a modré barvy s použitím tyrkysového a zeleného luminoforu (Tetra-chromatické bílé světlo) [33], [34]. Výkonové polovodičové zdroje záření PLED se často využívají v okamžiku, kdy spojujeme funkcionalitu osvětlování a komunikace v jednom okamžiku pro

systemy VLC.

5.1 Vnitřní optické bezvláknové sítě ve viditelné i neviditelné části spektra

Na počátku vývoje systémů pro vnitřní komunikace se prosazovaly IR systémy s malým výkonem. Vývoj směřoval od systémů s přímou viditelností k difúzním systémům. Rostly postupně přenosové rychlosti a s tím i dosahy. Na počátku se vývoj orientoval pouze na komunikační systémy, současné využití pro osvětlování nebylo zkoumáno pro neexistenci vhodných zdrojů záření.

Infračervený přenos byl testován pro komunikaci u vnitřních bezvláknových optických sítí již v roce 1978 společností IBM, která s týmem vědců Fritze R. Gfelleraa a Urse Bapsta jako první publikovala výsledky na toto téma. Pracovní vlnová délka byla 950 nm. Systém se skládal ze satelitu, který byl tvořen 40 LED (GaAs) zdroji záření o celkovém výkonu 16 mW. Přenosová rychlost kanálu byla $64 \text{ kb}\cdot\text{s}^{-1}$ s nosnou frekvencí 256 kHz duplexně pomocí využití modulace s fázovým klíčováním PSK (Phase Shift Keying). Každá stanice využívala 9 fotodetektorů a 10 LED diod. Teoreticky se předpokládá, že přenosová rychlost u difúzních konceptů by se mohla pohybovat okolo $25 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ pro místnost o velikosti 10 metrů na všechny strany pro jednu buňku [36].

V roce 1985 prezentovala společnost Hewlett-Packard Labs svůj vývoj na poli bezvláknového přenosu o rychlosti $1 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ na vzdálenost 50 metrů pro přímou viditelnost a směrovou orientaci. Výstupní výkon byl 165 mW, chybovost BER (Bit Error Rate) se pohybovala na úrovni 10^{-9} a pracovní vlnová délka byla 660 nm [32]. Témže roce firma Hitachi prezentovala svoje výsledky pro koncept LOS přenos v infračervené oblasti a směrovou orientaci o rychlosti $1 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ při vzdálenosti 5 metrů mezi vysílačem a přijímačem. Chybovost byla na úrovni 10^{-7} a celkový vyzařovaný výkon z LED zdrojů záření byl 300 mW. Úhel vyzařování byl 120° a pro komunikaci se využila modulace s frekvenčním klíčováním FSK (Frequency Shift Keying). Po tomto úspěchu se snažilo nezávisle na sobě několik vědeckých týmů přijít s vyšší přenosovou rychlostí [32].

To se však podařilo až společnosti AT&T Bell Labs v roce 1987, která opět využila stejného konceptu jako HP Labs (Yen a Croford), nicméně přenosová rychlost již dosahuje $45 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ při emitovaném výkonu ze zdroje záření o velikosti 1 mW. Pracovní vlnová délka byla 800 nm a používala se modulace OOK (On Off Keying), což je jinými slovy modulace s amplitudovým klíčováním ASK (Amplitude Shift Keying) [32].

V roce 1993 B. T. Labs oznámila nový buňkový bezdrátový IR systém, který provozuje na $50 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$. Některé části jsou vyvinuty společností BT, jako je použití počítačově generovaných hologramů pro zvýšení bezpečnosti lidského zraku u vysílačů, které lépe rozprostírají vyzařované záření. Laser a hologram jsou součástí vysílače, který emituje záření o optickém výkonu 14 dBm na vlnové délce 850 nm. Přijímač je tvořen PIN diodou o velikosti $7 \times 7 \text{ mm}$ s tenkovrstvým optickým filtrem s šířkou pásma propustnosti 50 nm

s čočkou, která poskytuje fokusaci optického výkonu. Citlivost přijímače byla -33 dBm a tento systém byl schopen pokrýt místnost o velikosti $2,2 \times 2,2 \times 3$ metry [32].

V roce 1994 přišla B. T. Labs. ve spolupráci s vědeckými pracovišti s novým vysokorychlostním systémem s přenosovou rychlostí $155 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$. Tato novější verze byla rozšířena o zdroje záření vyzařující 40 mW a 5 mm^2 aktivní oblastí s lavinovými fotodiodami APD. Další změna topologie toho systému na buňky dovolila zvýšit přenosovou rychlost až na $1 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$. Směrnost u tohoto systému byla zajištěna pomocí řízených optických soustav. Zkoumali se i možnosti využití směrování sledovacího polovodičového pole tvořeného maticí z vysílačů a přijímačů, před kterými byly umístěny zobrazovací čočky poskytující různá zorná pole s vyzařovacími úhly [32].

Během období 1994 až 1996 vědečtí pracovníci G. W. Marsh a M. Kahn prezentovali difúzní bezvláknovou koncepci s přenosovou rychlostí $50 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ s OOK modulací v infračervené oblasti. Bitová chybovost dané difúzní sítě byla i s osvětlením na pozadí 10^{-6} pro vzdálenost 2,9 metrů. Zdrojem byl optický zdroj pracující na vlnové délce 806 nm a byl umístěn v rámci místnosti, která měla všechny stěny i strop nabarveny bílou barvou pro rovnoměrnou odrazivost. Průměrný výkon tohoto zdroje dosahoval hodnoty 475 mW . Přijímač byl tvořen hemisférickým (polokruhovým) optickým koncentrátorem o poloměru 2 cm s indexem lomu $1,78$ pokrytý antireflexním povlakem, 1 cm^{-2} PIN fotodiódou tvořenou z křemíku. Tento koncentrátor poskytoval pro zorné pole o velikosti 78° zisk $4,5 \text{ dB}$. Přijímač byl také tvořen tenkovrstvým propustným optickým filtrem s centrální vlnovou délkou 815 nm při šířce pásma propustnosti velikosti 30 nm . Tento filtr měl účinnost přenosů na 68% a byl připojen k hemisférickému povrchu koncentrátoru. PIN fotodiody na přijímači byly připojeny k hybridnímu vysokoimpedančnímu předzesilovači. Požadovaný přenos a detekce byly zajištěny pomocí intenzitní modulace s přímou detekcí, která díky své jednoduchosti poskytuje efektivní prostorové rozložení. Tento systém využíval pole osmi laserových diod za difuzorem tvořeným plexisklem, který poskytoval téměř blízké Lambertovské rozložení záření pro získání dostatečného množství infračerveného záření k vykrytí celé místnosti o velikosti $8,4 \times 6,3 \times 3,9$ metrů. Toto pole IR zdrojů distribuovalo záření o velikosti $97,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$. Obnova taktu byla zaručena pomocí fázového závěsu druhého řádu PPL (Phase Locked Loop) [37].

Velice zajímavou prací byl výzkum od D. C. O'Briena a dalších, kteří vyvinuli bezvláknový infračervený systém založený na bezvláknových optických satelitech, jenž nazvali základnové stanice. Tyto stanice byly uchyceny ke stropům v místnosti k výměně informací mezi počítači, které obsahovali IR terminál. Základnová stanice poskytovala sedmi kanálový přenos dat o celkové rychlosti $155 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$, jenž pracoval na vlnové délce 980 nm při kódování Manchester (později se využilo vysílání na vlnové délce 1400 nm , kvůli splnění bezpečnostních předpisů). Vzdálenost mezi základnovou stanicí a IR terminálem bylo v rozpětí 2 až 4 metrů [38].

V roce 2004 byla publikovaná práce od Ch. Singha a dalších na téma vytvoření buňkových základnových stanic umístěných na stropě místnosti připojených na páteřní síť.

Navrhovaná topologie měla $100 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ přenosovou rychlost založenou na diferenční pulzně polohovací modulaci DPPM (Differential Pulse-Position Modulation) při využití protokolů s vícenásobným přístupem a detekcí kolize při komunikaci CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) a identifikátorem síťového zařízení MAC (Media Access Control). Navrhovaný vysílač se skládal z řady VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser) laserových zdrojů, které měly pracovní vlnovou délku na 1400 nm a vysílač tvořily zobrazovací čočky následované InGaAs (Indium Gallium Arsenide) fotodetektory s úzkým zorným polem [39].

V roce 2004 přichází T. Komine a M. Nakagawa se systémem LED zdrojů záření, které ozařovaly místnost o velikosti $5 \times 5 \times 3$ metry. LED zdroje byly instalovány do výšky $2,5$ metru od podlahy. Do místnosti byl umístěn stůl ve výšce $0,85$ metrů od podlahy a na něm umístěn komunikační terminál. Celkem byly umístěny 4 zdroje záření, které tvořilo 60×60 LED diod. Rozestup mezi LED diodami byl 1 cm ze všech stran. LED čip vyzařoval v částečném úhlu 70° poloviční výkon a svítivost čipu byla $0,73 \text{ cd}$. Celkový vysílaný výkon zdroje byl 20 mW . Pro komunikaci se využila koncepce NLOS s OOK modulací. Rychlost přenosu dat se pohybovala na úrovni $100 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$. Poté bylo simulačně ověřeno, že pro větší přenosové rychlosti je nutné řešit zorné pole u přijímačů, kdy u FOV o velikosti 40 až 50° můžeme ve viditelném spektru dosáhnout až $200 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ [40].

V roce 2006 prezentují výsledky simulační práce P. Amirshahi a M. Kavehrad využití LED zdrojů záření ve viditelném spektru pro vytvoření vnitřní bezvláknové sítě o rychlosti teoreticky až $1 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$ při využití modulace OOK. Byla zvolená velikost modelované místnosti na rozměry $6 \times 6 \times 3$ metry s rozestupem zdrojů záření 2 metry na stropě a 1 metr na stěnách. Pro správnou funkci a udržení přenosové rychlosti musí 2 vysílače využít LOS koncepci a zpoždění mezi nimi může být maximálně 1 ns pro dodržení nízké chybovosti ISI (Intersymbol Interference) [41].

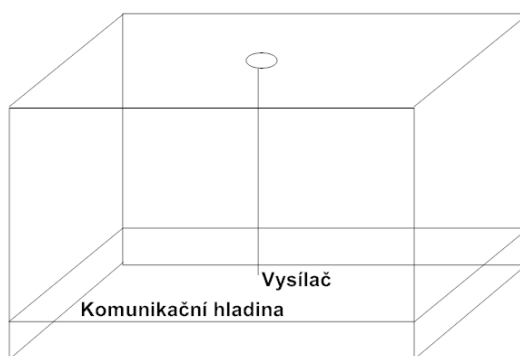
6 OPTICKÉ VYSÍLAČE PRO VNITŘNÍ OPTICKÉ BEZVLÁKNOVÉ SÍTĚ

Optické vysílače pro vnitřní optické bezvláknové sítě můžeme rozdělit do dvou velkých skupin. První skupina vysílačů pracuje na principu nepřímé viditelnosti mezi vysílačem a přijímačem, to jsou tzv. difúzní sítě. Ke zvýšení efektivity těchto vysílačů se často používají difuzory, jejichž účinnost může dosáhnout až 70 %. Difuzory jak již bylo uvedeno dříve, mají za úkol snížit hustotu vysílaného optického výkonu na takovou úroveň v kombinaci s rozptylem světla tak, aby nedošlo k poškození lidských očí. Druhá skupina vysílačů pracuje na principu přímé viditelnosti [32]. Oba systémy jsou základem pro mobilní optické komunikace a jejich základní koncept lze využít v případě přímé viditelnosti pro osvětlování.

6.1 Optické vysílače pro vnitřní optické bezvláknové sítě s nepřímou viditelností

6.1.1 Konvenční difúzní systém

Konvenční difúzní systém CDS (Conventional-Diffuse-System) je nejjednodušší případ difúzní sítě, jaká může být zhotovena. Systém používá jednoho vysílače a přijímače se širokým zorným polem o velikosti 180° . Vysílač vysílá z komunikační roviny optický svazek do stropu, od něhož se světlo odráží do všech směrů v rámci místnosti. Problém u tohoto systému však nastává s rovnoměrným pokrytím v rámci místnosti a to především v rozích, kde úroveň dopadajícího výkonu klesá razantním způsobem. Model tohoto systému můžeme vidět na obrázku 6.1, [42].



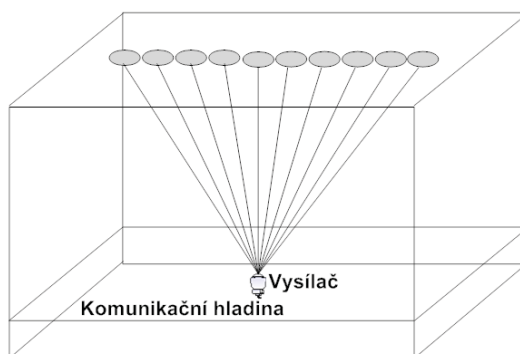
Obr. 6.1: Konvenční difúzní systém

Vícenásobné úzkosvazkové optické vysílače se prokázaly jako efektivní vysílače, které odstranily hlavní problémy přímého spojení mezi vysílačem a přijímačem ve vnitřních optických bezvláknových sítích, a zároveň splňují požadavky bezpečnosti očí. M. R. Pakravan

a kol. zjistili, že úzké svazky mohou být prakticky vytvořeny použitím holografického optického difuzoru, který je umístěn na výstupu optického vysílače. Ve své práci nadále řešili i porovnání vyzařování výkonu holografického difuzoru s opálovým skleněným difuzorem na základě přijatého optického výkonu rozprostřeného v místnosti u přijímače a kanálové zpoždění. Bylo navrženo a sestrojeno několik prototypů vysílačů s difuzorem, jež se liší směrovostí vyzařovaných úzkých optických svazků [43], [44].

6.1.2 Jednopásový vícesvazkový vysílač

Jednopásový vícesvazkový vysílač LSMS (Line-Strip-Multibeam-Transmitter) navrhli S. T. Jivkova a M. Kavehrad a použili proto objemový CGH (Computer-Generated Holography) holografický difuzor, který dokázal měnit amplitudu i fázi za cenu menší účinnosti tohoto optického prvku [45], schéma na obrázku 6.2. Tento difuzor navrhli tak, aby vysílané svazky vytvořily na stropě místnosti o velikosti $6 \times 6 \times 3$ metry pás světelných stop, kdy optické intenzity jednotlivých světelných stop jsou totožné. Každý pás obsahuje několik světelných stop, které jsou od sebe stejně vzdáleny. Hologram byl navržen v několika provedeních například, tak aby vytvářel 8×8 stop s 80 % difrakční účinností. Kolísání intenzity mezi stopami bylo menší než 3,5 %. Například 8 úrovněvým počítačem generovaný hologram produkuje 10×10 svazků při 87 % difrakční účinnosti s kolísáním intenzity u svazku menší než 1,5 % [42], [45].

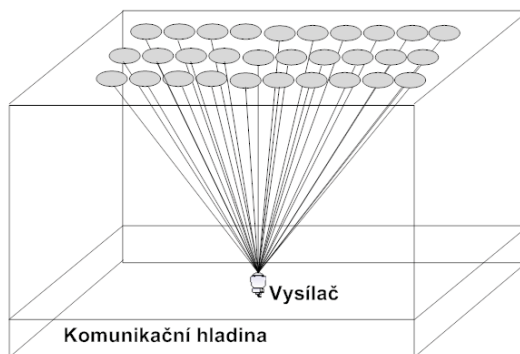


Obr. 6.2: Jednopásový vícesvazkový vysílač

6.1.3 Vícepásový vícesvazkový optický vysílač

G. Yun a M. Kavehrad poprvé navrhli vícepásový vícesvazkový optický vysílač SMC (Spot-Diffusing Multi-Line-Of-Sight) zobrazený na obrázku 6.3. Tento SMC experiment byl založen následovně. Jako zdroj světelného záření je použita laserová dioda. Optický vysílač vysílá úzké svazky na vlnové délce 780 nm a průměrném výkonu 2 dBm namířené do pravidelných směrů na strop místnosti, na níž se tvoří světelné stopy. Tyto světelné stopy jsou od vysílače vzdáleny 3 metry. Pro vytvoření takové konfigurace bylo nutné použít holografický prvek. Důležitým aspektem při tvorbě této konfigurace je i to, že jednotlivé

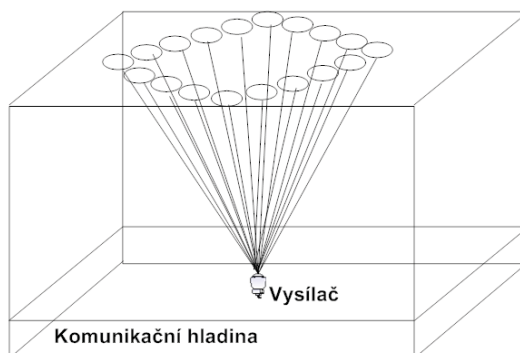
světelné stopy mají stejnou optickou intenzitu. Příjímač byl tvořen vysoko-impedační PIN fotodiodou pro dosažení lepší citlivosti a elektrickým filtrem pro potlačení nežádoucího parazitního osvětlení. Optické filtry byly z barevného skla pro potlačení viditelného světla. Mezní vlnová délka filtru byla 720 nm. Nicméně využití filtrů sebou přineslo problémy v podobě snížení přijatého optického výkonu signálu o 10 %. Elektrický filtr byl tvořen Butterwordovým filtrem třetího řádu s mezní frekvencí 2 kHz [46].



Obr. 6.3: Vícepásový vícesvazkový vysílač

6.1.4 Diamantový vícesvazkový vysílač

Později byla navržena vědci A. G. Al-Ghamdi a J. M. H. Elmirghani nová geometrie vícesvazkového vysílače do tvaru diamantu DMD (Diamond Multispot Diffusion) více na obrázku 6.4. Tento tvar vysílání vznikl pomocí čtyř přímých pásů. Každý pás se skládal z 20 světelných stop, ve vzdálenosti 10 cm mezi sebou ze všech stran. Příjímače byly umístěny v různých místech komunikační hladiny. Tento typ konfigurace poskytoval dobré pokrytí v místě vysílaných světelných stop, nicméně problematika rohů místnosti stále nebyla dostatečně vyřešena [47].



Obr. 6.4: Diamantový vícesvazkový vysílač

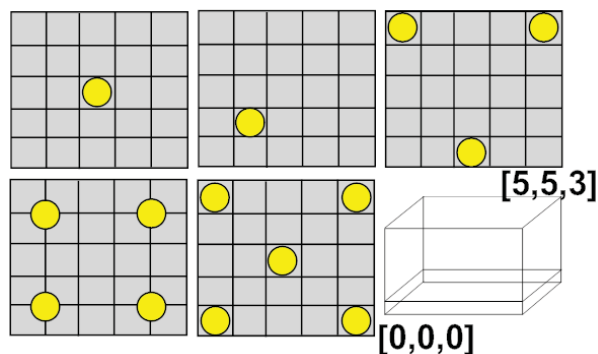
6.2 Optické vysílače pro vnitřní optické bezvláknové sítě s přímou viditelností

Oproti difúzním sítím nabízejí vysílače pro koncepty s přímou viditelností mnohé výhody, které již byly uvedeny dříve (např. maximální výkonová efektivita konceptu mezi vysílačem a přijímačem). Za podstatnou výhodu u difúzních konceptů považujeme možnost flexibility a mobility v rámci pokrývané místnosti. Jako nevýhodu považujeme vícecestné šíření světelného signálu a infračervených vlnových délek pro vzdálenost 5 metrů vzniká ztráta 50–70 dB (J. B. Carruthers a J. M. Kahn 1997) [48]. Tyto difúzní koncepty již byly řešeny celou řadou vědeckých týmů např. F. R. Gfeller a U. H. Bapest 1979 [32]; J. R. Barry a J. M. Kahn 2000 [32]; J. B. Carruthers a J. M. Kahn 1998 [32]; J. M. Kahn a další. 1998 [32]; Z. Ghassemlooy a A. C. Boucouvalas 2005 [50].

Difúzní koncepty využívají pro svoji činnost jednoho vysílače, který vysílá v místnosti světelný signál, který však má nerovnoměrné rozložení optické intenzity v daném prostoru. To sebou přináší problémy v podobě volby vhodného přijímače a řešení výkonové úrovně odstupů signálu od šumu. Většina vědeckých týmů se zaměřila na testování difúzních konceptů pro menší místnosti, nicméně s jejich velikostí rapidně klesá účinnost pokrytí vysílačem a rostou výkonové ztráty. Nabízí se jednoduché řešení v podobě zvýšení vysílaného optického výkonu pomocí nějakého silnějšího zdroje, zde jsme limitováni bezpečnostní normou IEC pro ochranu lidského zraku. Několik vědeckých týmů jmenujme například Pakravan a další 1996; G. N. Bakalidis a další 1996; J. B. Carruthers a J. M. Kahn 1998; J. M. Kahn a další v roce 1998 [32]; S. T. Jivkova a M. Kavehrad 1999 či H. Yang a C. Lu 2000 [49] se proto rozhodli zaměřit na to, jak řešit tento problém za pomoci využití několika vysílačů. Použití více vysílačů sebou přináší možnost, jak dosáhnout lepšího vykrytí místnosti a zároveň mít rovnoměrné rozložení optické intenzity. Tato difúzní koncepce splňuje i normu IEC. Výkonová úroveň v bodě může být vypočítána pomocí impulsní odezvy kanálu. Bylo již navrženo několik algoritmů pro výpočet impulsní odezvy jako je rekurzivní metoda (J. R. Barry a J. M. Kahn 1993), statistický přístup (R. Perez Jimenez a další 1997), DUSTIN algoritmus (F. J. Lopez-Hernandez a M. J. Betancor 1997), metoda výpočtu pomocí Monte Carlo (R. Perez Jimenez a další 1998), upravená metoda Monte Carlo (R. Perez Jimenez a další 1998) a iterační síť založené na modelování (J. B. Carruthers a J. M. Kannan 2002). Všechny tyto modely však stále braly v potaz pouze jeden vysílač v místnosti [32], [49].

V roce 1996 G. N. Bakalidis a další přichází s prací, která se zabývá počtem použitých vysílačů umístěných na stropě místnosti o velikosti $5 \times 5 \times 3$ metry k dosažení rovnoměrného pokrytí optické intenzity místnosti. Celkově bylo simulováno 5 konfigurací s různým počtem vysílačů a to s 1, 2, 3, 4 a 5 viz obrázky 6.5. Jednotlivé konfigurace byly podrobeny simulování a reálnému měření, při kterých bylo zjištěno, že nejrovnoměrnější rozložení optické intenzity v prostoru se dosahovalo při použití 4 vysílačů. Celkový vysílaný výkon zdrojů byl 1 W [49]. Avšak ani toto výrazné zvýšení výkonů neumožňuje

spojení obou funkcionalit osvětlování a komunikace.



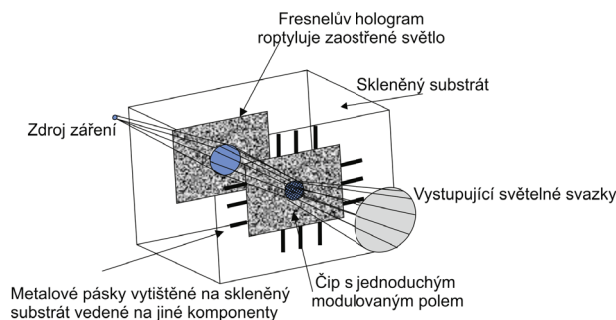
Obr. 6.5: Různé konfigurace umístění vysílačů [49]

V roce 2005 byla publikována práce Ch. Singha a kolektivu, kteří zhotovili optický vysílač, jenž byl realizován jako dvourozměrné pole (2-D) VCSEL laserů s patřičnými řídicími obvody. VCSEL lasery poskytovaly úzký svazek a díky tomu se daly jednodušeji modulovat i pro vysoké přenosové rychlosti a navíc mají malou spotřebu. Byla použita matice VCSEL laserů o počtu 9×9 , zorné pole přijímače tvořeného PIN detektorem založeným na InGaAs bylo od $\pm 45^\circ$ do $\pm 50^\circ$, průměrný optický výkon 10 mW a vlnová délka 1550 nm. Vysílané svazky měly Gaussovský profil, ale vytvořily nejednotné rozložení optické intenzity po místnosti. Použitím tvarovacích a řídicích optických prvků bylo dosaženo jednotného rozložení optické intenzity. Pro dosažení lepšího odstupů signál od šumu SNR (Signal Noise to Ratio) bylo využito u přijímačů i nezobrazovací optiky (Non-Imaging) v podobě koncentrátorů [51].

Optický bezvláknový koncept s přímou viditelností a infračerveným zářením navrhnul v roce 2010 Le Minh a kolektiv [51]. Optický vysílač se skládal ze tří oddělených kanálů s řídicím obvodem, laserem a optickým systémem. Každý přijímač dokázal přijmout 3 kanály. Zdroj záření byl modulován pomocí MAX3869 a vlnová délka byla 820 nm (AXCEL Optics) při průměrném výkonu 25 mW. Optický systém byl tvořen kolimátorem a ozařoval poté komerční holografický difuzor (LUMINIT 10° LSD). Difuzor poskytoval zdroj Třídí 1 pro ochranu zraku a šířil osvětlení v požadovaném 10° zorném poli vysílače. Přijímač se skládal z optického filtru, několika optických systémů, lavinové fotodiody APD a transimpedačního zesilovače následovaný omezujícím zesilovačem. Interferenční filtr s šířkou pásma 10 nm byl použit pro zabránění dopadajícího okolního světla na optický systém, jenž se skládal ze dvou plano-konvexních čoček. Tyto čočky poté zaměřovaly světlo na APD fotodiodu. Celková šířka pásma je přibližně 850 MHz s citlivostí 35 dBm pro NRZ (Non Return to the Zero) kódování při přenosu dat $1,25 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$, [51].

S množstvím typů difúzních sítí s využitím difuzorů se vedl výzkumný směr i v této oblasti. Postupně byly publikovány články, které využívali jiného typu difuzoru pro svoji funkci. Jednoduché situační schéma počítačem generovaným hologramem je zobrazen na obrázku 6.6. Tento typ difuzoru se využívá např. v publikaci od P. Mckeena a kolektivu,

kde je využit Fresnelův počítačem generovaný hologram difuzoru pro rozptýlení světla v prostoru. Pro osvětlovací účely byl použit zdroj záření emitující světelné záření o vlnové délce 850 nm [53].



Obr. 6.6: Počítačem generovaný hologram [53]

Další práce věnovaná holografickým difuzorům byla publikována S. T. Jivkovou a M. Kavehradem. Ti se zabývali vytvoření počítačem generovaným hologramem s produkcí několika rozptýlených paprsků s difrakční mřížkou pro vytvoření požadovaného vysílaného vzoru. Účinnost tohoto holografického difuzoru byla 80 % bez použití difrakční mřížky, poté klesla účinnost ještě o dalších 20 %. Difuzor byl navrhnut pro pole o 10×10 světelných stop s rovnoměrnou intenzitou [54].

7 OPTICKÉ BEZVLÁKNOVÉ SÍTĚ S VYUŽITÍM OPTICKÉHO VLÁKNA JAKO VYSÍLAČE

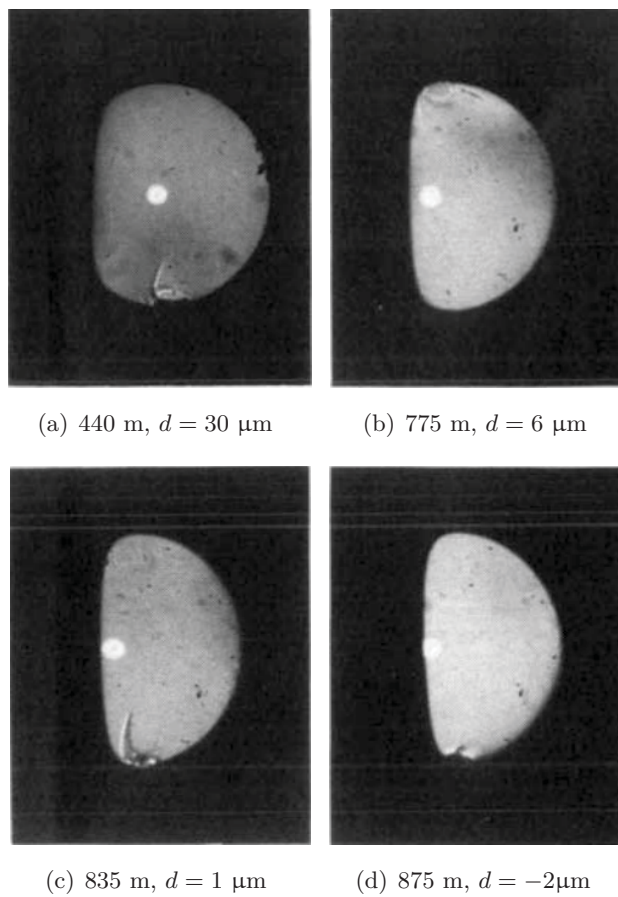
Podstatnou nevýhodou výše uvedených systémů je chlazení polovodičových zdrojů záření, zejména v případě růstu vyzářených výkonů. Proto se hledaly alternativy, jak oddělit místo vzniku světla od místa jeho užití. Tím se dosáhlo možnosti účinně chladit zdroje, aniž by rušily vlastní komunikace. Pro vedení světla do komunikačního prostoru se jeví jako vhodné přenosové médium optické vlákno. V této kapitole jsou pak shrnuty poznatky získané studiem problematiky využití optického vlákna jako přenosového média v oblasti bezvláknových systémů.

V roce 1986 prezentují C. A. Millar a kolektiv speciální profil optického ztrátového vlnovodu (D-profil), který je vytvořen z preformy při použití metody MCVD (Modified Chemical Vapor Deposition). Preforma se skládala z jádra tvořeného oxidem křemičitým SiO_2 , jenž byl dopován oxidem germaničitým GeO_2 pro vysoký světelný lom a pláštěm z čistého oxidu křemičitého [55]. Pro zajištění plochosti preformy podél osy bylo nutné každou preformu nutno brousit a leštit. Jelikož byla preforma zužována mění, se hodnota d (vzdálenost mezi jádrem a plochou stranou) od hodnoty $57 \mu\text{m}$ k $0 \mu\text{m}$. Na obrázku 7.1 je zobrazeno pro různé délky vytaženého optického vlákna hodnota d z různých preforem. Útlum vlákna byl $20 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ při vlnové délce 1523 nm . Pracovní vlnová délka D-profilu je 633 nm [56].

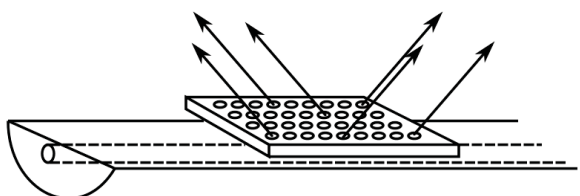
Tohoto profilu ztrátového vlnovodu využil v roce 1993 tým vědců pod vedením P. P. Smytha jako zdroje záření pro bezvláknovou komunikaci. Optický výkon byl distribuován skrze jádro tohoto ztrátového vlnovodu na vysílací element, který měl vyšší index lomu, než-li je jádro ztrátového vlnovodu. Jestliže se materiál s vyšším indexem lomu setká s vybroušenou plochou vlákna, bude světlo z jádra vyzářeno do vysílacího elementu díky vlnovodnému efektu. Rychlost, se kterou se světlo vyváže z jádra, je primárně definována vzdáleností jádra od vybroušené plochy D-profilu. Optická vyzařovací místa (vysílací element) mohou být vytvořena za pomoci mikročoček nebo z rozptýlených vyzařovacích elementů D-profilu. Vznikající optický výkon může být použit pro pokrytí širokého nebo úzkého úhlu, podle toho, pro jakou aplikaci potřebujeme vlákno s D-profilem využít [30].

V rámci práce byl do D-profilu za pomoci polovodičového zdroje záření vyzařován výkon na vlnové délce 1500 nm . Z křemíkových mikročoček bylo vytvořeno pole více na obrázku 7.2, kdy každá mikročočka měla velikost o rozměru plochy 1 cm^2 a toto pole obsahovalo 6400 mikročoček ve vzdálenosti $250 \mu\text{m}$ mezi sebou. Světlo vyzařované z tohoto pole mikročoček bylo rovnoměrné. Ve skutečnosti bylo vyzařováno 80 % vstupního výkonu ze zdroje záření pomocí vyzařovacího pole tvořeného mikročočkami. Bylo spočítáno, že by takovéto uspořádání stačilo pro pokrytí stolu o velikostech 4 metry do délky a 2,5 metrů do šířky [30].

V článku od K. Wanga a kolektivu se již plně využívá zakončení optických vláken pro distribuci optické intenzity v prostoru pro vykrytí komunikace. Zvolen byl koncept



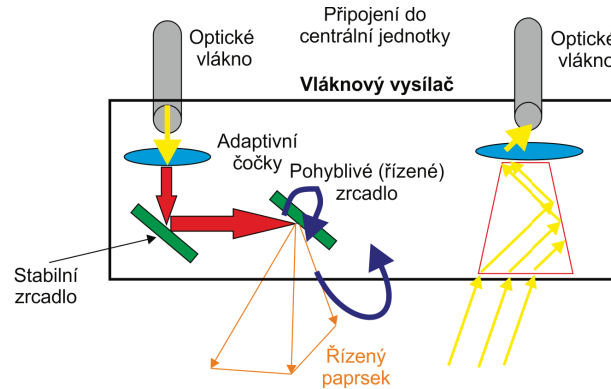
Obr. 7.1: Optické ukončení vlákna se specifikovaným rozdílem podél různě vytaženého vlákna, [56]



Obr. 7.2: Schématický diagram ztrátového vlnovodu s D-profilem využitý jako vysílač, [30]

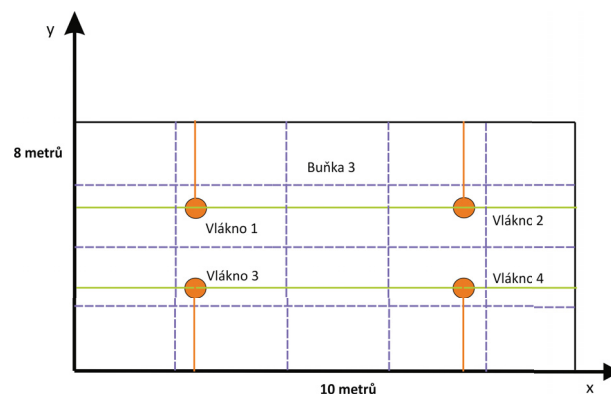
s přímou viditelností LOS. Avšak pro zjišťování pozice se využívá radiofrekvenční signál RF. Autoři navrhli systém tak, aby byl jednoduše připojitelný i na DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) systémy, což z něj dělá do budoucna zajímavé řešení. Testovaná místnost měla velikosti $10 \times 8 \times 3$ metry. Vysílač pro vzestupný směr může být buď fixní, nebo mobilní a je umístěn v rovině, myslí se komunikační rovina ve výšce jednoho metru nad zemí [57], [58], [59]. Struktura optického vysílače umístěného na stropě testované místnosti je na obrázku 7.3.

Testovaná místnost je navíc rozdělena na 8 obdélníkových skříní (oddílů) rovnoběžně



Obr. 7.3: Struktura vysílače pro vzestupný směr umístěného na stropě, [57]

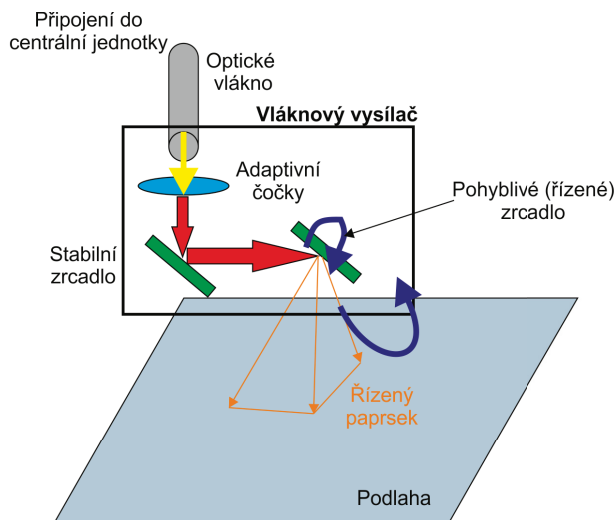
s povrchy stěn místnosti, jak je vidět na obrázku 7.4. Velikost každé skříně je $2,5 \times 3 \times 1,5$ metru. Všechny oddíly jsou neprůhledné, takže dopadající signál je buď pohlcen, nebo blokován. Navíc do každého oddílu byla vložena standardní výbava v kancelářích či domácnostech např. židle, stolky, police apod. Celá testovaná místnost je ještě osazena osmi wolframovými žárovkami o 100 W, pro simulaci parazitního světla [57], [58], [59].



Obr. 7.4: Upřesnění pozice ukončení optického vlákna a buněk [58]

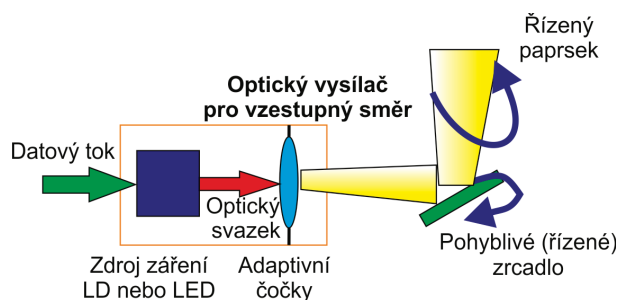
Pro sestupný směr bylo využito konců optických vláken jako vysílače s přidavnou adaptivní optickou technikou. Testovaná místnost je rozdělena na 20 buněk, kdy každá z nich má velikost 2×2 metry. K získání mobility je nutné využít adaptivní optiky v podobě čoček a zrcadel. Díky vytvoření buňkové soustavy a stejných vysílačů je vykrytí všech buněk rovnoměrné a šířka svazku rovněž. Výstup z jednovláknových optických vláken využitých jako vysílač lze aproximovat Gaussovým profilem. Pro sestupný směr byla zvolena vlnová délka 1550 nm pomocí DFB (Distributed Feedback Laser) laserového zdroje záření [57], [58], [59] schématické uspořádání je na obrázku 7.5.

Pro vzestupný směr se autorský kolektiv rozhodl využít simulace, jelikož je tento směr daleko náročnější, nežli je sestupný směr. Opět bylo využito adaptivní optiky v podobě zrcadel a čoček, jak je vidět na obrázku 7.6. K lokalizaci polohy bylo využito WiFi systému,



Obr. 7.5: Jednoduchý návrh struktury vysílače pro systém v sestupném směru [58]

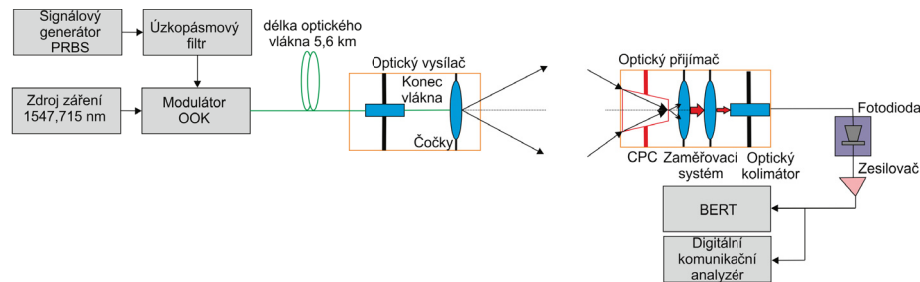
který měl za úkol směřovat ohniskovou vzdálenost adaptivní optiky a směřovat i zrcadla na konce optických vláken umístěných na stropě. Koncentrátory a čočky jsou využity ke zvýšení množství světla dopadajícího do optického vlákna. Vysílač pro vzestupný směr je blízko uživatelům, což značí problém s bezpečným vyzařovaným výkonem z důvodu normy IEC. V simulacích byla otestována vlnová délka 1550 nm s výkonem 7 mW pro laserový zdroj záření. Na základě simulací bylo zjištěno, že koncepce systémů pro vzestupný směr může mít přenosovou rychlost až $200 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ s dosažením i dostatečné mobility.



Obr. 7.6: Schéma návrhu vysílače pro vzestupný směr při simulaci, [58]

Autorský tým ověřoval své předpoklady pomocí experimentálního měření. Při něm byly zkonstruovány všechny vysílače a přijímače pro vytvoření optické bezvláknové sítě, jak je vidět na obrázku 7.7. Optický signál byl generován v centrální stanici, která vysílala signál do testovací místnosti pomocí optické distribuční sítě. Optická distribuční síť byla simulována pomocí 5,6 km dlouhého jednovidového vlákna. Světlo z nakonektorovaného optického vlákna prochází čočkami, aby se zvýšila divergence svazku vysílaného do testované místnosti, než dopadne na přijímač tvořený složeným parabolickým koncentrátorem. Zde se využívá spojeného systému skládajícího se z několika čoček a optického kolimá-

toru pro směřování světla na fotodiodu s malou citlivou ploškou. Při použití fotodiody s velkou plochou citlivosti je celý systém omezen možnou šířkou pásma. V rámci experimentu byla otestována rychlost $1 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$ při OOK modulaci s generováním ($2^{31}-1$ PRBS - Pseudorandom Binary Sequence). Vysílaný výkon byl na úrovni 8,4 dBm při vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem o hodnotě 104 cm, kdy byl použit složený parabolický koncentrátor, jehož velikost zorného pole byla 45° , [58], [59].



Obr. 7.7: Experimentální zapojení optické bezvláknové sítě, [58], [59]

V dalším článku se stejný tým zabývá možností změny vysílaného výkonu s ohledem na šířku vysílaného paprsku a chybovost. Zjistili, že pro výkony 3,2 dBm; 5,9 dBm a 8,3 dBm, pro 1,0; 1,5 a 2 metry šíře optického svazku je chybovost na úrovni BER ($<10^{-9}$). Dalším experimentálním měřením zjistili, že jejich systém pracuje maximálně s dvěma metry širokým optickým svazkem, což odpovídá 8 dBm přenášeného výkonu [57].

V posledním článku stejný autorský kolektiv přináší zvýšení přenosové rychlosti pro jejich systém až na rychlost $12,5 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$ při použití vlnového multiplexu. Konkrétně bylo využito čtyř nosných vlnových délek z rozsahu 1550,12, až 1552,52 nm s roztečí mezi kanály 100 GHz (0,8 nm). Délka optické trasy zůstala stejná stejně jako typ optického vlákna (jednovidové - Corning SMF-28) tj. 5,6 km. Byly zde využity pulsní generátory, jeden pro modulaci (OOK) a další pro tři vlnové délky jsou modulovány jinými generátory. V centrální jednotce jsou jednotlivé použité vlnové délky multiplexovány pro přenos optickou trasou ke konci optického vlákna a poté distribuovány do prostoru testované místnosti. Na straně přijímače jsou jednotlivé nosné pomocí demultiplexeru odděleny. Hodnota vysílaného výkonu byla 8,4 dBm [57], [58], [59], [60].

7.1 Studium problematiky návrhů architektury buňkového systému s využitím optických vláken

Návrh buňkového systému pro bezdrátovou vnitřní optickou komunikaci nahrazuje standardní RF kabeláž a využití vysílacích bodů. Systém se zaměřuje na vybudování optické kabeláže v rámci budovy či domu, která bude tvořena SM (Single Mode), MM (Multi Mode) či POF (Plastic Optical Fiber) vlákny [61]. Jako zdroj komunikace se uvažuje využití FTTx, OLT (Fiber To The x, Optical Line Termination). Jednotlivá vlákna budou

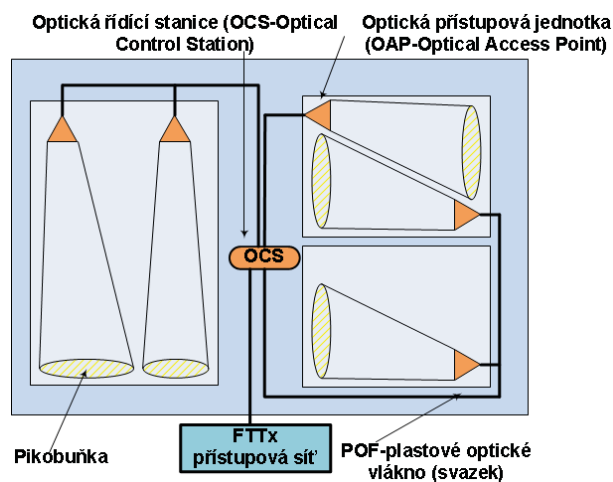
poté vedena do příslušných pater a zde bude tzv. optická řídicí jednotka OCS (Optical Control Station), která bude mít za úkol přeměrovat optický signál do vhodného optického segmentového vysílače pro konkrétní místnost [62].

Jednotlivé svazky vláken budou tvořit segmentový vysílač v rámci nějaké místnosti a zabezpečovat vysokorychlostní datovou komunikaci a osvětlení zároveň. Vystupující signál z konců svazků optických vláken bude směřován na mobilní stanice, které budou převádět optický signál na elektrický. Ve srovnání s jinými již používanými systémy využívající mobilních stanic, dochází více k využití difuzního šíření optického záření. Pozice a počet optických vláken může být dynamicky upravován za použití adaptivní optiky. Pojmem adaptivní optika se myslí především rozptylné čočky, kolimátory, taperované konce vláken z důvodu zvětšení numerické apertury u optických vláken, využití polymerových substrátů PMMA (Poly-Methyl Methacrylate) apod. Je třeba také zdůraznit, že využití optických vláken sebou přináší i nějaké problémy v oblasti útlumu (zeslabení výkonové úrovně signálu), disperze, volba optického vlákna pro vnitřní výstavbu. V dnešní době se dá uvažovat o použití vlákna G.657A či B od OFS, jelikož tato vlákna mají unikátní typ indexu lomu jádra a pláště pro potlačení velikosti vlivů ohybů. Díky moderním výrobním technologiím a procesům došlo i k zásadnímu snížení měrného útlumu na $0,25 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ pro vlnovou délku 1550 nm u SMF-28 od firmy Corning. Nicméně u SMF-28 nezískáme tak velkou hodnotu numerické apertury pro zvětšení vyzařovaného úhlu z konců čel optických vláken.

U optických vláken SMF-28 se projevuje problém s dostatečným navázáním světla do svazku optických vláken. Z tohoto důvodu se jeví vhodnější využití plastových optických vláken či mnohovidových. U obou vláken je daleko větší hodnota NA, a zároveň i vazba světla do svazku vláken je snazší nežli je tomu u SMF-28 vláken. Problémem však u mnohovidových vláken je silná závislost na vidové disperzi, která by značně degradovala možnosti vysokorychlostního přenosu, a zároveň u plastových optických vláken se projevuje velký útlum. POF vlákna se dají vhodně využít na kratší vzdálenost než je 200 m. Mnohovidová vlákna se v dnešní době značně nasazují pro datová centra, kde rovněž není nutné vytvořit dlouhé rozvodové trasy. Společnost Asahi Glass z Japonska vyvinula a navrhla jako první gradientní profil perfluorovaného POF vlákna (Pyrofluid Optical Fiber-Graded Index) [63]. Na pracovní vlnové délce 1300 nm tato vlákna dosahují útlumu menší než je 1 dB na 100 m při přenosové rychlosti $10 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$. Průměrná ztráta optického výkonu u vláken PF-GI-POF při vlnové délce 1550 nm je $150 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$, což odpovídá hodnotě méně než 3 dB pro délku 20 m při kompatibilitě s 10 G Ethernetem. V laboratorních studiích bylo zjištěno, že pomocí modulace lze dosáhnout přenosové rychlosti až $40 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$ na vzdálenost 200 m [64], [65].

Na obrázku 7.8 je znázorněna architektura systému pro vnitřní bezvláknové optické systémy s využitím optického segmentového vysílače pro vykrytí osvětlení a komunikace zároveň. Během experimentu bylo použito zdroje záření pracujícího na 1550 nm o výkonu 10 dBm, kdy přenosová cesta mezi vysílačem a přijímačem byla ve vzdálenosti 2 m.

Na základě relace pro výpočet útlumu bylo spočteno, že útlum trasy dosahuje 41,4 dB. Optická přístupová jednotka podporuje dva módy vysílání a to [65], [66]:



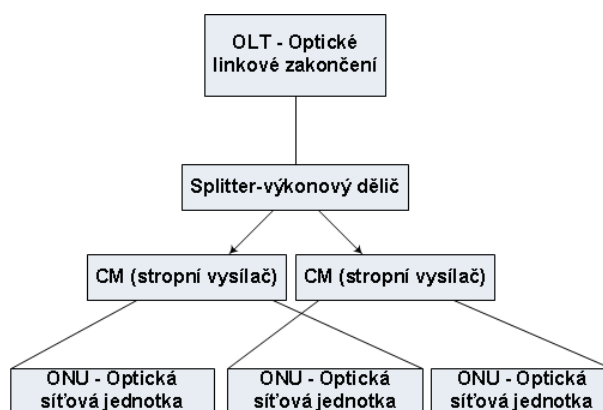
Obr. 7.8: Experimentální zapojení optické bezvláknové sítě na bázi POF vláken, [65], [66]

Přijímač se skládal z APD fotodetektoru s parabolickým koncentrátorem a filtrem pro redukci šumu o šířce pásma 10 nm. Pro vytvoření optických tras bylo použito PF-GI-POF vláken s průměrem jádra 50 μm a délce 20 m. Přenosový systém byl nastaven v simulaci na $2,5 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$ s OOK-NRZ (On Off Keying Non Return to Zero). Na základě simulací bylo zjištěno, že koncentrátor umístěný na přijímači poskytuje 16 dB zisk s chybovostí přenosu dat na $\text{BER}=4\cdot 10^{-10}$ [65], [66], [67], [68], [69], [70], [71].

Pro měření vlivu vychýlení při využití PF-GI-POF vláken bylo sestrojeno v laboratorních experimentální pracoviště, kdy byl použit zdroj záření, jenž přes dělič 1:2 (95:5) budil vlákna o 50 či 62,5 μm . Přes mikroposuvy s GRIN (Gradient-index) čočkami na optické lavici se provádělo zaostření svazku do PF-GI-POF a detektorem snímala hodnota výkonu. Druhá větev děliče byla vedena přímo po detektoru a snímala se hodnota výkonu mimo optickou lavici. Poté se tyto výkony porovnávaly a zjišťovala se hodnota útlumu trasy. Nejhorších výsledků z pohledu útlumu a výkonu bylo dosaženo pro vlnovou délku 1550 nm při délce vlákna 100 m [68]. Byly provedeny testy s ohledem na závislosti vysílačského výkonu vůči šumu a vzdálenosti trasy pro dané topologie [69]. Autorský kolektiv pod vedením Hani Al Hajjar se pokoušel o zhotovení speciálního typu difrakčního prvku, který by byl schopen homogenně distribuovat světelné záření do prostoru pomocí buněk z mnohovidových vláken. Testy byly provedeny pro vlnovou délku zdroje 1550 nm, při přenosové rychlosti $2,5 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$ a modulaci OOK [70]. Stejný kolektiv popisoval možnosti zhotovení difrakčního prvku umístěného před vlákno o velikosti 320x320 pixel, jenž měl sloužit jako detektor s koncentrátorem pro optické bezvláknové sítě [71].

V dalším článku se kolektiv Kolev a spol. [72] zabývá návrhem bezdrátového optického systému pro vnitřní komunikaci s mřížkou stropních vysílačů založených na technologii přímého spojovacího vlákna viz obrázek 7.9. Systém je opět založen na využití sítě EPON

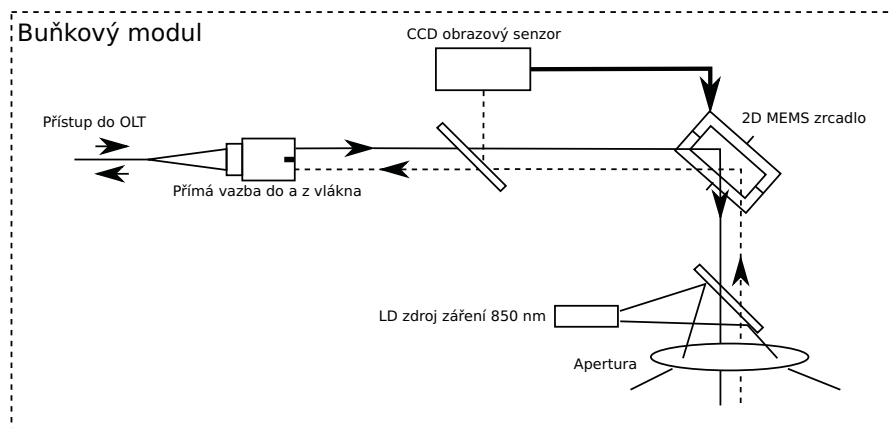
(Ethernet Passive Optical Network) typu bod více bodů P2MP a je schopna zabezpečit plně duplexní přenos dat pro více mobilních zařízení. Celý návrh systému se skládá z centrální jednotky OLT, která vysílá řídicí signály směrem ke koncovým jednotkám ONU/ONT (Optical Network Unit/Optical Network Terminals) a ty zpětně posílají informaci k centrální jednotce. Opět je využito standardních vlnových délek pro EPON síť, nicméně nyní už signály jsou distribuovány skrze tzv. stropní vysílače CM (Ceiling Module). Ve stropním vysílači se nachází optika, která zabezpečuje rozšíření optického svazku a jeho formování do Gaussovského profilu. Autorský tým zkonstruoval systém o 4 stropních vysílačích, které byly umístěny ve formě buňkového systému, kdy se jednotlivé části buněk překrývají tak, aby došlo k maximálnímu pokrytí daného prostoru.



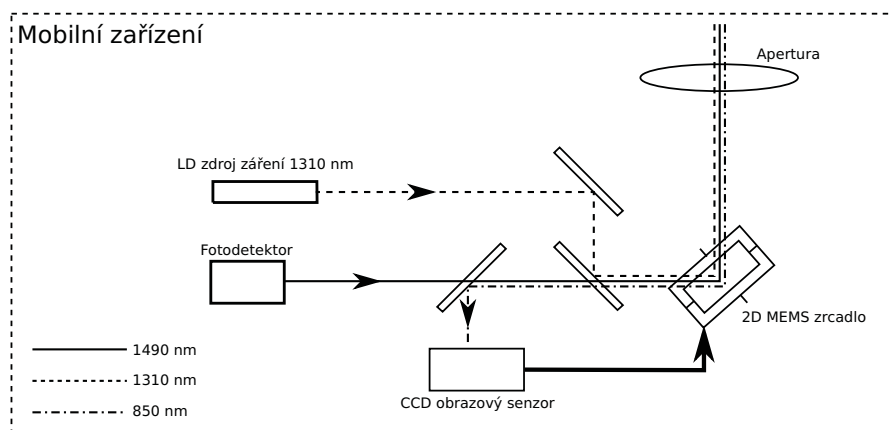
Obr. 7.9: Topologie optické bezvláknové sítě založené na využití stropních vysílačů, [72]

Během dalších výzkumů stejný autorský tým zjistil, že velikost světelné stopy má vliv na velikost BER pro přenosový systém ve směru od OLT k ONU jednotce. Bylo změřeno, že stopa o velikosti 0,75 m v poloměru dosahuje s daným systémem chybovosti 10^{-9} při přenosové rychlosti systému $100 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ dosahuje podobných vlastností pro sestupný směr i pro směr vzestupný [73]. Zcela novou možností pokrytí vnitřních prostor pomocí buňkového systému založeného na 2D MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) (viz obrázek 7.10, 7.11) a obrazových sensorů studoval stejný autorský kolektiv v rámci [73]. Zhotovený systém pomáhá lépe určovat polohu mobilního zařízení vůči pevné stanici umístěné na stropu místnosti, a tím efektivně vykrývat plochy, kde není dostatečně velký výkon pro bezchybnou komunikaci. Jako testovací systém bylo využito EPON síť (IEEE 802.3ah), kde OLT jednotka se chová jako řídicí jednotka a ONU, ONT jsou mobilní jednotky, pohybující se po prostoru v místnosti. Pro řízení MEMS se používá LD pracující na vlnové délce 850 nm a samotná EPON používá konvenčních vlnových délek pro směr od ONU k OLT je to 1310 nm a opačně 1490 nm.

Byly analyzovány i přenosové rychlosti systému dané EPON technologií pracující na $1,25 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$, nicméně daný systém by byl schopen podporovat přenosové rychlosti až do $10 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$. Hlavní nevýhoda toho systému je v podobě současné komunikace s více koncovými zařízeními ve stejném čase. To je dáno rychlostí vychylování MEMS zrcadel



Obr. 7.10: Experimentální zapojení optické bezvláknové sítě-směr sestupný, [77]

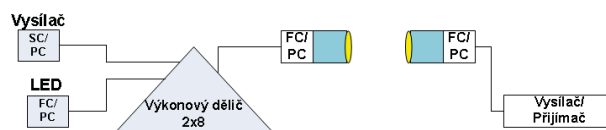


Obr. 7.11: Experimentální zapojení optické bezvláknové sítě-směr vzestupný, [77]

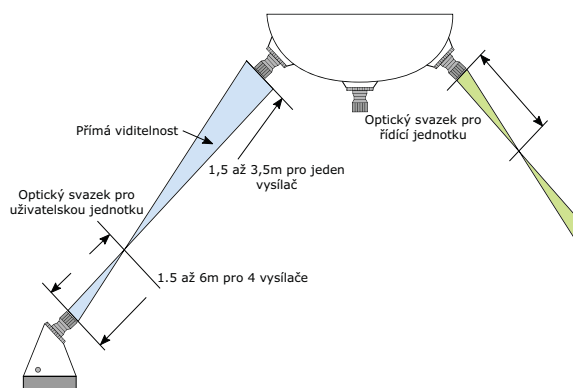
[72], [73]. Hybridní systém komunikace pomocí bezdrátové optické sítě využívající opět EPON pracující pro směr sestupný $10 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$ a směr vzestupný na $1 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$ byl řešen v rámci článku [73]. Celá topologie systému vychází z předchozího zapojení s tím rozdílem, že je využito vyšších přenosových rychlostí. Navíc je do topologie ještě umístěn erbiový zesilovač EDFA (Erbium Doped Fibre Amplifier), kterým se reguluje velikost vysílacího a přijímacího výkonu distribuovaného poté skrze vysílače do prostoru. Pro směrování svazku dopadajícího na detektor koncové jednotky je použito 2D MEMS nastavitelných zrcadel. Vysílací výkon OLT jednotky byl nastaven na 0 dBm a zesilovač EDFA použitý v topologii měl za úkol zesílit signál o 10–15 dBm maximálně s ohledem na bezpečnostní normy vztahující se k vyzařovanému výkonu (intenzitě) v rámci vnitřních prostor pro lidský zrak. Bylo potvrzeno, že BER je závislý na velikosti čerpání z EDFA, a zároveň na velikosti stopy svazku. Autoři použili 5, 10 a 20 cm velké průměry stopy svazku pro $10 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$ a 2, 3 m pro $1 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$ přenos [74], [75]. Nedílnou součástí při testování dané topologie bylo i využití moderních odolnějších typů modulačních formátů vůči vícecestnému šíření na

bázi OFDM [76].

V článku od kolektivu autorů vedených B. Glushkem je definován unikátní typ bezdrátové optické sítě vycházející z jiného konceptu, než jakým byl systém s využitím EPON sítě od autorů vedených D. R. Koleva. Autoři B. Glushko a další využili místo MEMS prvků kolimátorů a optických děličů. Systém je zobrazen na obrázku 7.12, 7.13 a je navrhnut s přímou viditelností na koncovou stanici. Autorský tým pro komunikaci používá velmi úzkých optických svazků o velikosti cca 10–15 mm v průměru při vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem 2–6 m. Vysílací jednotka vyzařuje optický svazek o vlnové délce v rozsahu 1300 až 1500 nm s výkonem cca 4–6 mW s WDM filtrem zabraňující zpětnému odrazu a fotodetektorem k zpětné komunikaci s koncovou jednotkou. Vysílače jsou propojeny jednovidovým vláknem s kolimátory na koncích. Na druhé konce jednovidových vláken jsou spojeny do děliče $2 \times N$ a dále rozděleny na $2 \times N$. Kolimátory mají za úkol měnit divergenci svazku a směřovat ho na koncovou jednotku. Vysílač emituje světlo na vlnové délce 1490 nm, zatímco koncová jednotka emituje světlo na vlnové délce 1310 nm, z toho je patrné, že jsou využívány konvenční vlnové délky dané systémem EPON ver. 2 [77].



Obr. 7.12: Experimentální zapojení obousměrné optické bezvláknové sítě IWON, [77]



Obr. 7.13: Prvotní verze IWON systému, [77]

Synchronizace je prováděná v podobě nadřazené a podřízené jednotky v podobě master a slave, pokud koncová jednotka vyšle signál pro komunikaci do koncové jednotky, tak daná koncová jednotka odpovídá a posílá svá data do centrální jednotky. Autoři v článku představují svůj prototyp vysílače, který je schopen rotovat i s kolimátory v úhlech ± 28 stupňů. Konstrukce kolimátoru musí umět operovat na vlnových délkách 1490, 1310 a 650 nm. Právě vlnová délka na 650 nm má za úkol provádět rotaci a vyrovnání kolimátoru

na koncovou jednotku [78]. V článku jsou testovány možnosti nastavení úhlového natočení kolimátoru, teplotní rozsah a prostorový posun kolimátoru. Bylo zjištěno, že vazební výkon klesá se vzdáleností a teplotou od kolimátoru a zároveň, že je zde relace mezi velikostí šířky pásu optického svazku za kolimátorem [79].

Autorský kolektiv v tomto článku diskutuje možnosti využití optických vláken pro vytvoření vysílače i přijímače. K experimentu je využito optické vlákno SMF-28 (ITU-T G.652.D) v kombinaci s He-Ne (Helium Neon) laserem pracujícím na vlnové délce 632,8 nm. Vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem je 1,63 m a k optimalizaci ostření svazku se používá mikroposuvů. V rámci experimentu autorský tým testoval různé typy čoček a sledoval velikost divergence svazku v prvním kroku. V následujícím experimentu byl zhotoven vysílač, který byl tvořen svazkem 100 vláken stejných parametrů SMF-28 a sledovalo se, jaký má vliv zvyšování vzdálenosti vysílače od přijímače s ohledem na velikost ozařované plochy dané optickými vlákny, dále se studovali hodnoty výkonu vůči posuvu přijímače pro tři různé úhly vychýlení vláken [81]. V rámci tohoto článku [82] se autorský kolektiv pod vedením LoPresti snažil poukázat na nové metody využití optických vláken pro vytvoření vláknového přijímače využívajícího čočkové pole pro lepší fokusaci dopadajícího světla u vnitřních bezvláknových sítí. První ze systémů předpokládá, že přijímače budou tvořeny svazky vláken, před které se umístí relativně velké čočky různých typů a vše poté bude spojeno v nějakém děliči či slučovači. Druhá varianta je velice podobná první nicméně předpokládá využití jednotlivých vláken, před které se opět umístí malé čočky, pro jednotlivá vlákna. První varianta přijímače je tvořena sedmi vlákny uspořádaných v hexagonálním obrazci. Druhý přístup využívá malých čoček, které mají za úkol maximalizovat úhel dopadu na čelo vlákna a poté zlepšit fokusaci světla do vlákna. Pro vytvoření jednotlivých čoček na vlákna u druhé varianty bylo využito kolimátorů či jejich pole, které bylo poté osazeno na mnohovidová vlákna. Je třeba však zmínit, že kolimátory byly primárně navrženy na vlnovou délku 1310 nm. Během simulací zjistili, že při vychýlení kolimátorů o 2° a vysílání výkonu o 100 μW jsou schopni pomocí pole navázat do vláken výkon o velikosti 5 nW. Pro první variantu využili bikonvexní čočky od New Portu s průměry 6,35 až 25,4 mm s ohniskovými vzdálenostmi 12,7 až 25,4 mm. Byly rovněž testovány různé typy vláken 800, 400 a 62,5 μm s různým uspořádáním [81].

V další práci [82] bylo provedeno měření pro tři různé vlnové délky 850 nm, 1310 nm, a 1550 nm měření výstupního výkonu v závislosti na působení teplotních turbulencí. Byla použita opět vlákna o parametrech 400 μm pro průměr jádra a 0,37 numerické apertury. Nejlepších výsledků z pohledu měření bylo změřeno pro vlnovou délku 1550 nm. Pro měření vlastností vlivu teplotních turbulencí na ribonový pásek sloužící jako optický vysílač, jenž byl tvořen 8 vlákny o parametrech 400 μm pro průměr jádra a 0,37 numerické apertury pro pracovní vlnové délky 1310 a 1550 nm. Přenosová rychlost systému byla 100 $\text{kb}\cdot\text{s}^{-1}$, [83].

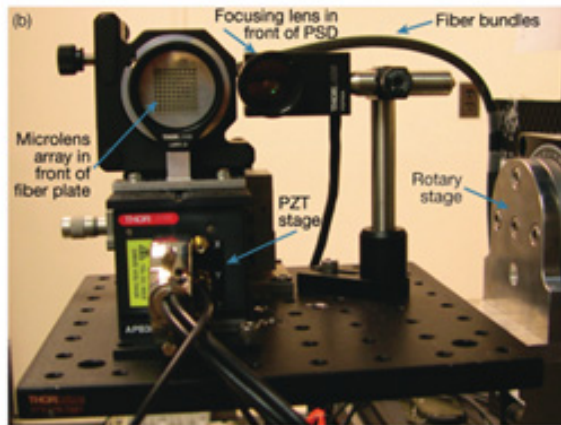
Cílem práce autorů pod vedením LoPrestiho bylo provést simulaci chování atmosférických vlivů na unikátní typ přijímače tvořeného optickými vlákny. Autoři zkoumali

možnosti úhlových změn vláken a čoček použitých pro zlepšení vazby světla do vlákna. Jako zdroj záření použili He-Ne pracující na vlnové délce 632,8 nm napojeného na vlákno. Z vlákna byl svazek upraven pomocí dodatečné optiky. Přijímač obsahoval čočku, která byla bikonvexní o průměru 50,8 mm a ohniskové vzdálenosti 52 mm či 26 mm. Svazek vlákna či vlákno samotné bylo umístěno v ohniskové vzdálenosti v ose čočky. Bylo použito plastové vlákno o průměru jádra 600 μm . Úhel vychýlení se pohyboval od 0 do 6°, přičemž bylo zjištěno, že maximální vychýlení může být 5,7°, kde je výkon ještě dostatečný pro komunikaci. S využitím více vláken bylo dosaženo dobrých výsledků při detekci či vazbě výkonu při působení atmosférických jevů. Jejich závěry platí především pro svazky Gaussovského typu, které jsou generovány zdrojem záření. Nicméně je zde problém, jakým způsobem poté pracovat s větším množstvím vláken z pohledu jejich zapojení do slučovače či jejich zpracování a umístěním čoček [84], [85].

V rámci těchto článků [86], [87] se autorský tým zaměřil na možnosti řešení počtu vláken, délku linky mezi vysílačem a přijímačem v závislosti na výkonu vysílače v programu MATLAB. Vysílací strana navrhovaného konceptu se skládá ze zdroje záření o výkonu 3 mW a vlnové délce odpovídající 1,31 μm , distribuční sítě (výkonové děliče) a poté seřazenými vlákny, před kterými je bikonvexní čočka s ohniskovou vzdáleností 50 mm. Přijímací strana navrhovaného konceptu je tvořena polem čoček, které jsou umístěné před samostatná vlákna připojená do optického slučovače a dále do opticko-elektrického zařízení provádějící konverzi optického signálu na elektrický pro další zpracování. Simulace byly provedeny pro jednovláknová vlákna s jádrem o poloměru 5,6 μm a pláště o 125 μm . Optická vlákna jsou simulována bez pláště, nicméně umístění bylo realizováno s mezerou mezi vlákny o velikosti 125 μm . Byly testovány dvě délky linek a to 15 a 25 m.

Další výzkum v oblasti vývoje nového typu vysílače i přijímače zároveň založených na využití svazku optických vláken v kombinaci s mikro-čočkovým polem byl studován a zhotoven v rámci článku [88]. Každé optické vlákno, které je využito ve vysílači má různý typ mikro-čočky pro změnu divergence optického svazku. Jako vlákna využili autoři konvenčních vláken, ať už jednovláknových či mnohovláknových. Zdrojem záření byl polovodičový laser VCSEL či He-Ne a nebo Nd:YAG (Neodymium-doped Yttrium Aluminium Garnet). Za pomoci tvrzeného epoxidu, vyrobil vědecký tým desku s hexagonálními tvary, na které poté uchytili optická vlákna. V tomto případě se primárně zaměřili na využití vláken 220/240 μm . Ukázkou prototypu lze vidět na obrázku 7.14.

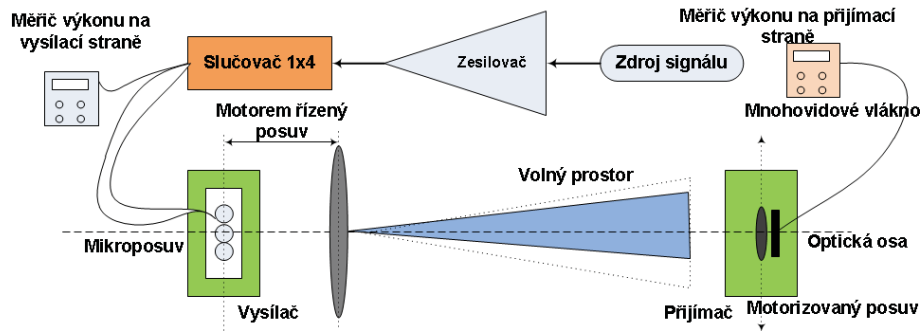
Návrh konceptu optického přijímače tvořeného optickými vlákny umístěnými na epoxidovou desku bylo zhotoveno v rámci článku [89], kde pracovní vlnová délka byla 1064 nm s šířkou pásma 1 GHz. Na vlákna o průměru 500 μm byly umístěny APD fotodetektory pro snímání optického záření. Mnohovláknový výkonový dělič 1:7 Neptec byl použit jako slučovač pro optická vlákna. Z děliče na konec přijímače byly použity vlákna o průměru 220 μm , NA=0,2 o délce 2 m. Na čela vláken byly umístěny mikro-čočky o velikosti 1,9 mm. Montážní deska obsahující hexagony o sedmi vláknech měla rozložení 10×10 otvory o velikosti 662 μm umístěné ve vzdálenosti od sebe 2 mm.



Obr. 7.14: Systém optického vysílače a přijímače na bázi vláken s mikro-čočkami, [88]

V další práci [90] bylo studováno, jaká je relace mezi výkonem vyzařujícího z vysílače tvořeného optickými vlákny a čočkami vůči přijímači při vychylování vysílače v závislosti na vlnové délce, délce přenosové linky, viz obrázek 7.15. Vysílací část byla tvořena zdrojem záření pracujícím na 1310 či 1550 nm. Dále došlo k zesílení optického signálu v zesilovači a vstupu do výkonového děliče, s dělicím poměrem 1:4 na jednotlivé větve 25 %. Z výkonového děliče 1:4 jsou využity tři větve pro vytvoření vysílače na bázi optických vláken s parametry 5,6 μm poloměru jádra a průměru pláště 125 μm . Jedna větev výkonového děliče je zapojena na výkonový měřič pro sledování výstupního výkonu. Vysílač tvořený třemi optickými vlákny, je řízen pomocí motorizovaného lineárního posuvu vůči čočce (bikonvexní typ, 75 mm ohnisková vzdálenost) upravující divergenci optických svazků. Vysílací výkon je 3 mW. Přijímač se skládá z jednoho mnohovidového optického vlákna s gradientním profilem a sběrnou čočkou (plan-konvexní) o parametrech 15 mm ohniskové vzdálenosti, průměru 12,7 mm a poloměru zakřivení 7,7 mm. Přijímače je připevněn na motorizovaný posuv a je ve vzdálenosti 2,1 m od vysílače. Přenosovým systémem generoval datový tok pomocí SONET OC-48 (2,5 Gb·s⁻¹). Byly sledovány změny při použití jednoho či více vláken pro vysílače vůči vlnovým délkám 1310 a 1550 nm. Byly simulovány vzdálenosti mezi počtem využitých vláken a pokrytí či osvětlení oblasti, při které dochází k maximální divergenci svazku v závislosti na změně parametrů a počtu čoček a jejich ohniskových vzdáleností. Nejnižší naměřená hodnota na poli 5×5 mm, což odpovídá ploše 25 mm² byla zjištěna -31,4 dBm (0,724 μW) při použití zdroje záření 850 nm.

Řešením diverzifikační techniky pro FSO spoje na bázi svazku optických vláken jako vysílače bylo zkoumáno v rámci článku [91]. Zároveň byly studovány pravděpodobnostní funkce pro bezchybný přenos dat či výkonnostní kritéria přenosové linky [92]. Autoři provedli sérii reálných zapojení při vytvoření optického vysílače a přijímače na bázi optických vláken. Jejich sestava se skládala u vysílací strany z optického teleskopu pro nezávislé ovládní divergence optických svazků vystupujících ze svazku vláken u vysílače. Divergence se měnila podle potřeby a vzdálenosti mezi výstupním vláknem a první konvexní čočkou.



Obr. 7.15: Experimentální zapojení směrovaného optického vysílače a přijímače, [90]

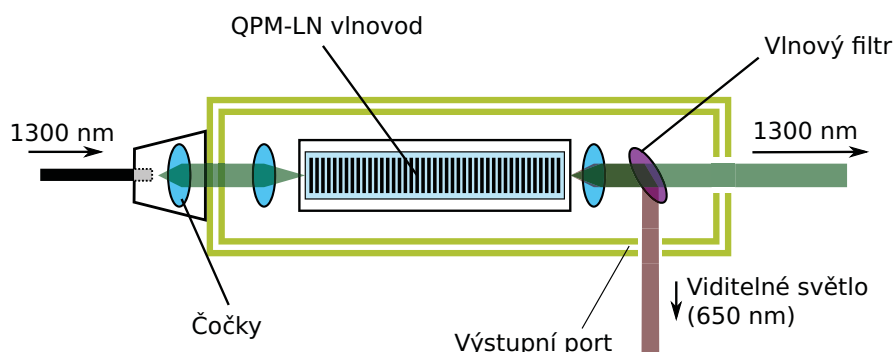
Vychýlení svazku dopadajícího na teleskop se dalo měnit za pomoci řízeného polohování konkávní a druhou konvexní čočkou s ohledem na první konvexní čočku a čočkami navzájem. Přijímací strana byla umístěna ve vzdálenosti l , která byla měněna autory po čas experimentů. Přijímač se skládal s pole mikročoček a polem 100 μm optických vláken stejného průměru jader. Každé vlákno mělo svoji vlastní mikročočku umístěnou na čele vlákna. Při vysílací vlnové délce 1310 nm, střední hodnotě výkonu 948 μW a přenosovém systému SONET OC-3 (155 $\text{Mb}\cdot\text{s}^{-1}$) a OC-1 (51.84 $\text{Mb}\cdot\text{s}^{-1}$) na vzdálenost 1,94 m mezi vysílačem a přijímačem byly testovány a vliv vychýlování vysílací jednotky na přijímač, změnu diagramu oka, působení teplotních ohříváčů v rámci přenosové trasy na optický svazek a detekovaný výkon. Bylo zjištěno, že s rostoucím vychýlením vysílače vůči přijímači pro OC-1 došlo k rapidnímu snížení výkonu detekovaného na vysílači až na hodnotu 0 mW pro 2,25° [93], [94], [95].

Zarušení rádiového spektra a nejednotnost telekomunikačních úřadů po světě vedla autory k myšlence využití bezvláknových sítí pro řízení moderních kvadroptér a multikoptér k různým využitím [96]. Cílem autorů bylo zhotovit vysílač a přijímač na bázi optických vláken za pomoci pole mikročoček. Autorům se podařilo zhotovit prototyp vysílače i přijímače, který umožňuje komunikaci mezi dvěma kvadroptérama či multikoptérama. Bylo použito vysílače tvořeného 19 vlákny o průměru 400 μm v hexagonálním obrazci s plan-konvexními čočkami. Pro komunikaci byly testovány vlnové délky 850 nm, 1310 nm, a 1550 nm, [97].

Poslední novinkou v oblasti vývoje vysílače pro VLC komunikaci byl navrhnout nový koncept, který používá kvazi-fázové přizpůsobení zařízení pro vysokorychlostní přenosy, [98], [99] více na obrázku 7.16. Pro zvýšení účinnosti přenosu dat systému je na přijímači umístěna sběrná čočka. Výsledný experiment byl testován ve vzdálenosti 1 a 2 metry skrze volný prostor mezi vysílačem a přijímačem. Bylo prokázáno, že chybovost se udrží na dostatečně hodnotě $\text{BER} = 10^{-11}$. Právě komponenta zvaná QPM (Quasi-Phase-Matching) je zodpovědná za to, že provádí konverzi infračerveného světla na viditelné. Vlnový konvertor provádí změnu pomocí generace druhé harmonické vlny s QPM. V SHG (Second-Harmonic Generations) je základní vlna s frekvencí ω_1 , která interaguje s optickou druhou harmo-

nickou nelineární vlnou pro zhotovení polarizační vlny na druhé harmonické $\omega_2 = 2 \cdot \omega_1$. QPM-LN (Quasi-Phase-Matching-Lithium Niobate) umožňuje kontinuální změnu optické druhé harmonické vlny podél celého zařízení. To zahrnuje opakovanou inverzi relativní fáze mezi nucenými a volnými vlnami po lichém čísle koherentní délky. Tak je poté fáze pravidelně nulována, takže v průměru, řádná fáze vztahu je udržovaná pro růst SHG.

Z optického vlákna, ze kterého vystupuje emitované světlo o vlnovém rozsahu 1300 až 1500 nm je po vstupu do vlnového konvertoru převedeno záření na viditelné o 650 až 750 nm. Pomocí PRBS a MZM-LN (Mach-Zehnder Modulator-Lithium Niobate) je generován datový tok skrze NRZ modulaci o $1,25 \text{ Gb} \cdot \text{s}^{-1}$. Optický signál je vyslán mezi zdrojem a přijímačem na vzdálenost 1; 1,5 a 2 metry o vlnové délce 650 nm, [98], [99].



Obr. 7.16: Optický fázový vysílač (QPM-LN) pro komunikaci ve viditelném spektru, [98]

Pro rozšíření svazku byla použita čočka konkávního charakteru o průměru 10 mm typ BK7. Na přijímací straně byla Si-APD (Silicon-APD) fotodioda pracující na 650 nm se citlivostí $31 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$. Pro zaostření viditelného světla bylo použito na přijímací straně čočky BK7, ale konvexního charakteru. Si-APD provádí konverzi optického signálu na elektrický přes úzkopásmový filtr s mezním kmitočtem konstruovaným na 938 MHz, kdy jsou detekovány chyby v přenosu pomocí měřiče chybovosti BERT (Bit Error Rate Tester) a vzorkovacího osciloskopu, [98], [99].

7.2 Shrnutí vnitřních bezvláknových sítí a jejich budoucnost

Bezvláknové vnitřní optické systémy či koncepce, které byly shrnuty v předcházejících kapitolách, poukazují na velký vývoj v dané oblasti. V dnešní době lze říci, že budoucnost bude přát koncepci s přímou viditelností mezi vysílačem a přijímačem nebo kvazi-difúznímu konceptu. Nevýhodou přímé viditelnosti je nízká míra mobility, kterou právě zase kompenzuje kvazi-difúzní koncept za pomoci segmentových vysílačů a přijímačů. Problém však u kvazi-difúzních konceptů je s řízením segmentů. Tlak na úspory v oblasti energetické spotřeby vede k většímu využití zdrojů záření ve viditelné oblasti. Zdroje záření ve viditelném spektru se dají využít, jak pro komunikaci za pomoci modulace, tak i

pro osvětlování dané místnosti [100].

Jelikož bylo třeba zavést normy a standardizaci technologii pomocí komunikace skrze optické bezvláknové sítě, vzniklo konsorcium VLCC (Visible Light Communication Consortium), které ve spolupráci se společností IrDA (Infrared Data Association) a ICSA (Infrared Communication Systems Association) vytvořilo podmínky pro vzájemnou kooperaci při využití zdrojů záření ve viditelném spektru spolu s infračerveným přenosem. Dalšími zakládajícími členy byly firmy Thosiba Corporation; Sharp Corporation; Panasonic Electric Works Co.,Ltd; Samsung Electronics Co.,Ltd. atd. Konsorcium VLCC v roce 2007 vydalo dvě normy a to JEITA CP-1221 a JEITA CP-1222 tyto normy měly za úkol efektivně nakládat s dostupným spektrem. Pracovní skupina IEEE vydala v roce 2011 standart IEEE 802.15.7, jenž definuje nový typ bezvláknové sítě označované jako VPAN (Visible Light Communication Personal Area Network) [101], [102], [103].

Problémy difúzních sítí především v oblasti vícecestného šíření signálu, jenž má poté za následek snížení přenosové rychlosti. Proto se dají využít přijímače s výběrově úhlovým příjmem ADR (Angular Diversity Receivers) k detekci a zpracování několika signálů. Tyto přijímače při kombinaci s ECG (Equal-Gain Combining), MLC (Maximum Likelihood Combining), SD (Selection Diversity) nebo MRC (Maximum Ratio Combining) poskytují lepší zpracování signálů a poskytují lepší odstup signál od šumu SNR pro detektory. MLC poskytuje velký zisk a velké zorné pole během snižování SNR, vícecestného šíření signálu a přeslechové interference. Kombinací těchto technik dosahujeme vyšších přenosových rychlostí pro vnitřní bezvláknové optické sítě [101], [102], [103], [104].

Zásadním problémem v dnešní době však je stále nevyřešená otázka vzestupném směru, řešením možná může být prezentovaná práce od K. Wanga a kolektivu [57], [58], [59], [60] či od týmu vědců kolem Petera G. LOPRESTI, [79], [80], [81], [82], [83], [84], [85], [86], [89], pakliže chceme využít čistě optického vlákna s adaptivní optikou či dalšími optickými komponentami. Samotný autor práce již publikoval výsledky získané ze simulací svazku optických vláken jako vysílače pro vnitřní bezvláknové optické sítě s ohledem i na odrazivost povrchů [108], [109], [110], [111].

V neposlední řadě se také velká pozornost ubírá směrem k využití LED zdrojů záření pro komunikaci mezi pohybujícími vozidly, což dokazuje publikace [112].

Jednou z novinek je rovněž nahrazení klasických fotodiod PIN a APD pomocí IS (Image Sensor) založeném např. na 0,8 μm BiCMOS (Bi-Complementary Metal Oxide Semiconductor) technologii, díky níž došlo k lepší detekci odraženého signálu [104].

Poměrně velká pozornost je rovněž věnována i vhodně zvolenému typu modulace (OFDM, QPSK) pro zvýšení přenosové rychlosti a lepším vlastnostem vůči rušení. Rovněž se řeší i problém s nelineárním chováním LED zdrojů záření pro modulace vyšších řádů jako je OFDM [105], [106], [107].

Sloučení funkcionality komunikace a zároveň i osvětlování se jeví jako přirozený krok ve vývoji s ohledem na využití výkonných polovodičových zdrojů záření.

8 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Hlavním cílem práce je navrhnout a zkonstruovat multisektorový optický vysílač složený z optických vláken. Takto vytvořený vysílač bude mít poté za úkol rovnoměrně pokrýt plochu vnitřních částí budov stejnou hodnotou intenzity světelného výkonu. Takto vytvořený vysílač nebyl doposud zkonstruován. Problémy, které mohou nastat, mají závislost na velikosti průměrů jader u optických vláken, a pak rovnoměrném rozložení intenzity optického výkonu v prostoru.

- Popis současných vnitřních mobilních optických bezvláknových systémů a shrnutí jejich vlastností.
- Nalezení způsobu, jaká optická vlákna a jejich zakončení můžeme použít jako vysílač. Současně bude řešení zaměřeno na optimalizaci vazby zářivý zdroj-svazek vlákna (vlákno), na řešení tvaru, počtu vláken a zakončení optických vláken pro dosažení rovnoměrného rozložení světla. Navrhnutí způsobu distribuce světla v uzavřené místnosti, k čemuž budou použity čočky na koncích optických vláken či difuzory. Návrh optických elementů a soustav bude simulován v softwarové aplikaci Code V, která je k dispozici na katedře. Pro návrh dosažení rovnoměrného rozložení světla bude využito softwarové aplikace LightTools.
- Sestrojení prototypu vysílače, který bude mít za úkol efektivně pokrýt část místnosti s rovnoměrným rozložením optické intenzity v prostoru, kdy míra kolísání hustoty optického výkonu nepřesáhne 3 dB.
- Experimentální ověření prototypu optického segmentového vysílače a proměření vystupující optické intenzity v závislosti na umístění vysílače v prostoru ve vybudované temné místnosti o velikostech $2,6 \times 3 \times 2,5$ metry.

9 VYUŽITÍ SPECIALIZOVANÉHO PROGRAMU PRO ŘEŠENÍ MODELOVÁNÍ A NÁVRH OPTICKÉHO VYSÍLAČE

Experimentální nároky na přesná měření a analýzu chodů paprsků v komunikačních a osvětlovacích systémech jsou značné. Proto se hledají simulační nástroje, které dovolí uspořit experimentální čas. V dnešní moderní době akademická, ale i neakademická pracoviště spoléhají na sofistikované softwarové aplikace, které jsou schopny simulovat chování optických komponent či návrh nových typů čoček, vláken, zdrojů záření, zesilovačů apod. Na trhu je řada těchto produktů například LightTools, Optiwave, RSoft, MATLAB, ZEMAX, VIPhotonics, TracePro a další. Všechny tyto programy nabízejí řadu konstrukčních a matematických nástrojů pro návrh optických zařízení a určení charakteristických vlastností. Na naší katedře je používán program LightTools ve verzi 8.2.0, který byl použit pro sestavení modelů optického vysílače na bázi optických vláken [113].

9.1 Softwarová aplikace LightTools

Softwarová aplikace LightTools je vyvinutá skupinou Synopsys' Optical Solutions Group sídlící v USA. Tento software poskytuje účinný a efektivní nástroj, který je schopen 3D i 2D modelování optického šíření, navrhování, analýzu světelných zdrojů či jejich záření do prostoru. LightTools dokáže proměnit myšlenku návrhu experimentu do virtuální roviny v podobě simulací a modelování a tím ušetřit čas při reálném měření či sestavení nějakého konceptu v laboratoři. Velkou výhodou využití této softwarové aplikace je i to, že v případě chyby v měření nebo nevyhovujících výsledků se mnohem snáze odstraní chyba a docílí výsledků nových, vše pouhou změnou vstupních parametrů, což v laboratoři tak snadné a rychlé není.

V programu LightTools máme možnost 3D objemového modelování prostředí pro tvorbu objektů s funkcemi pro návrh osvětlení a techniky, rozšíření numerické přesnosti či nástroje trasování paprsku a optimalizačního nástroje určeného ke zlepšení výkonu osvětlení systému na základě výkonnostních kritérií zadaných při vstupních podmínkách. Objekty mohou mít různou velikost, pozici, orientaci či nastavené parametry, které lze jednoduše upravit a poté opět vrátit do původní podoby. Program nám umožňuje měnit povrch pro jednotlivé části navrhovaného objektu či vypočítat po změně vstupních parametrů celkové rozložení intenzity pole světla.

Zároveň je třeba říci, že program má unikátní knihovnu se zdroji záření (primárně zaměřeno na polovodičové zdroje LED různých výrobců a parametrů, které se reálně vyrábí a prodávají) což ostatně platí i pro další komponenty v knihovně, jakými mohou být např. filtry, čočky, přijímače, reflektory, projektory, difuzory apod. Komponenty, které nejsou v knihovně lze importovat z jiných programů a přiřadit jim požadované vlastnosti, ať už funkční či světelné.

Analytický nástroj v rámci LightTools slouží k ověření správné funkce námi navrhovaného modelu či konceptu, který je nutno otestovat před jeho vlastní výrobou či sestrojením v laboratoři. Program je schopen počítat jak radiometrické, tak i fotometrické veličiny potřebné k důkladné analýze osvětlení. LightTools v sobě skýtá i jiné možnosti analytických nástrojů jakými jsou např. prostorová či úhlová jasová analýza, kolorimetrické vyhodnocení dat, simulace reálných podmínek a v neposlední řadě nejdůležitější část je pak trasování paprsku a jejich nastavení. Změna nastavení jakéhokoliv objektu či komponentu poté vede k rychlému novému přepočítání chování v programu [113].

9.2 Funkce programu LightTools a jeho metody výpočtu

Pro svoji funkci používá program LightTools techniku nesequenčních paprskových tras pomocí Monte Carlo. Na základě této techniky pak získáváme informace či modely vlivu optických či mechanických prvků na geometrické šíření světla pomocí optického systému navrhnutého v programu. Pomocí funkce trasování paprsku "ray tracing" určíme osvětlení a rozložení intenzity na různých pověších přijímače z jednoho či více zdrojů. Program v sobě zahrnuje metodu postupného sledování paprsku v rámci zobrazovaných cest [113].

9.2.1 Metoda Monte Carlo

Simulační metoda Monte Carlo je založena na teorii pravděpodobnosti a matematické statistice. Byla formulována matematiky Johnem von Neumannem a Stanislawem Ulamem během druhé světové války. Metoda Monte Carlo má široké využití od simulací experimentů přes počítání určitých integrálů až třeba řešení diferenciálních rovnic. Základní myšlenka této metody je velice jednoduchá. Chceme určit střední hodnotu veličiny, která je výsledkem náhodného děje. Vytvoří se počítačový model toho děje a po proběhnutí dostatečného množství simulací se mohou data zpracovat klasickými statistickými metodami, třeba určit průměr a směrodatnou odchylku.

K odhadu chyby či přesnosti výsledku získaného metodou Monte Carlo se většinou používá střední kvadratická chyba aritmetického průměru. Chyba výsledku získaného pomocí n historií je úměrná $1/\sqrt{n}$. Takže, aby se zlepšil výsledek o jeden řád musí se počet historií zvýšit alespoň o dva řády. Abychom získali výsledek s přesností na 6 desetinných míst, což odpovídá přesnosti jiných metod, musíme získat 1012 historií [114].

9.2.2 Metoda trasování paprsků

Jedná se o vysoce výpočetně náročnou metodu počítačové vizualizace, pomocí které lze dosáhnout velmi realistického zobrazení modelu. Spočívá v postupném stopování paprsků odražených modelem směrem k uživateli. Umožňuje zobrazení jevů, pomocí jiných technik vůbec, či jen stěží dosažitelných, jako jsou např. odrazy a odlesky objektů, lom světla v objektech, atd. Sledujeme paprsky, které se šíří od světelných zdrojů do scény. Některé

paprsky zasáhnou objekty, kde se podle jejich vlastností lomí, odrážejí a rozptylují. Obraz scény tvoří paprsky, které dopadají na projekční plochu.

Tato metoda zahrnuje efekty vznikající vzájemnou interakcí objektů ve scéně (tj. například odrazy ostatních těles na povrchu lesklého objektu a lom světla při průchodu průhledným tělesem). Dokáže určit stíny vržené různými tělesy (tyto stíny jsou však ostře ohraničeny). Protože je nereálné sledovat všechny paprsky ze zdrojů světla, postupujeme v praxi naopak. Paprsek je sledován zpětně, tzn. ve směru od pozorovatele. Projekční paprsky vysíláme přes pixely obrazu scény. Hledáme, co je vidět v daném pixelu, jakou světelnou energii paprsek přináší [114].

Typy paprsků:

- Primární paprsek – vyslaný od pozorovatele scény.
- Sekundární paprsek – vzniká odrazem nebo lomem paprsku.
- Stínový paprsek – vyslaný z místa dopadu paprsku na objekt ke zdrojům světla pro zjištění, leží-li ve stínu. Není-li objekt ve stínu, je pro něj vyhodnocen osvětlovací model. Zanedbává se jejich lom.

9.2.3 Metoda trasování dráhy paprsků

Tato metoda má za úkol zobrazování obrázků trojrozměrných scén tak, aby byl co nejvěrnější vůči realitě. Jedná se o algoritmus integrování trasy přes dopadající osvětlení z jednoho bodu na ploše nějakého objektu. Velikost osvětlení je pak nižší o funkci odrazivosti povrchu danou metodou BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) určující kolik paprsků se dostane na kameru, respektive na snímací element [114].

9.2.4 Nesekvenční metoda trasování paprsků

V běžném režimu se u většiny softwarových aplikací setkáme s trasováním paprsku "ray tracingem" v tzv. sekvenčním režimu, kdy uživatel musí definovat postupně pořadí a povrchy optického systému, kde paprsky prochází. Nicméně sekvenční metoda není vhodná v okamžiku, kdy potřebujeme řešit osvětlovací systémy, přičemž pořadí povrchů je různé pro každý paprsek. Právě z tohoto důvodu se využívá nesekvenční metody trasování paprsku, kdy pro každý paprsek, který se šíří modelovaným prostředím, definuje metoda zvlášť povrch a na něm počítá chování paprsku (lom, odraz, rozptyl, polarizaci aj.). Každý paprsek při této metodě je rekurzivně sledován skrze optický systém. Nevýhodou této metody je značná výpočetní náročnost celého řešení a tomu odpovídající nároky na výpočetní stroje [114].

10 ROZLOŽENÍ OPTICKÉ INTENZITY SVAZKU VYSTU- PUJÍCÍHO Z OPTICKÉHO VLÁKNA

Dizertační práce mimo jiné řeší i aplikace optických vláken a jejich zakončení pro vykrývání světla v komunikačním prostoru. Pro lepší pochopení jejich funkce je nutno se zabývat i popisem vybraných vlastností, které mají vliv na distribuci světla ze svazků optických vláken.

Základy vlnové teorie optických vláken položil v roce 1971 prof. Gloge. Ukázal existenci podmínek, za kterých lze řešit telekomunikační vlákna pomocí LP aproximace [116]. Ta je dnes základem pro popis chování optických vláken. Poprvé vyrobit takové vlákno se podařilo vědcům Kaovi a Hockmanovi v roce 1966, kteří v roce 2009 získali za svůj přínos v dané oblasti Nobelovu cenu za fyziku. Jednalo se o celoskleněné vlákno se skokovým průběhem indexu lomu.

Optické vlákno je vyrobeno, ze skla či plastu a je tvořeno jádrem a pláštěm s vhodně zvolenými indexy lomu tak, aby byly splněny podmínky pro vlnovodný jev. Pro materiály jádra a pláště se předpokládá, že jsou v prvním přiblížení homogenní, lineární a isotrovní. Dále, že materiál vlákna je nemagnetický, čili magnetická permeabilita μ nabývá hodnotu permeability vakua μ_0 . Pro vlnové řešení teorie u optických vláken lze použít řadu metod a přístupů. Lze je rozdělit obecně na metody analytické a numerické [117]. Všechny tyto metody mají společný základ položený na Maxwellových rovnicích. Pokud budeme chtít definovat svazek vystupující z optického vlákna, je třeba říci, že tento svazek bude mít jiné vlastnosti (numerická apertura, tvar svazku, polarizace atd.), než-li je tomu např. u standardních bezvláknových sítí. Nicméně definice svazku bude vycházet z předpokladů Maxwellových rovnic upravených v našem případě pro skalární vlny $U(x, y, z)$, které jsou řešením Helmholtzovy vlnové rovnice [116] (10.1):

$$\nabla^2 + n^2 k_0 U = 0, \quad (10.1)$$

kde U je souřadnice některé složky pole (komplexní amplituda), k_0 je velikost vlnového vektoru a n je index lomu prostředí a může být definován jako:

$$\begin{aligned} n &= n_1 \text{ pro } r < a, \\ n &= n_2 \text{ pro } r > a, \end{aligned}$$

pro velikost vlnového vektoru je definována rovnice (10.2):

$$k_0 = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_0}, \quad (10.2)$$

kde λ_0 je vlnová délka optické vlny ve vakuu. Jelikož je optické vlákno osově symetrické je vhodné pro tyto účely vyjádřit Helmholtzovu rovnici pomocí válcových souřadnic (10.3):

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + n^2 k_0 U = 0, \quad (10.3)$$

kde $U = U(r, \phi, z)$ představuje složku elektrického $E_z = U(r, \phi, z)$ nebo magnetické pole $H_z = U(r, \phi, z)$. Radiální a azimutální složky pole vyjádřené pomocí složek $E_z = U(r, \phi, z)$ a $H_z = U(r, \phi, z)$ jsou (10.4),(10.5),(10.6) a (10.7):

$$E_r = -\frac{j}{k_p^2} \cdot \left(\beta \cdot \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{\omega \cdot \mu_0}{r} \cdot \frac{\partial H_z}{\partial \varphi} \right), \quad (10.4)$$

$$H_r = -\frac{j}{k_p^2} \cdot \left(\frac{\omega \cdot \varepsilon_0 \cdot n^2}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \varphi} - \beta \frac{\partial H_z}{\partial r} \right), \quad (10.5)$$

$$E_\varphi = -\frac{j}{k_p^2} \cdot \left(\frac{\beta}{r} \cdot \frac{\partial E_z}{\partial \varphi} - \omega \cdot \mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial r} \right), \quad (10.6)$$

$$H_\varphi = -\frac{j}{k_p^2} \cdot \left(\omega \cdot \varepsilon_0 \cdot n^2 \cdot \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{\beta}{r} \cdot \frac{\partial H_z}{\partial \varphi} \right), \quad (10.7)$$

kde ω je úhlová frekvence, μ_0 je permeabilita vakua, ε_0 je permitivita vakua, k_p pak definujeme jako (10.8):

$$k_p = \sqrt{n^2 \cdot k_0^2 - \beta^2}, \quad (10.8)$$

kde β je konstanta šíření ve směru souřadnicové osy z a n je index lomu prostředí. Pakliže předpokládáme, že plášť má nekonečné rozměry, tak není nutné uvažovat rozhraní plášť-vzduch. Tohle můžeme říci díky tomu, že u vlnovodu energie vedené vlny proniká pouze do malé vzdálenosti od rozhraní jádro-plášť. Poté tedy platí, že (10.9):

$$U = U(r, \varphi, z) = u(r) \cdot e^{-jl\varphi} \cdot e^{-j\beta z}, \quad l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (10.9)$$

kde je $u(r)$ - rozložení radiální funkce v závislosti na r , $e^{-jl\varphi}$ - funkce, popisující rozložení funkce ve směru osy z , $e^{-j\beta z}$ - funkce, popisující rozložení funkce v úhlu φ , periodická s periodou 2π . Dosadíme-li do vzorce pro Helmholtzovu rovnici vyjádřené pomocí válcových souřadnic rovnici (10.2) dostaneme pro $u(r)$ Besselovu diferenciální rovnici (10.10):

$$\frac{du^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{du}{dr} + \left(n^2 \cdot k_0^2 - \beta^2 + \frac{l^2}{r} \right) \cdot u = 0. \quad (10.10)$$

Ve vztahu (10.3) je vhodné definovat (10.11), (10.12):

$$k_T^2 = n_1^2 \cdot k_0^2 - \beta^2, \quad (10.11)$$

$$\gamma^2 = \beta^2 - n_2^2 \cdot k_0^2, \quad (10.12)$$

Pro vlny v jádře, které splňují podmínky pro vedené vlny je pak ($\beta < n_1 \cdot k_0$) v jádře a ($\beta > n_2 \cdot k_0$) v plášti k_T^2 a γ^2 kladné a rovněž k_T a γ kladné. Rovnici (10.10) lze rozdělit na dvě části pro jádro a plášť (10.13), (10.14):

$$\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{du}{dr} + \left(k_T^2 - \frac{l^2}{r^2} \right) \cdot u = 0, \quad (10.13)$$

$$\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{du}{dr} - \left(k_T^2 + \frac{l}{r^2}\right) \cdot u = 0, \quad (10.14)$$

rovnice (10.13) platí pro $r < a$ (v jádře) a rovnice (10.14) je definována pro $r > a$ (v plášti). Rovnice výše (10.13) a (10.14) jsou pak diferenciální rovnice, jejichž řešení patří do třídy Besselových funkcí. Pakliže vyloučíme funkce, které rostou v jádře ($r \rightarrow 0$) a v plášti ($r \rightarrow \infty$) nade všechny meze získáme rovnice (10.15), (10.16):

$$u(r) \propto J_l(k_T r), \quad (10.15)$$

$$u(r) \propto K_l(\gamma r), \quad (10.16)$$

rovnice (10.15) platí pro $r \leftarrow a$ (jádro) a rovnice (10.16) je definována pro $r \rightarrow a$ (plášť). Kde pak dále $J_l(k_T r)$ je Besselova funkce 1. druhu a rovnice $K_l(\gamma r)$ je Besselova funkce 2. druhu (Neumannova funkce). Daná funkce $J_l(x)$ osciluje podobně jako goniometrická funkce sinus nebo kosinus a její amplituda klesá. Parametr k_T pak určuje rychlost změny $u(r)$, tedy tohoto poklesu v jádře a γ určuje rychlost změn funkce $u(r)$ v plášti. Pak platí (10.11), (10.12), že (10.17):

$$k_T^2 + \gamma^2 = (n_1^2 - n_2^2) \cdot k_0^2. \quad (10.17)$$

Výrazem $(n_1^2 - n_2^2)$ se pak definuje základní parametr nutný pro optická vlákna, kterým je numerická apertura představující příjmový úhel vlákna. Funkce $K_l(x)$ klesá exponenciálně v plášti a parametr γ určuje rychlost tohoto poklesu v závislosti na vzdálenosti od hranice jádro-plášť. Na této hranici musí mít obě funkce $J_l(x)$ a $K_l(x)$ shodné hodnoty. Rozložení funkce $u(r)$, ukazuje, obdobně jako je tomu u planárního vlnovodu, na existenci evanescentní vlny v optickém vlákne. Tato evanescentní vlna zasahuje do pláště, kde se vzdáleností od hranice jádro-plášť rychle klesá. Konstanty k_T a γ lze normovat (10.18), (10.19):

$$k_T^2 a = X, \quad (10.18)$$

a

$$\gamma a = Y. \quad (10.19)$$

Pak lze odvodit vztah (10.20):

$$X^2 + Y^2 = NA^2 \cdot k_0^2 \cdot a^2 = V^2, \quad (10.20)$$

kde pak lze definovat normovanou frekvenci V (10.21):

$$V = 2\pi \cdot \frac{a}{\lambda_0} \cdot NA, \quad (10.21)$$

což je velice důležitý parametr při určování při hledání podmínky jednovidovosti vlákna.

10.1 Charakteristická rovnice slabě vedoucího vlákna

Definicí slabě vedoucího vlákna máme na mysli vlákno, pro které platí, že $n_1 \approx n_2$ a vedené paprsky jsou tudíž přibližně paraxiální, protože podélné složky E_z a H_z jsou mnohem větší než příčné složky. Pro osvětlování jsou vhodnější vlákna, kde index lomu pláště je výrazně menší než index lomu jádra, tj. jsou vhodnější vlákna s velkou NA. Níže uvedený rozbor je však vhodným prvním přiblížením do popisu vlastností těchto vláken. Vedené vlny jsou transverzálně elektromagnetické (TEM) a vytvářejí tzv. lineárně polarizované vidy s označením LP_{lm} , kde m je radiální index lomu. Na rozhraní jádra a pláště musí platit podmínky spojitosti pro $u(r)$ a derivaci $du(r)/dr$, kdy je $(r = a)$. Tyto podmínky spojitosti nabudou platnosti, pakliže platí rovnice (10.22):

$$\frac{(k_T a) J_l'(k_T a)}{J_l(k_T a)} = \frac{(\gamma a) K_l'(\gamma a)}{K_l(\gamma a)}, \quad (10.22)$$

Obecně lze definovat, že (10.23):

$$J_l'(x) = \pm J_{l\pm 1}(x) \pm l \cdot \frac{J_l(x)}{x}, \quad (10.23)$$

a rovnici (10.24):

$$K_l'(x) = -K_{l\pm 1}(x) \pm l \cdot \frac{K_l(x)}{x}. \quad (10.24)$$

Pokud využijeme výrazů v rovnici (10.22) a použijeme-li normované veličiny $k_T a = X$ a $\gamma a = Y$, dostaneme následující vztah (10.25):

$$X \cdot \frac{J_{l\pm 1}(X)}{J_l(X)} = \pm Y \cdot \frac{K_{l\pm 1}(Y)}{K_l(Y)}, \quad (10.25)$$

což je definice pro tzv. charakteristická rovnice, kdy platí (10.26):

$$X^2 + Y^2 = V. \quad (10.26)$$

Výše uvedená charakteristická rovnice poskytuje pro každý azimutální index l soustavu diskretních hodnot konstant šíření β_{lm} ; $m=1,2 \dots, z$ nichž každá odpovídá jednomu vidu vlákna. Charakteristická rovnice se nemění, je-li l nahrazeno $-l$, protože platí (10.27):

$$J_{-l}(x) = (-1)^l J_l(x), \quad (10.27)$$

a rovnice (10.28):

$$K_{-l}(x) = K_l(x). \quad (10.28)$$

Významnou skupinou zaujímají i rotačně symetrické vidy, pro něž platí, že $l = 0$. Počet vidů je dán počtem kořenů rovnice $J_{l\pm 1}(x) = 0$ pro $X \leq V$, lze rovněž vzít v úvahu znaménko $+$ nebo $-$. Charakteristická rovnice (10.25) poskytuje pro každý azimutální index l a normovanou frekvenci V řadu diskretních řešení (ať už vidů či konstant šíření atd.). Byly definovány značení X_{lm} , LP_{lm} , β_{lm} , k_{Tlm} , γ_{lm} ; kde l -azimutální index lomu a

m -radiální index vidu. Pro určitá l, m existují určitá $k_{Tlm}, \beta_{lm}, u_{lm}(r)$ a $u_{lm}(r, \varphi)$. Pro rozložení optické intenzity ve vidu LP_{lm} platí (10.29):

$$I_{lm}(r, \varphi) \propto u_{lm}^2(r) \cdot \cos^2(l\varphi), \quad (10.29)$$

speciálně pak platí pro $l = 0$ (10.30):

$$I_{0,m}(r, \varphi) \propto u_{0,m}^2. \quad (10.30)$$

Základním videm je vid s označením LP_{01} , který může existovat ve dvou nezávislých polarizačních stavech (díky možnosti volby znaménka u l). Optická intenzita $I_{01}(r)$ ve vidu LP_{01} má rozložení blízké profilu Gaussova svazku (nezávislé na úhlu ϕ).

Při popisu chování vláknových a bezvláknových systémů je nutné si uvědomit, že jednotlivá řešení Besselových rovnic, která vedou na vidovou strukturu, optického pole ve vlákne vyžaduje jejich buzení laserovými zdroji. Čím je laserové světlo koherentnější, tím výraznější bude vidová struktura světla ve vlákne. Jak v případě jednovidových vláken, tak v případě vícevidových telekomunikačních vláken podporujících několik set vidů bude rozložení světla blízké Gaussovskému svazku. Parametry pro popis svazku jsou sice odlišné, ale základní rozložení světla se popisuje stejným typem rovnice. Ztráta vidové struktury se začne projevovat s rostoucí šířkou spektrální čáry budícího zdroje. Vidová struktura zaniká, podobně jako v případě velkého počtu vidů, které nelze na výstupu optického vlákna rozlišit. V tomto případě místo superpozice jednotlivých vidů na výstupu optického vlákna, lze použít energetické rozložení světla na výstupu vlákna, kde výchozím parametrem je numerická apertura vlákna. Popis rozložení energie vystupující z vlákna je založen na energetických charakteristikách světla, jakými jsou zářivý tok, zářivost, intenzita vyzařování a další.

11 POPIS ZÁKLADNÍCH SVĚTELNĚ TECHNICKÝCH VELIČIN A POJMŮ

V rámci cílů dizertační práce je popsána distribuce světelného záření v prostoru. Jelikož se předpokládá, že budou využity zdroje záření, jak ve viditelném tak i neviditelném spektru, je třeba se seznámit se základními pojmy. Světlo lze popsat pomocí elektromagnetického vlnění, které je schopno přenášet nějakou část energie. Tuto energii popisujeme pomocí tzv. radiometrických, resp. fotometrických veličin. Radiometrické veličiny popisují energii přenášenou zářením v celém spektru elektromagnetických vln a používá objektivní veličiny. Fotometrické veličiny popisují účinky záření na náš zrak (oko není stejně citlivé na vjem všech vlnových délek - oko je nejcitlivější na zeleno-žluté světlo). Fotometrie je měření světla, které je definováno jako elektromagnetické záření detekované lidským okem. Je omezeno na oblast 360 až 830 nm. Každé fotometrické veličině odpovídá radiometrická veličina, jak je uvedeno v tabulce 11.1. Přitom jejich vztah závisí na spektrálním složení světla a ne na použitých jednotkách.

Tab. 11.1: Radiometrické a fotometrické veličiny a jednotky

Radiometrické veličiny		Fotometrické veličiny	
Název	Jednotka	Název	Jednotka
zářivý tok Φ_e	[W]	světelný tok Φ	lumen [lm]
zářivost I_e	[W·sr ⁻¹]	svítivost $I_{\gamma\zeta}$	kandela [cd]
zář, plošná zářivost (jas) L_e	[W·m ⁻² ·sr ⁻¹]	jas L	[cd·m ⁻²]
intenzita vyzařování M_e	[W·m ⁻²]	světlení (intenzita světlení) M	[lm·m ⁻²]
intenzita ozáření E_e	[W·m ⁻²]	osvětlení (intenzita osvětlení) E	lux [lx]
expozice (dávka ozáření) H_e	[W·s·m ⁻²]	expozice (osvit) H	[lx·s]

11.1 Základní fotometrické veličiny

Světelný tok se označuje jako Φ , jenž je reprezentován jednotkou lumen (lm). Světelný tok vyjadřuje schopnost zářivého toku vyvolat zrakový vjem. Světelný tok Φ monofrekvenčního záření, tedy záření jediné vlnové délky λ , které přenáší určitý zářivý výkon (tj. zářivý tok) Φ_e (W), se určí ze vztahu [118] (11.1):

$$\phi(\lambda) = K(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) = K_m \cdot V(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) = 683 \cdot V(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) \quad [\text{lm}; \text{lm} \cdot \text{W}^{-1}; -; \text{W}], \quad (11.1)$$

kde $K(\lambda)$ je definována jednotkou $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$, což je světelná účinnost monochromatického záření rovná poměru světelného toku a jemu odpovídajícího zářivého toku. Maximální viditelnost K_m bylo stanoveno při fotopickém vidění (ve dne) při vlnové délce

$\lambda = 555, 155 \text{ nm}$ a je $683 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$. $V(\lambda)$ je poměrná účinnost záření (z hlediska pozorovatele totožné s poměrnou spektrální citlivostí) a je definována [118] (11.2):

$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_m} \quad [-; \text{lm}\cdot\text{W}^{-1}; \text{lm}\cdot\text{W}^{-1}]. \quad (11.2)$$

Světelný tok Φ záření složeného z různých monochromatických záření, jehož zářivý tok Φ_e je dán průběhem $\Phi_e(\lambda)$, se zjistí z rovnice [118] (11.3):

$$\Phi(\lambda) = K_m \int_0^\infty \left(\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right)_\lambda \cdot V(\lambda) \cdot \lambda \quad [\text{lm}; \text{lm}\cdot\text{W}^{-1}; \text{W}\cdot\text{m}^2; \text{m}], \quad (11.3)$$

kde výraz v závorce $\left(\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right)_\lambda$ vyjadřuje spektrální hustotu zářivého toku Φ_e v bodě λ . Z definice svítivosti navíc vyplývá, že světelný tok bodového zdroje svítivosti $I_{\gamma\zeta}$ do prostorového úhlu $d\Omega_{\gamma\zeta}$ je definován vztahem (11.4):

$$d\Phi = I_{\gamma\zeta} \cdot \Omega_{\gamma\zeta} \quad [\text{lm}; \text{cd}; \text{sr}]. \quad (11.4)$$

Při nerovnoměrném rozložení světelného toku zdroje či svítidla do různých směrů prostoru je třeba kromě hodnoty úhrnného světelného toku znát ještě prostorovou hustotu světelného toku v různých směrech, tj. svítivost zdroje v těchto směrech. Svítivost je možno stanovit pouze pro bodový zdroj, tj. pro zdroj (svítidlo), jehož svíticí plocha má rozměry prakticky zanedbatelné ve srovnání se vzdáleností zdroje od kontrolního bodu. Svítivost $I_{\gamma\zeta}$ bodového zdroje (svítidla bodového typu) ve směru určeném úhly γ, ζ je rovna světelnému toku obsaženému v jednotkovém prostorovém úhlu a je tedy definována vztahem (11.5):

$$I_{\gamma\zeta} = \frac{d\Phi}{d\Omega_{\gamma\zeta}} \quad [\text{cd}; \text{lm}; \text{sr}], \quad (11.5)$$

kde $d\Omega_{\gamma\zeta}$ je prostorový úhel, jehož osa leží ve směru určeném úhly γ, ζ a v jehož mezích uvažovaný zdroj vyzařuje tok $d\Phi$. Jednotkou svítivosti je 1 kandela (cd), která patří k základním jednotkám soustavy SI. Jedna kandela je rovna svítivosti zdroje, který vyzařuje v určitém směru monochromatické záření o frekvenci $540\cdot 10^{12} \text{ Hz}$, při němž zářivost zdroje v tomto směru je $1/683 \text{ W}\cdot\text{sr}^{-1}$. Osvětlenost či intenzita osvětlení se značí pomocí E rovinné plošky dA , tj. plošná hustota světelného toku $d\Phi$ dopadajícího na plošku dA , se dá vyjádřit na základě následujícího vztahu (11.6):

$$E = \frac{d\Phi_{\text{dopad}}}{dA} \quad [\text{lx}; \text{lm}; \text{m}^2]. \quad (11.6)$$

Osvětlenost plošky dA , se často nazývá i osvětleností v bodě, jehož elementární okolí v uvažované rovině tvoří ploška dA . Jednotkou osvětlenosti je 1 lux (lx) a můžeme jí jinak vyjádřit jako $1 \text{ lm}\cdot\text{m}^{-2}$. Dalším parametrem je světlení či intenzita světlení značí se obvykle M a je vyjádřena pomocí podílu světelného toku $d\Phi$ vysílaného danou ploškou zdroje do poloprostoru a obsahu dS této plošky. Výsledný vztah má poté následující podobu (11.7):

$$M = \frac{d\Phi}{dS} \quad [\text{lm}\cdot\text{m}^2; \text{lm}; \text{m}^2]. \quad (11.7)$$

Jas je určen podílem svítivosti $dI_{\gamma\zeta}$ elementární plošky o obsahu dS zdroje ve zvoleném směru α a kolmého průmětu plošky v tomto směru (11.8):

$$L = \frac{dI_{\gamma\zeta}}{(dS \cdot \cos \alpha)} \quad [\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}; \text{cd}; \text{m}^2]. \quad (11.8)$$

Osvit neboli expozice je plošná hustota světelného množství, které dopadlo na danou plochu v časovém intervalu od $t_0=0$ do t ; je to součin středního osvětlení \bar{E} a doby t , po kterou osvětlení působí. Osvit se vyjadřuje v luxsekundách. Pro osvit tedy platí vztah (11.9):

$$H = \bar{E} \cdot t \quad [\text{ls} \cdot \text{s}; \text{ls}; \text{s}]. \quad (11.9)$$

11.2 Základní radiometrické veličiny

Zářivý tok charakterizuje energii, kterou vyzáří zdroj za 1 sekundu. Jednotkou zářivého toku je Watt. Označíme-li dE energii, kterou vyzáří zdroj za dobu $\Delta t = 1$ s, pak velikost zářivého toku vypočteme ze vztahu (11.10):

$$\Phi_e = \frac{dE}{dt} \quad [\text{W}; \text{J}; \text{s}^{-1}]. \quad (11.10)$$

Zářivost charakterizuje zdroj světelného záření. Abychom ji mohli vypočítat, potřebujeme znát pojem prostorový úhel Ω . Je to vrcholový úhel, který odpovídá kuželové ploše vytínající na kulové ploše o poloměru 1 m kulový vrchlík o obsahu 1 m^2 . Také platí, že je-li poloměr koule r , pak 1 steradián je prostorový úhel, který odpovídá kulovému vrchlíku o obsahu r^2 . Plný prostorový úhel má velikost 4π . Zářivost vypočteme, tak, že vydělíme zářivý tok prostorovým úhlem Ω do něhož tento zářivý tok vchází. Pak výsledný vztah je dán následovně (11.11):

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} \quad [\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}; \text{W}; \text{sr}]. \quad (11.11)$$

Plošná zářivost vyjadřuje podíl zářivosti dle elementární plošky o obsahu dS zdroje ve zvoleném směru v a kolmého průmětu plošky v tomto směru. Vztah, jenž popisuje plošnou zářivost, neboli jas je pak dán (11.12):

$$L_e = \frac{dI_e}{(dS \cdot \cos v)} = \frac{1}{\cos v} \cdot \frac{d^2\Phi_e}{dS \cdot \Omega} \quad [\text{W} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}; \text{W}; \text{sr}]. \quad (11.12)$$

Plošnou hustotu zářivého toku neboli intenzitu optického záření můžeme definovat jako podíl zářivého toku $d\Phi_e$ kolmo prostupujícího elementární plochou a jejího plošného obsahu dS_n . Proto pak vyjadřujeme intenzitu světelného záření jako (11.13):

$$\varphi_e = \frac{d\Phi_e}{dS_n} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}; \text{W}; \text{m}^2]. \quad (11.13)$$

Intenzita vyzařování je určena podílem zářivého toku $d\varphi_e$ vysílaného danou ploškou zdroje do poloprostoru a obsahu dS_n této plošky. Výsledný vztah je pak dán (11.14):

$$M_e = \frac{d\varphi_e}{dS_n} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}; \text{W}; \text{m}^2]. \quad (11.14)$$

Z definice záře vyplývá, že velikost intenzity vyzařování dM_e z povrchu ve směru prostoro-
vého úhlu $d\Omega$ je dána (11.15):

$$dM_e = L_e \cdot \cos(\theta) d\Omega \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}; \text{W}; \text{m}^2], \quad (11.15)$$

a následná integrace přes celý poloprostor před plochou zdroje (11.16):

$$M_e = M_e = \int_{2\pi} L_e \cdot \cos(\theta) d\Omega. \quad (11.16)$$

Intenzita ozáření je primárně určena podílem zářivého toku $d\Phi_e$ ku obsahu dA plošky, na
kterou tento zářivý tok dopadá. Pak zapisujeme vztah jako (11.17):

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA} = \frac{I_e \cdot d\Omega}{dA} = \frac{I_e \cdot \cos(\theta)}{r^2} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}; \text{W}; \text{m}^2]. \quad (11.17)$$

Expozice neboli dávka ozáření je plošná hustota zářivé energie, která dopadla na danou
plochu v časovém intervalu od $t_0=0$ do t ; je to součin střední hodnoty intenzity \bar{E}_e a doby
 t , po kterou ozáření působí. Expozice je pak definována vztahem (11.18):

$$H_e = \bar{E}_e \cdot t. [\text{W} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}; \text{W} \cdot \text{m}^{-2}; \text{s}]. \quad (11.18)$$

11.3 Radiometrie optického detektoru

Optický detektor přijímá z daného směru zářivý výkon dP_o na aktivní ploše fotodetektoru
 dA_D a převádí jej v případě PIN nebo lavinové diody na fotoproud (11.19):

$$dP_o = dA_D \cdot E_e(\theta, \phi), [\text{W}], \quad (11.19)$$

a pro celkový dopadající zářivý výkon platí (11.20):

$$P_o = dA_D \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\frac{\pi}{2}} E_e(\theta, \phi) d\theta. \quad (11.20)$$

Intenzita ozáření pro obecnou plochu se vyjadřuje s kosinovou závislostí úhlu dopadu od
vzdáleného světelného zdroje (11.21):

$$E_e = \frac{I_e}{r^2} \cdot \cos \theta. \quad (11.21)$$

Ovšem fotodetektory mají přijímací charakteristiku $H(\theta, \phi)$ obecně závislou jak na úhlu
 θ od normály přijímacího povrchu, tak na úhlu ϕ ve směru roviny plochy (11.22):

$$E_e(\theta, \phi) = \frac{I_e}{r^2} \cdot H(\theta, \phi) \quad 0 \leq H(\theta, \phi) \leq 1. \quad (11.22)$$

Velikost fotoproudu je úměrná dopadajícímu zářivému výkonu na aktivní plochu a prou-
dové citlivosti optického detektoru $R_{\frac{A}{W}}$ (11.23):

$$I_p = P_o \cdot R_{\frac{A}{W}} \quad [\text{A}]. \quad (11.23)$$

Citlivost $R_{\frac{A}{W}}$ se může udávat i ve $V \cdot W^{-1}$. Nicméně je třeba uvést, že se zde předpokládá konstantní citlivost po celé ploše daného fotodetektoru. Pak pro napětí na fotodiodě platí (11.24):

$$U_D = P_o \cdot R_{\frac{V}{W}} \quad [V]. \quad (11.24)$$

Proudová citlivost se tedy definuje jako (11.25):

$$R_{\frac{A}{W}} = \frac{I_p}{P_o} \quad [A \cdot W^{-1}]. \quad (11.25)$$

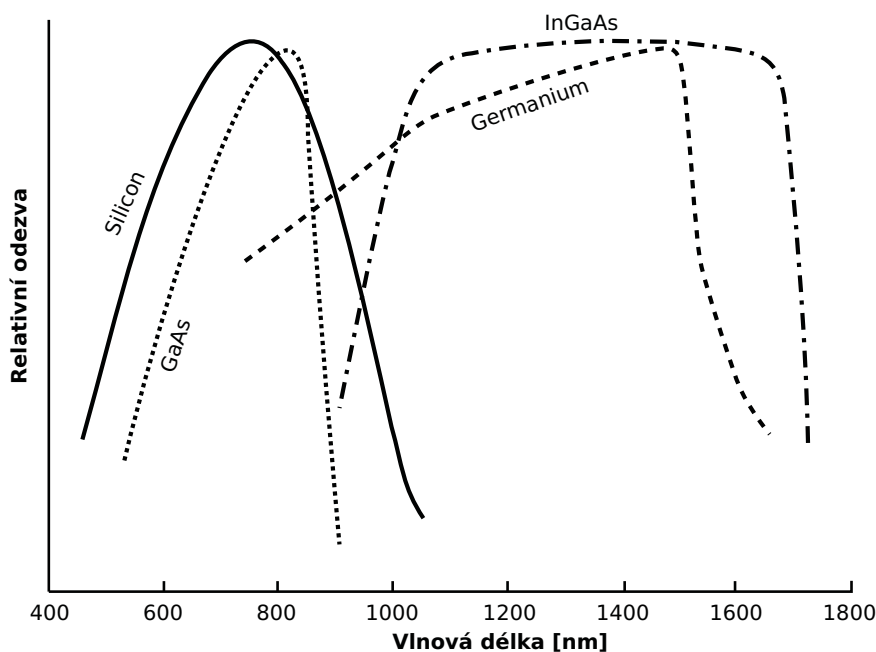
Vztah pro citlivost může být rozvinut tak, aby zahrnoval kvantovou účinnost η odpovídající poměru počtu generovaných elektronů v detektoru k počtu dopadajících fotonů na detektor. Pak pro fotoproud platí (11.26):

$$I_p = \frac{\eta \cdot P_o \cdot e}{h \cdot f}, \quad (11.26)$$

kde jednotlivé proměnné lze definovat jako e - náboj elektronu, h - Planckova konstanta, f - frekvence. Po dosazení proudové citlivosti (11.25) do vztahu lze psát (11.27):

$$R_{\frac{A}{W}} = \frac{\eta \cdot e}{h \cdot f} = \frac{\eta \cdot e \cdot \lambda}{h \cdot c}, \quad (11.27)$$

kde je pak c rychlost šíření světla ve vakuu. Citlivost v závislosti na vlnové délce křemíkové fotodiody s kvantovou účinností je zobrazena na obrázku 11.1 i s typickou citlivostí skutečné křemíkové fotodiody.



Obr. 11.1: Závislost proudové citlivosti na vlnové délce

12 ÚVOD DO ŘEŠENÍ PROBLEMATIKY NÁVRHU SEGMENTU OPTICKÉHO VYSÍLAČE NA BÁZI OPTICKÝCH VLÁKEN

Hlavním cílem této práce je vytvoření segmentu optického vysílače na bázi optických vláken pro osvětlování definované plochy s možností budoucího využití i pro komunikaci ve viditelném spektru pro systém VLC. K tomu, aby bylo možné zhotovit takovýto typ optického vysílače, je třeba nejdříve zhodnotit a analyzovat možnosti zdrojů záření, optických vláken, studovat vazební podmínky zářivý zdroj vs plocha optických vláken (vhodné optické komponenty pro úpravu tvaru optického svazku emitovaného ze zdroje záření), úprava či změna konců a rozvržení počtu vláken v rámci svazku jejich umístění pro dosažení rovnoměrnosti rozložení optické intenzity na definované ploše či v prostoru. U tohoto typu optického vysílače chceme dosáhnout toho, že pokles výkonové hustoty vyzařované z optického vysílače nesmí, poklesnout pod hodnotu 3 dB, čemuž odpovídá ztráta 50 % výkonu v optických komunikacích. Pro vyjádření tohoto poklesu můžeme použít parametru FWHM (Full Width at Half Maximum). Rovněž pro osvětlovací soustavu by měla ztráta 50 % světelné energie zásadní vliv, jelikož bychom se v dané místnosti při tak snížené velikosti světelného záření necítili pocitově dobře (snížený jas, kontrastní body vs temné části místnosti apod.). Vzhledem ke složitosti systému bylo zvoleno provést před samotnou praktickou realizací simulace a optimalizace za pomoci softwarové aplikace LightTools, která je popsána v kapitole 9 a jejíž licence je ve vlastnictví katedry.

V následujících kapitolách je postupně probrána a diskutována problematika výběru vhodného zdroje záření, kterým v tomto případě je polovodičová LED dioda s typovým označením HPA8b-43K5GAx pracující na vlnové délce 525 nm s malým vyzařovacím úhlem. Detailní informace k zvolenému typu zdroje záření jsou uvedeny buď v kapitole 12.1 nebo katalogovém listu [119]. Jak již bylo uvedeno výše, tak LED zdroje záření mají větší vyzařovací úhel nežli mají laserové zdroje záření, a tudíž je nutné koncentrovat maximum emitovaného světelného záření generovaného polovodičovým zdrojem záření do bodu pro snížení výkonových ztrát. Ke koncentraci, respektive fokusaci optického výkonu emitovaného polovodičovou diodou typu HPA8b-43K5GAx do malého světelného bodu je využito čočkového optického elementu.

V práci je použita spojná (achromatická plan-konvexní) čočka typu EDMUND OPTICS VIS-NIR Coated, Achromatic Lens #49-321, [124], která je umístěná za zářivý zdroj. Pro simulace bylo nutné využít podobného typu čočky, kterým je v tomto případě spojený optický dublet s typovým označením EDMUND OPTICS MgF2 Coated, Achromatic Doublet Lens #45-209, [125]. Stejný typ čočky se nenacházel v knihovně komponent v softwarové aplikaci LightTools, detailní informace k zvoleným typům čoček pak můžeme najít v rámci dalších kapitol, které se detailně zaměřují na dané komponenty. Nicméně je nutné si uvědomit, že s vložením čočkového optického elementu respektive úpravou světelného záření emitovaného zářivým zdrojem dochází ke změně tvaru optického svazku o

čemž pojednává jedna z dalších kapitol v rámci práce. Jsou zde studovány vazební podmínky spolu s matematickým definováním pole, které vychází za obecnou čočkou a jsou směřovány na čelo optického vlákna nebo optických vláken. Problematika změny tvaru optického svazku za čočkou byla simulována v softwarové aplikaci LightTools na základě reálně použitých komponent při zhotovení experimentálního měření. Vyhodnocení simulovaných dat je zhotoveno za pomoci aplikace MATLAB, kde jsou provedeny řezy optického svazku za čočkou vstupující na čelo segmentového optického vysílače tvořeného optickými vlákny.

Po definování zářivého zdroje, optimalizaci vazebních podmínek (výběr vhodného typu čočkového optického elementu) pro fokusaci světelného záření bylo nutné se soustředit na vhodný typ optického vlákna pro vytvoření vláknově optického vysílače. Prvním myšlenky vedly k výběru vláken, která jsou standardizovaná dle norem ITU-T, jelikož takové typy vláken pak dávají prototypu naději, že by mohl v budoucnu najít uplatnění v praxi. Standardizovanými vlákny, dle ITU-T pak máme na mysli všechny typy vláken, ať už jednovidových (G.652.x až G.657.x) [127], [128], [129], [130], [131] či mnohovidových (G.651.x) [132], [133]. Výzkumné týmy ze světa se v minulosti už zabývali využitím optického vlákna, ale pouze pro přenos signálu, tj. jako komunikačního vysílače o čemž pojednávají přehledové kapitoly 7, 7.1, 7.2. Nicméně využití optických vláken pro osvětlovací účely nejsou doposud známy. Při výběru vycházíme z toho, že potřebujeme optická vlákna, která budou disponovat většími průměry jádra a pláště, což nám pak zaručí větší plochu pro navázání světla do vlákna s větší numerickou aperturou potažmo vyzařovacím úhlem z vláken. Z výběru vláken pak postupně byly eliminovány vlákna s malými průměry jádra a pláště tj. jednovidová vlákna, polymerová optická vlákna POF z důvodu jejich vysokého měrného útlumu (až $10 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$), nízkým vzdálenostem použitelnosti (cca do 200–500m), vysoké zatížení disperzními jevy, citlivostí na změnu teploty okolního prostředí a tím i na přenosové vlastnosti POF vláken a horší zpracování konců vláken do optické čistoty [134], [135]. Z výše uvedeného platí, že vhodnými kandidáty na využití by mohly být mnohovidová optická vlákna, která mají větší průměr jádra a pláště. Pokud bychom se rozhodli pro mnohovidové vlákno s průměry jádra 50 či 62,5 μm a pláště 125 μm , tak sice dosáhneme větších ploch, ale pro lepší vazební podmínky bylo vybráno vlákno od firmy Nufern s typovým označením S105/125-22A [136]. Toto vlákno má průměr jádra o velikosti 105 μm a pláště 125 μm s numerickou aperturou $0,220 \pm 0,020$ změřenou při vlnové délce 1064 nm. Optické vlákno poté bylo zhotoveno v softwarové aplikaci LightTools a simulováno pro zhotovení segmentu optického vysílače.

Jelikož bylo nalezeno vlákno pro vytvoření optického vysílače, tak bylo nutné zajistit počet vláken pro segment, jejich rozložení do obrazce, zakončení jednoho z konců optických vláken a také vyřešení problematiky uchycení všech vláken pro vazbu světelného záření na druhý konec čel optických vláken. Pro jeden segment optického vysílače bylo využito buď 7 nebo 19 vláken, které byly uspořádány do tvaru "kruhového obrazce". Z hlediska dosažení optimálního/efektivního pokrytí (plochy jader a plášťů s optickými vlákny) se jeví

využít symetrického typu obrazce, tj. kruhu. Pro sestavení segmentu optického vysílače na bázi optických vláken bylo zvoleno kruhového obrazce, který pojímá maximální plochu optických vláken a snižuje tak ztrátové plochy a zvyšuje efektivní pokrytí. Problematika je rozebrána dále v kapitole pojednávající o volbě počtu vláken v segmentu.

Dalším úkolem bylo vyřešení uchycení těchto 7 či 19 optických vláken do nějakého úchytu (konektoru). Z tohoto pohledu se jevílo využití SMA konektoru s velkým průměrem ferule jako optimální řešení. Pro segment optického vysílače tvořený 7 optickými vlákny S105/125-22A bylo použito SMA905 konektoru o průměru ferule 410 μm a pro segment s 19 vlákny SMA905 konektoru o průměru ferule 630 μm . Pro zalepení, respektive uchycení vláken do SMA konektorů daných typů bylo využito technologického vybavení firmy SQS vláknová optika a.s.

Nedílnou součástí práce bylo nalezení i optimálního zakončení optických vláken, potažmo optického vysílače v segmentu pro zvětšení vyzařovací charakteristiky optického vlákna, které by poté vedlo i k lepším možnostem vykrytí plochy v rámci segmentu. K tomuto účelu publikovaly vědecké týmy z celého světa v rámci svých prací různé typy komponent, které použily, jakými byly optické elementy na bázi čoček, kolimátorů, MEMS prvků, difuzorů více v přehledových kapitolách 7, 7.1, 7.2. Na základě z již prostudované odborné literatury bylo přistoupeno k zcela inovativnímu řešení úpravy konců optických vláken v segmentu optického vysílače s použitím PDMS (polydimetylsiloxanu). Po nanesení PDMS na konce optických vláken v rámci segmentu bylo dosaženo zvětšení numerické apertury a tudíž i vyzařovacího úhlu pro každé optické vlákno ze segmentu tvořeného 7 či 19 optickými vlákny. To poté přineslo sebou i zlepšení rovnoměrnosti výkonové hustoty respektive intenzity na měřené ploše. Je nutné podotknout, že samotné nanesení PDMS nebylo jediným nutným přístupem pro dosažení rovnoměrnosti rozložení optické intenzity na měřené ploše. Z tohoto důvodu bylo třeba najít vhodné úhlové rozložení optických vláken v rámci kruhu, jinými slovy, určit, zda při použití vychýlení mimo osových vláken dojde ke zlepšení rozložení výkonové hustoty na měřené ploše a zároveň zvětšení osvětlované plochy. Za tímto účelem bylo zhotoveno několik variant simulací, ze kterých poté byla vybrána jedna varianta simulace, která byla použita i v rámci reálného měření. Výsledky ze simulací jsou uvedeny v rámci dalších kapitol a porovnány s reálným měřením.

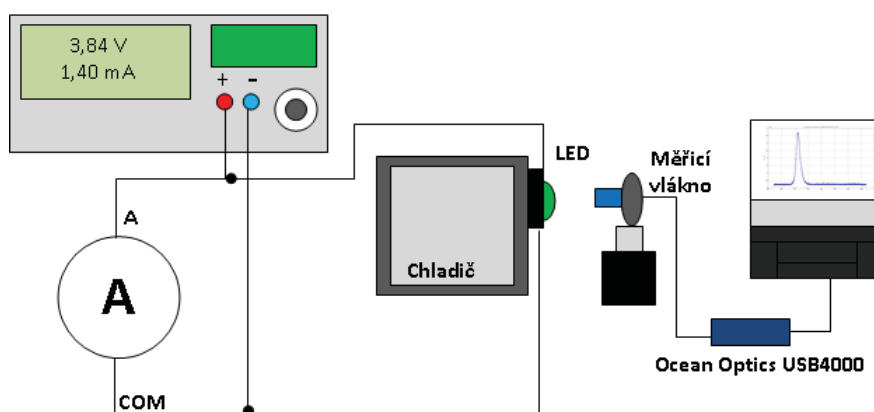
V neposlední řadě bylo nutné si zvolit i plochu, na které budou prováděny simulace a reálná měření při dodržení rovnoměrnosti rozložení optické intenzity, kdy chceme dosáhnout toho, že pokles výkonové hustoty vyzařované ze segmentu optického vysílače nesmí poklesnout pod hodnotu 3 dB v řezu pro definovanou plochu. K tomuto účelu byla zhotovena osmina koule, která odpovídá rohovému umístění segmentu optického vysílače v rámci místnosti. Kulová plocha zajišťuje stejné dráhy všech paprsků ze segmentového vysílače. Osmina koule je vyrobená ze sklolaminátu, kdy předlohou byla koule o obvodu 205 cm. Osmina koule je připevněna na kloubové rameno (STABILA 14229), kterým lze nastavovat osminu koule v třech osách a je připevněna na stativ STABILA 18194. Za pomoci stativu je možné nastavovat výšku osminy v rámci měřené místnosti. Samotné

reálné měření ověření funkčnosti prototypů optických segmentových vysílačů bylo prováděno v temné místnosti z důvodu potlačení parazitního okolního světla, které by ovlivnilo měření.

Více informací je popsáno v rámci navazujících kapitol, které postupně rozebírají detailněji jednotlivé dílčí části pro výrobu segmentu optického vysílače.

12.1 Měření a volba zdroje záření

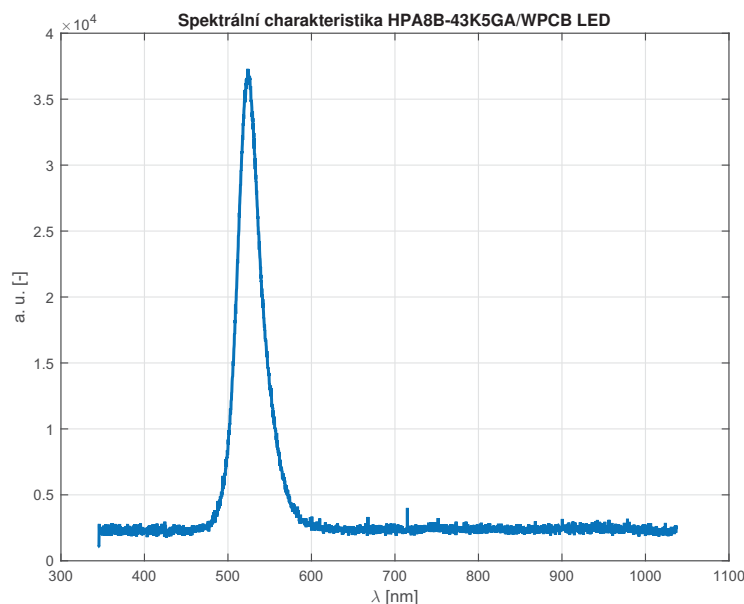
Pro obě funkcionality byla zvolena výkonná zelená dioda s typovým označením HPA8b-43K5GAx od firmy HUEY JANN ELECTRONICS INDUSTRY CO., LTD. Dioda byla vybrána z důvodu velkého emitovaného výkonu 5 W, kdy chceme osvětlovat místnost, a zároveň pro možnost případné modulace pro komunikační účely. V katalogovém listu [119] jsou uvedeny veškeré důležité parametry vázající se k danému typu zdroje záření. Tato dioda je optimálně napájena proudem 1400 mA, čemuž pak odpovídá světelný tok $\Phi=300$ lumenů, při níž má HPA8b-43K5GAx vyzařovací úhel 35° . Dioda HPA8b-43K5GAx emituje optické záření v rozsahu vlnových délek 500 až 540 nm, kdy při vlnové délce 525 nm vykazuje nejvyšší výkon. V laboratoři na budově N byla proměřena spektrální charakteristika této výkonové LED diody. LED dioda byla napájena laboratorním stabilizovaným zdrojem Statron typ 2229 [120]. Na vstup napájení byl připojen ještě UNI-T UT70A [121] pro snímání velikosti protékajícího proudu diodou tj. jako ampérmetr. Níže je uvedeno schéma pro měření spektrálních vlastností LED diody HPA8b-43K5GAx viz. obrázek 12.1.



Obr. 12.1: Zapojení pro měření spektrální charakteristiky LED HPA8b-43K5GAx

Spektrální měření bylo provedeno pomocí spektrometru USB4000-VIS-NIR [122] od firmy Ocean Optics. Spektrometr USB4000-VIS-NIR se připojuje k počítači přes rozhraní USB, v programu SpectraSuite [123] se následně zobrazují a zpracovávají naměřená data. Měření spektrální charakteristiky výkonového zářivého zdroje proběhlo 10 krát. Ze všech měření byl dodatečně odečten šum pozadí, aby data nebyla ovlivněna dodatečným šumem.

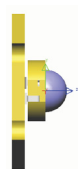
Ze získaných naměřených hodnot byl vytvořen aritmetický průměr. Spektrální charakteristika výkonové LED diody HPA8b-43K5GAx napájená napětím $U_f=3,8$ V a $I_f=1400$ mA je vyobrazena na obrázku 12.2.



Obr. 12.2: Spektrum výkonové LED diody HPA8b-43K5GAx

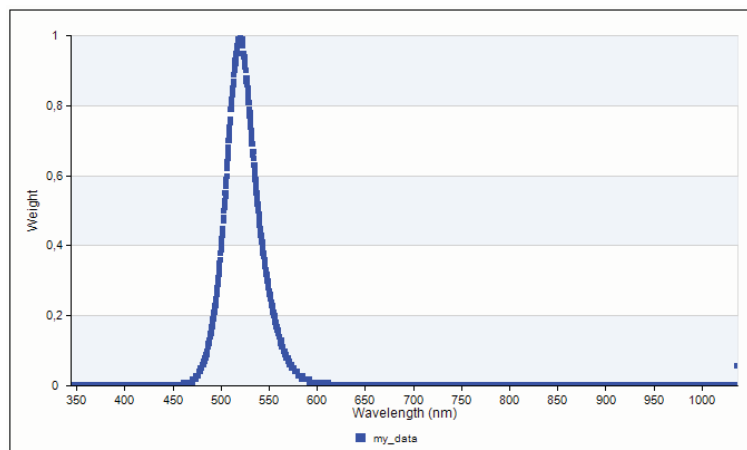
12.2 Vytvoření výkonové LED diody v softwarové aplikaci LightTools

Program LightTools obsahuje širokou knihovnu LED diod, které lze pořídit v obchodech a jsou reálně vyráběné výrobci polovodičových osvětlovacích součástí. Nicméně použitá LED dioda HPA8b-43K5GAx se nenachází v knihovně v rámci programu LightTools. Proto byla celá dioda kompletně navrhnutá v LightTools, podle katalogových parametrů a dle naměření spektra v laboratoři, aby co nejvíce odpovídala reálným parametrům. Výsledek návrhu výkonové LED diody můžeme vidět na obrázku 12.3.



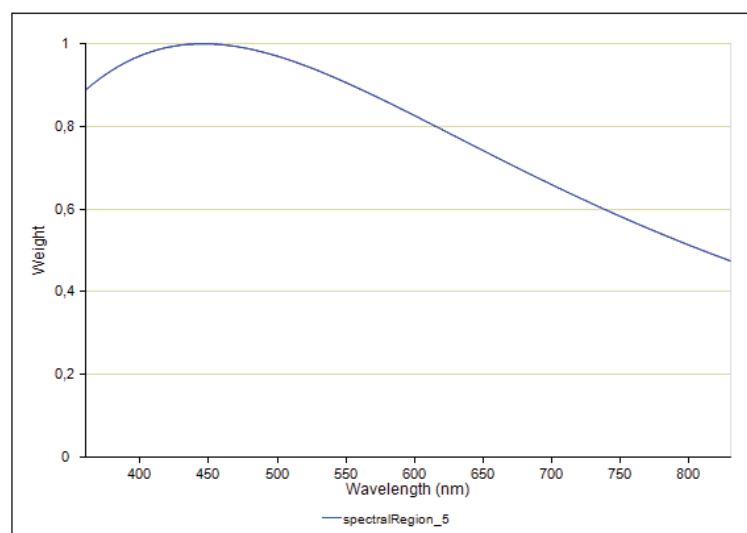
Obr. 12.3: Návrh výkonové LED diody HPA8b-43K5GAx v softwarové aplikaci LightTools

Jak již bylo uvedeno výše, byla proměřena spektrální charakteristika dané LED diody HPA8b-43K5GAx a ta byla po úpravě definovaná dle katalogových listů software LightTools importována do programu, což můžeme vidět na dalším obrázku 12.4.



Obr. 12.4: Spektrum výkonové LED diody HPA8b-43K5GAx v softwarové aplikaci LightTools získané v reálného měření

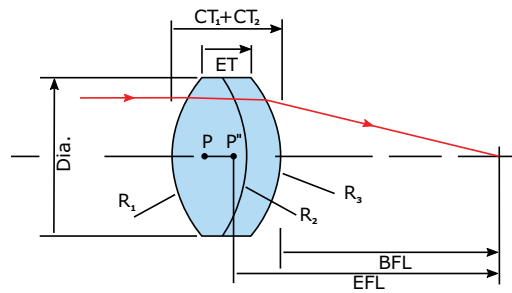
Pro upřesnění se jedná o relativní spektrální charakteristiku daného typu zdroje záření z prostředí LightTools. Daná LED dioda byla primárně určena pro studium vazebních podmínek, pro samotné simulace bylo použito bílého zdroje záření při výkonu 1 W pro každé vlákno. Teplota chromatičnosti barvy bílého zdroje záření byla nastavena na 6500 K. Při simulacích se ukázalo, že změna volby zářivého zdroje nehraje zásadní roli, a tudíž nebylo nutné provádět složité manipulace s vytvořenou LED diodou HPA8b-43K5GAx v rámci aplikaci LightTools. Použitý vlnový rozsah pro zdroj bílého světla byl od 360 do 830 nm. Velikost zdroje bílého světla byla nastavena tak, aby odpovídala průměru jádra zvoleného typu optického vlákna. Relativní charakteristika spektra pro zdroj bílého světla v softwarové aplikaci LightTools je vidět na obrázku 12.5



Obr. 12.5: Spektrum výkonové bílé LED diody v softwarové aplikaci LightTools

12.3 Volba optimalizace vazby zářivý zdroj optické vlákno

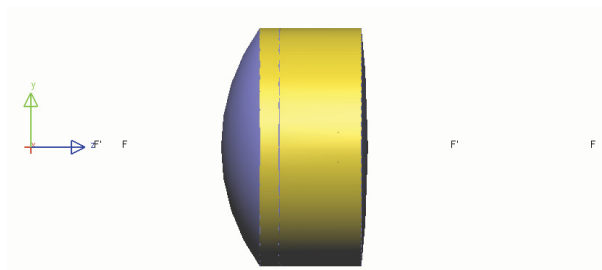
Pro zlepšení či optimalizaci vazebních podmínek zářivého zdroje do optického vlákna bylo použito achromatické složené čočky s typovým označením EDMUND OPTICS VIS-NIR Coated, Achromatic Lens #49-321. Tento typ čočky byl použit i v rámci reálných experimentů při měřeních. Hlavními parametry achromatické čočky je průměr o velikosti 12,5 mm, vlnový rozsah 400 až 1000 nm, numerická apertura definovaná výrobcem je 0,45, EFL (Effective Focal Length) efektivní ohnisková vzdálenost je 14 mm a BFL (Back Focal Length) zadní ohnisková vzdálenost činí 9,92 mm. Zobrazení parametrů můžeme vidět na obrázku 12.6. Další optické a geometrické parametry této čočky EDMUND OPTICS VIS-NIR Coated, Achromatic Lens #49-321 jsou shrnuty dle katalogu [124]. Výhodou využití tohoto typu čočky je potlačení negativních jevů daných úpravou svazku v podobě optických vad (aberací).



Obr. 12.6: Optické parametry achromatické čočky EDMUND OPTICS VIS-NIR Coated, Achromatic Lens #49-321

Jelikož se v softwarové aplikaci nenacházel přesný typ čočky, jenž byla zvolena v rámci reálných měření, byl zvolen jiný typ, který však vyhovoval stejným geometrickým a technickým parametrům jako má čočka EDMUND OPTICS VIS-NIR Coated, Achromatic Lens #49-321. Z knihovny čoček v rámci programu LightTools byla vybrána čočka s typovým označením EDMUND OPTICS MgF2 Coated, Achromatic Doublet Lens #45-209, kdy je zde pouze jediný rozdíl mezi danými čočkami a to v oblasti materiálu využitého na povrchu daných čoček. S jiným materiálem u čočky vybrané pro simulaci se snížil možný použitý rozsah vlnových délek a to na 400 až 700 nm. Detailní parametry čočkového dubletu lze dohledat na stránkách prodejce a v katalogu [125].

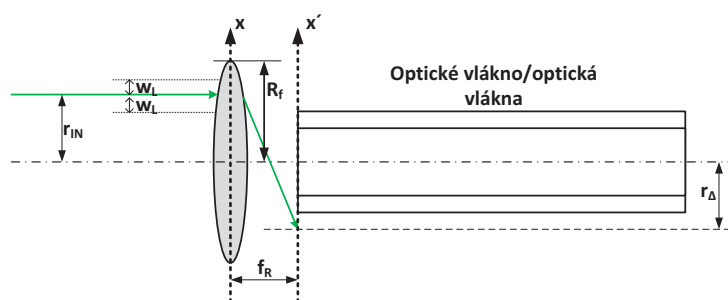
Na obrázku 12.7 můžeme vidět návrh vybraného achromatického čočkového dubletu EDMUND OPTICS MgF2 Coated, Achromatic Doublet Lens #45-209 v softwarové aplikaci LightTools.



Obr. 12.7: Vybraná čočka EDMUND OPTICS MgF2 Coated, Achromatic Doublet Lens #45-209 v softwarové aplikaci LightTools

12.4 Obecné řešení optimalizace vazby zářivý zdroj do optického vlákna či vláken

Pro provedení základní analýzy chování vazebních podmínek s čočkou a vlákny je nutné použít zjednodušené teoretické analýzy formulované na základě systému zobrazeného na obrázku 12.8 [84], [85]. Příchozí svazek o rozměru w_L vstupuje s bočním posunutím r_{in} do čočky. Úhlové vychýlení může být definováno, ale tato skutečnost v obrázku 12.8 není zaznačena.



Obr. 12.8: Analýza chování vazebních podmínek pro vlákno/vlákná

Svazek je směřován do vlákna, které se nachází jednotkové ohniskové vzdálenosti f_R od čočky (zjednodušení případu). Nicméně svazek je čočkou vychýlen o vzdálenost r_Δ mimo osu optického vlákna. Toto spojení lze zachovat, pouze pokud je dostatek světla navázáno do optického vlákna a množství navázaného světla je určeno r_Δ , které je funkcí r_{in} a f_R , poloměrem jádra vlákna a výkonovým rozložením přicházejícího svazku, které je definováno w_L . Maximální povolená hodnota r_{in} představuje míru maximálního příčného vychýlení, kterou můžeme tolerovat. Pro určení vztahu mezi r_{in} a r_Δ použijeme teorii přenosové matice s využitím čočky o tloušťce d_l . Za předpokladu, že index lomu pro sklo čočky je 1,5; r_Δ je pak dáno jako (12.1) [84], [85]:

$$r_\Delta = r_{in} \cdot \left(1 + \frac{d_l}{3R_l} - \frac{f_{R_l} \cdot d_l}{6R_l^2} \right) + \theta_{in} \cdot \left(f + \frac{2d_l}{3} - \frac{f_{R_l} \cdot d_l}{3R_l} \right), \quad (12.1)$$

kde pak R_l je definován jako poloměr zakřivení povrchu čočky a θ_{in} je úhlové vychýlení. Pokud chceme získat přibližné vyjádření optického pole v rovině vlákna, aproximujeme vstupní Gaussův svazek jako rovinou vlnu s omezenou prostorovou velikostí. Rovinná vlna má konstantní amplitudu A_w a rozsah do vzdálenosti rovnající se w_L na obě strany od středového paprsku. Tedy, vstupní pole na čočce E_{in} je definováno jako (12.2):

$$E_{in} = \begin{cases} A_w & -w_L + r_{in} \leq x \leq w_L + r_{in} \\ 0 & \text{jiný} \end{cases} \quad (12.2)$$

kde hodnota A_w je volena tak, aby byla energie rovnoměrně obsažena v obou vlnách ve směru x . Rozložení elektrického pole ve směru x' v rovině vlákna je dáno následující relací [84], [85] (12.3):

$$E_f(x') = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{i}{\lambda \cdot f_R} \cdot E_{in} \cdot e^{ikn_l d} \cdot e^{\frac{ikx^2}{2f_R}} \cdot e^{ikf_R} \cdot e^{\frac{ik \cdot (x' - x)^2}{2f_R}} dx, \quad (12.3)$$

Po odstranění všech podmínek, které nejsou funkcí x a sloučením konstant C dostaneme jednorozměrnou Fourierovu transformaci E_{in} danou (12.4):

$$E_f(p) = \mathfrak{F}[E_{in}] = C \int_{-\infty}^{\infty} E_{in} \cdot e^{ipx} dx; \quad \text{kde } p = \frac{kx'}{f_R}, \quad (12.4)$$

Výsledek této rovnice závisí na skutečnosti, zda příchozí svazek dopadá zcela na čočku nebo nějaká část dopadá mimo oblast čočky. Jelikož se předpokládá, že se jedná o ideální čočku bez optických vad, pak posunutí r_{Δ} musí být přidáno do výsledného vyjádření. Relace E_f je pak dána (12.5):

$$E_f = \begin{cases} CA_w \cdot 2 \cdot w_L \cdot \text{sinc}(w_L \cdot k(x' - r_{\Delta})/f_R) \cdot e^{(-i2\pi r_{in} \cdot k(x' - r_{\Delta})/f_R)}, & |r_{in} + w_L| < R_f \\ CA_w \cdot 2 \cdot w_s \cdot \text{sinc}(w_s \cdot k(x' - r_{\Delta})/2f_R) \cdot e^{(-i2\pi r_{in} \cdot k(x' - r_{\Delta})/f_R)}, & |r_{in} + w_L| < R_f' \end{cases} \quad (12.5)$$

kde w_s je šířka části svazku zachyceného čočkou a r_{eff} je efektivní střed zachyceného svazku, jsou dány následujícími rovnicemi (12.6) a (12.7):

$$w_s = \begin{cases} R_f + w_L - r_{in}, & r_{in} + w_L > R_f \\ r_{in} + w_L - R_f, & r_{in} - w_L < R_f \\ R_f, r_{in} + w_L > R_f \quad \text{a} \quad r_{in} - w_L < R_f \end{cases}, \quad (12.6)$$

a

$$r_{eff} = \begin{cases} 0,5 \cdot (R_l - w_L + r_{in}), & r_{in} + w_L > R_f \\ 0,5 \cdot (-R_l + w_L + r_{in}), & r_{in} - w_L < -R_f \end{cases}. \quad (12.7)$$

Pro určení míry E_{eff} , kolik světla se naváže do vlákna či vláken je potřeba vypočítat překryv mezi profilem příchozího svazku a základním videm optického vlákna E_{fund} (rozložení elektrického pole). Výpočet byl proveden s použitím překryvného integrálu daného (12.8):

$$O = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |E_{fiber}|^2 \cdot |E_{fund}|^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |E_{fiber}|^2 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |E_{fund}|^2}, \quad (12.8)$$

Čím větší bude hodnota tohoto integrálu, tím lepší je překrytí mezi profilem pole a profilem základního vidu vlákna, to znamená, že více světla se naváže do vlákna. Tento výpočet předpokládá, že vlna vstupuje do vlákna v úhlu menším, než je přijímací úhel vlákna, což je případ rozsahu zkoumaných úhlů. Pro svazek vláken se překryvný integrál vypočítává pro každé vlákno zachycující část příchozího pole a výsledky se sčítají pro odhad celkové výkonové vazby pole vláken. Pakliže chceme definovat E_{fund} (rozložení elektrického pole), lze využít aproximace pomocí Gaussovského rozložení (12.9):

$$E_{fund} = B \cdot e^{-\frac{w_f^2}{w_f^2}} \cdot e^{i\beta z}; w_f \geq r_{jádru}, \quad (12.9)$$

kde $r_{jádru}$ je poloměr jádra vlákna. Chceme-li najít úplnou formu řešení, musíme provést aproximaci upravené *sinovy* funkce pomocí Gaussova rozdělení blízce přizpůsobeného tvaru centrální části *sinovy* funkce rozdělení. Potom je O definováno (12.10):

$$O = [A_w B |C|(w_{eff})]^2 \sqrt{\pi/a} \cdot e^{\left(\frac{b^2-4ac}{4a}\right)}, \quad (12.10)$$

kde pak a můžeme vyjádřit jako (12.11):

$$a = \frac{2}{w_f^2} + \frac{w_{eff}^2 \cdot k^2}{2 \cdot f_R^2}, \quad (12.11)$$

kde pak b můžeme vyjádřit jako (12.12):

$$b = \frac{-w_{eff}^2 \cdot k^2 \cdot r_{\Delta}}{f_R^2}, \quad (12.12)$$

a na závěr kde pak c můžeme vyjádřit jako (12.13):

$$c = \frac{w_{eff}^2 \cdot k^2 \cdot r_{\Delta}}{2f_R^2}, \quad (12.13)$$

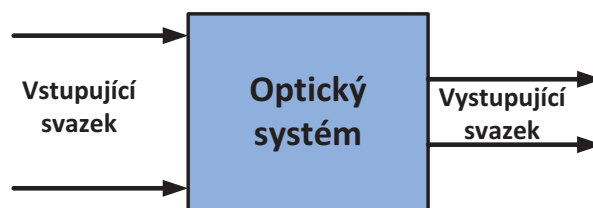
kde w_{eff} může být definováno jako w_L v závislosti na tom, který z případů nastane. Pro normalizaci O bylo zvoleno vydělení rovnice konstantami před exponenciální funkcí. Nyní můžeme stanovit nejnižší hodnotu O_{min} hodnoty O , která představuje nejnižší výkonovou vazbu do vlákna. Takto lze nastavit a nalézt řešení pro hodnotu r_{in} , jenž tuto podmínku splňuje (12.14):

$$O_{min} = (w_{eff}^2 \sqrt{\frac{\pi}{a}}) \cdot e^{\left(\frac{b^2-4ac}{4a}\right)}, \quad (12.14)$$

tato hodnota r_{in} je nyní r_{max} , což je maximální přípustný posuv mezi čočkou a polem vláken. Při měnícím se úhlu dopadu θ_{in} , je třeba přepočítat hodnotu r_{max} pro určení pracovního úhlového rozsahu pole vláken. Analogicky pak na výstupu optického vlákna je situace inverzního charakteru, platí výše uvedené relace při využití daného schématu. Nicméně je nutné si uvědomit, že nesmí dojít ke změnám vazebních podmínek, jinými slovy nelze uvažovat o změně optických elementů či vnější působení na optické vlákno, což by mělo za následek vyvolání ohybových ztrát či porušení podmínky šíření světla v jádře. Výstupní svazek by pak mohl být deformován těmito změnami a poté by nemohly platit výše uvedené relace.

12.5 Metody tvarování optického svazku

Samotný princip tvarování svazků je znám již delší dobu, jelikož už v době vynalezení prvního laseru v roce 1960 mnoho aplikací potřebovalo upravit tvar či intenzitní profil svazku. Samotné tvarování svazku je proces, při kterém dochází k přerozdělení intenzity a fáze optického svazku záření. Tvar optického svazku je definovaný rozložením jeho optické intenzity. Fáze tvarovaného svazku je hlavním faktorem pro určení vlastností šíření profilu svazku. Technologie přeměny tvaru svazku je aplikovatelná na koherentní i nekoherentní typy svazků. Mezi nejčastěji používané zdroje světelného záření v průmyslovém odvětví patří lasery, laserové diody a LED diody. Druh použitého světelného záření závisí na požadované aplikaci. Lasery a laserové diody generují úzký světelný svazek, jenž má koherentní vlastnosti a se vzdáleností diverguje minimálně. Rozptyl laserů je v řádu jednotek stupňů. U laserových diod se rozptyl pohybuje kolem 10–30° v závislosti na vzdálenosti a typu použité diody. U tohoto parametru ovšem velmi záleží na kvalitě výroby samotného vyzařovacího bloku a optickému přizpůsobení na výstupu. LED dioda má už z principu vyzařování a následného absence směrování světelného toku velmi široký úhel rozptylu, který se může pohybovat až k 150°. Pro všechny uvedené zdroje světelného záření je však stejný princip redistribuce energie na jiný profil intenzity záření. Jednoduchý případ úpravy či změny svazku je zobrazen na obrázku 12.9, [137].



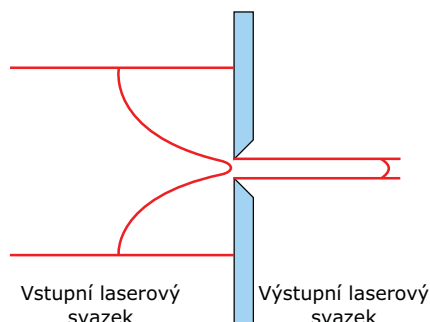
Obr. 12.9: Základní problém tvarování optického svazku

Vystupující optický svazek je závislý na optických elementech, které jsou sestaveny z několika komponent. Proto je nutné při tvarování optických svazků uvažovat a nastavovat systém tak, aby na výstupu z dané optické soustavy vycházel tvar svazku, který je požadován. V dnešní době existuje několik metod přístupů k tvarování optických svazků a to pomocí [137]:

- apertury (aperturing),
- mapovacích polí (field mappers),
- svazkových integrátorů (beam integrators).

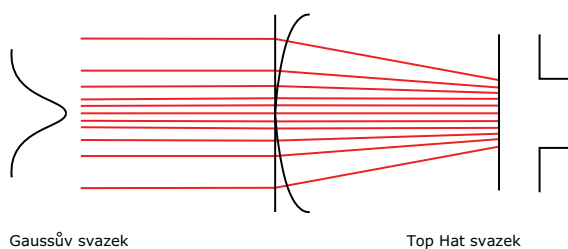
První princip tvarování svazků je velice jednoduchý. Je založen na tom, že vstupní svazek je nasměrován na nepropustný materiál, v němž je zhotoven otvor menší, než šířka vstupního svazku viz obrázek 12.10. Cílem je vybrání části optického svazku vhodné apertury v ploché části svazku z původního svazku. Následně pak může být vybraná část svazku zvětšená na požadovanou hodnotu. Na výstupu lze potom změřit výstupní svazek, který

má téměř ideální přechod ze stavu nulové intenzity do stavu maximální intenzity záření. Nicméně při této metodě tvarování dochází k velké ztrátě výkonu tvarovaného svazku. Další metodou tvarování svazků je pak využití mapovacích polí. Mapovací pole trans-



Obr. 12.10: Tvarování svazku pomocí apertury či metody malého otvoru [138]

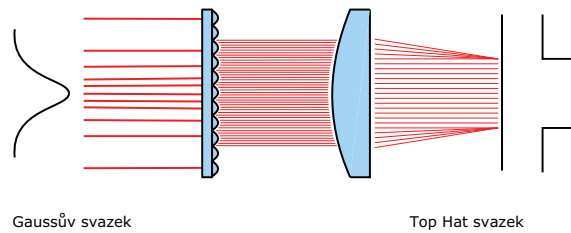
formují vstupní svazky do požadovaného pole, dle předem stanoveného způsobu. Princip tvarování pomocí mapovače pole je znázorněn na obrázku 12.11. Jednotlivé oblasti vstupního svazku jsou namapovány a poté usměrněny tak, aby výstupní svazek již měl uniformní průběh intenzity záření. Mapovače polí lze použít, pouze pokud známe rozložení



Obr. 12.11: Princip činnosti mapovače polí pro úpravu tvaru svazku [137]

pole svazku, např. u jednovidových svazků. Využití této metody tvarování je silně závislé na nastavení a rozměru svazku. Třetím základním principem tvarování koherentních či mnohovidových svazků je svazkový integrátor (Beam integrator). Pro tento princip se taky někdy uvádí svazkový homogenizér (Beam homogenizer). Při této metodě neznáme rozložení pole vstupního svazku a je méně náročná na přesné nastavení rozměru svazku. Princip této metody je zobrazen na obrázku 12.12.

Svazek vstupující do svazkového integrátoru je nejprve rozdělený pomocí vhodného prvku na několik malých částí za pomoci speciální čočky nazývané Lenslet array a poté zpětně složen pomocí jiné čočky do požadovaného tvaru s konstantní intenzitou záření. Integrátory svazku vycházejí z předpokladu, že vystupující svazek je součinem jednotlivých svazků vytvořených na lenslet apertuře [137]. Nicméně velkou nevýhodou této koncepce změny tvaru svazku je vliv interferenčních jevů, které vznikají při koherentních svazcích [138]. Kromě těchto základních metod existuje i celá řada jiných např. metoda



Obr. 12.12: Princip činnosti integrátoru pro úpravu tvaru svazku [138]

tvarování svazků pomocí asférických čoček, kdy se pro změnu svazků využívají dvě asférické čočky. Tato metoda pracuje na principu metody mapovače polí. Vstupní intenzitní profil svazku je mapován na požadovaný jiný typ výstupního profilu. Další metodou, která pracuje na principu mapování pole, je metoda používající speciálně vyrobenou čočku s proměnným indexem lomu, tato čočka se nazývá GRIN. Pod označením GRIN je myšleno rotační symetrické rozložení indexu lomu kolem optické osy šíření paprsku. Pro čočky, u nichž je index lomu proměnný v závislosti na poloze ve směru osy z_c (osa šíření optického svazku), je používáno označení AGRIN (Axial GRAdient INdex). GRIN čočka je vyrobena tak, aby její index lomu nebyl stejný v celém objemu čočky, ale měnil se v závislosti na vzdálenosti od osy směru šíření paprsku. Této vlastnosti lze využít při tvarování svazku. Různým indexem lomu v celém objemu GRIN čočky můžeme docílit přesně definovaného výstupního profilu intenzity záření. Výhodou využití GRIN čoček je to, že není třeba dodatečné fokusační techniky, jelikož čočka už je sama o sobě vyrobená přesně pro konkrétní typ vstupního svazku. Nicméně v praxi se raději používá systém, u něhož je před samotnou GRIN umístěna plankonkávní čočka.

Další metodou tvarování svazků je pomocí difraktivního difuzéru. Jedná se o průsvitnou desku, vyrobenou nejčastěji z leštěného opálového skla, jejíž povrch je zvrásněn mnoha výstupky a prohlubněmi. Zvrásnění difraktivního difuzéru je navrženo pro různé vlnové délky laserového záření. Vstupní laserový svazek je rozptýlen na tomto zvrásnění, a poté je usměrněn koncentračním prvkem. Princip funkčnosti této metody je tedy založen na rozložení vstupního svazku a jeho opětovném složení. Lze tedy říct, že tato metoda pracuje na principu svazkového integrátoru.

Metoda tvarování laserového svazku využívá soustavu odrazných zrcadel, která jsou elektronicky řízena. Principiálně tato metoda funguje na odrazu laserového svazku od odrazné plochy. Tvarovací systém je tvořen několika vstupními a výstupními čočkami a zrcadly, které jsou řízeny řídicí jednotkou.

Tato metoda pomocí refraktivního svazkového tvarovače využívá již vyrobeného tvarovacího systému. Více používaný je ovšem anglický název - Refractive beam shaper. Metoda uzpůsobuje vstupní svazek na Top-Hat svazek předem definovanému tvaru, který je dán výrobcem dané soustavy. Soustavy jsou již přímo vyráběny pro daný světelný zdroj se specifickou vlnovou délkou, optickým výkonem a profilem intenzity svazku. Jejich konstrukce

je dána požadovaným výsledným intenzitním profilem. Světelný svazek je přiveden na vstup tvarovacího zařízení a na výstupu je již požadovaný tvar světelného svazku. Uvnitř tvarovacího systému je soustava čoček, speciálních čoček či zrcadel, která jsou přesně navržena pro úpravu světelného svazku na požadovaný tvar. Všechny tvarovací komponenty jsou uzavřeny do pouzdra, které minimalizuje vliv okolního prostředí. Metoda tvarování laserového svazku pomocí Kerrova a Pockelsova jevu je založena na principu změny indexu lomu vhodného materiálu v závislosti na aplikovaném elektrickém poli.

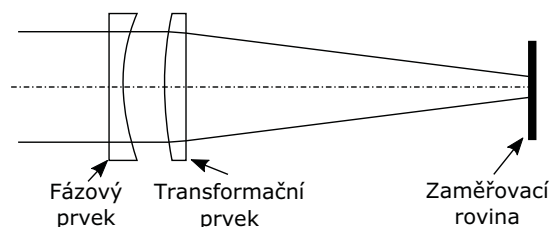
Při výběru vhodné metody, jak tvarovat svazek je nutné vztáhnout větší počet faktorů např. charakter vstupního svazku, konfigurace optického systému, požadovaný tvar výstupního svazku atd. Proto je nutné při návrhu metody tvarování jednovidového Gaussova svazku výhodné nejdříve vypočítat parametr (12.15) [137], [138]:

$$\beta_s = \frac{2\sqrt{2\pi r_0 y_0}}{f_s \cdot \lambda}, \quad (12.15)$$

kde pak λ je vlnová délka, r_0 je pološířka vstupujícího svazku, y_0 je pološířka vystupujícího svazku, který požadujeme a f_s je ohnisková vzdálenost optické soustavy anebo vzdálenost optické soustavy od stínítka. Parametr β_s pak slouží jako ukazatel kvality vybrané metody pro změnu tvaru svazku. Pro stopu výstupního svazku v tvaru kruhu nebo čtyřúhelníku můžeme definovat, že pokud je parametr $\beta_s < 4$ tak systém není schopen transformovat požadovaný tvar svazku dle našich požadavků či dané soustavy. Pokud platí podmínka $4 < \beta_s < 32$ tak vstupují do změny tvaru svazku rovněž i difrakční jevy. Difrakční jevy nemají zásadní vliv na celkový tvar funkce výstupního svazku, pokud je hodnota parametru $\beta_s > 32$.

12.5.1 Teorie tvarování svazku

Změna tvaru Gaussovského svazku pro nejčastější typ optického svazku, který lze dobře formulovat na svazek s uniformním rozložením intenzity je založeno na difrakční metodě. Koncept znázorněný na obrázku 12.13 je složen z fázového prvku a Fourierovské čočky. Optické pole na zaměřovací rovině je úměrné součinu Fourierovské transformace vstupního optického pole a fáze fázového prvku. Dané uspořádání sebou přináší několik výhod, mezi



Obr. 12.13: Tvarování Gaussovského svazku [137], [138]

které patří to, že změnou fázového prvku je možné kontrolovat velikost a tvar výstupní

intenzity. Pokud je nutné upravit či změnit pracovní vzdálenost je nutné změnit transformační čočku za jinou. Dané prvky lze rovněž navrhnout v rámci jednoho optického elementu. Problém tvarování optického svazku lze vyjádřit z hlediska Fresnelova integrálu jako (12.16) [137]:

$$U(x_0, y_0) = \frac{e^{jkz}}{i\lambda z} \int \int U(x_1, y_1) e^{\Psi(x_1, y_1)} \cdot e^{\left\{ \frac{ik}{2z} [(x_0 - x_1)^2 - (y_0 - y_1)^2] \right\}} dx_1 dy_1, \quad (12.16)$$

kde pak k představuje vlnové číslo $U(x_1, y_1)$ je komplexní vyjádření vstupního svazku, $\Psi(x_1, y_1)$ je fázová funkce, která vyjadřuje prvek bezztrátového tvarování svazku, $U(x_0, y_0)$ je komplexní vyjádření tvarovaného svazku na stínítku ve vzdálenosti z . Rozšířením posledního exponentu v rámci rovnice (12.16) včetně i zbývajících kvadratických fázových funkcí definujících bezztrátový tvarovací prvek, Ψ lze vyjádřit pak problém tvarování svazku jako Fourierovskou transformaci (Fraunhoferův integrál) (12.17) [137]:

$$U(x_0, y_0) = \frac{e^{(jkz)}}{i\lambda z} \cdot e^{[x_0^2 + y_0^2]} \int \int U(x_1, y_1) e^{\Psi(x_1, y_1)} \cdot e^{-i \frac{2\pi}{\lambda z} \cdot (x_0 \cdot x_1 + y_0 \cdot y_1)} dx_1 dy_1, \quad (12.17)$$

kde pak rovnice popisující Fraunhoferův integrál se liší od Ψ z rovnice pro Fresnelův integrál pouze v tom, že obsahuje fázovou kvadratickou odchylku. Tedy problém tvarování svazku je dán právě nalezením fázové funkce Ψ za podmínky, že jsou určeny $U(x_1, y_1)$ a $U(x_0, y_0)$. To je důležité pro specifikování rozsahu funkce a rozsahu Fourierovy transformace. Romero a Dickey [138] metodou pevné fáze našli však řešení pro transformaci Gaussovského profilu svazku na rovnoměrný svazek pro kruhový a čtyřúhelníkovou stopu. Fáze Ψ je ve vztazích výše daná jako (12.18) [137]:

$$\Psi = \beta_s \cdot \phi, \quad (12.18)$$

Pokud je vstupní kruhově symetrický Gaussovský svazek tvarovaný do profilu Top-Hat, svazku s čtyřúhelníkovou stopou, je nutné řešení rozdělit do dvou rozměrů. Při takovém řešení, kde je přechod do dvou rozměrů nutné uvažovat, že celkové řešení je dáno součinem dvou jednorozměrných řešení. To znamená, že pak β_s a $\phi(\xi)$ jsou určeny pro každý rozměr zvlášť. Fázový prvek potom vytváří součin fáze (12.19) [137]:

$$(\beta_{sx} \cdot \phi_x(x) + \beta_{sy} \cdot \phi_y(y)), \quad (12.19)$$

Definice řešení ϕ pro jeden rozměr je pak dán následujícími relacemi (12.20) [137]:

$$\phi(\xi) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \xi \operatorname{erf}(\xi) + \frac{1}{2} \cdot e^{(-\xi^2)} - \frac{1}{2}, \quad (12.20)$$

kde pro ξ_x platí vztah (12.21) [137]:

$$\xi_x = \frac{\sqrt{2 \cdot x}}{r_0}, \quad (12.21)$$

a nebo pro ξ_y platí vztah (12.22) [137]:

$$\xi_y = \frac{\sqrt{2 \cdot y}}{r_0}, \quad (12.22)$$

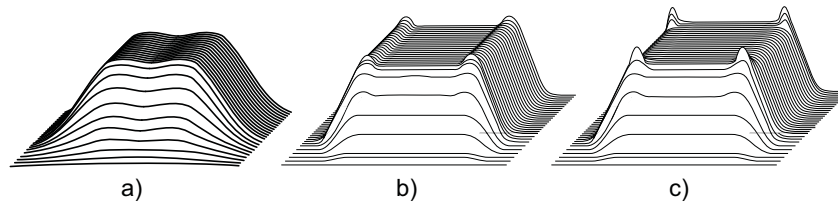
a kde pro r_0 platí, že je dáno $r_0 = 1/e^2$ a jedná se o pološířku vstupního Gaussovského svazku. Pokud je vstupní kruhově symetrický Gaussovský svazek transformován na Top-Hat svazek s kruhovou stopou je ϕ dané vztahem (12.23) [137]:

$$\phi(\xi) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \int_0^\xi \sqrt{1 - e^{(-\rho^2)d\rho}}, \quad (12.23)$$

kde ξ můžeme vyjádřit jako (12.24) [137]:

$$\xi = \frac{\sqrt{2 \cdot r}}{r_0}, \quad (12.24)$$

kde r je radiální vzdálenost od optické osy. Z obrázku 12.14 je pak vidět, že kvalita tvarování svazků je zásadně závislá na parametru β_s . Rovněž je z obrázku 12.14 zřejmé,

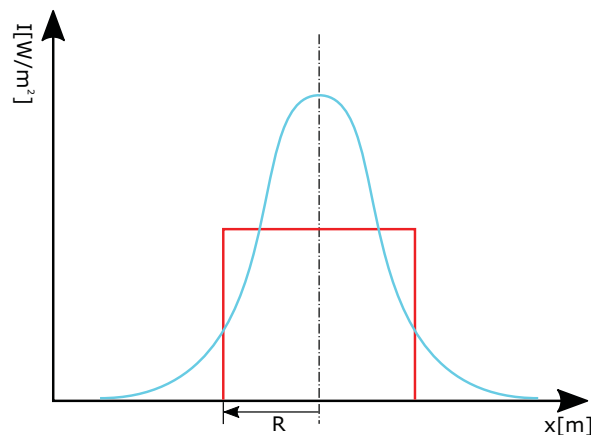


Obr. 12.14: Simulované výstupní Top-Hat svazky pro různá β_s (a) $\beta_s=4$, (b) $\beta_s=8$, (c) $\beta_s=16$

že nejlépe tvarovaný svazek byl dosažen při parametru $\beta_s = 16$.

12.5.2 Teorie tvarování svazku na Top-Hat svazek

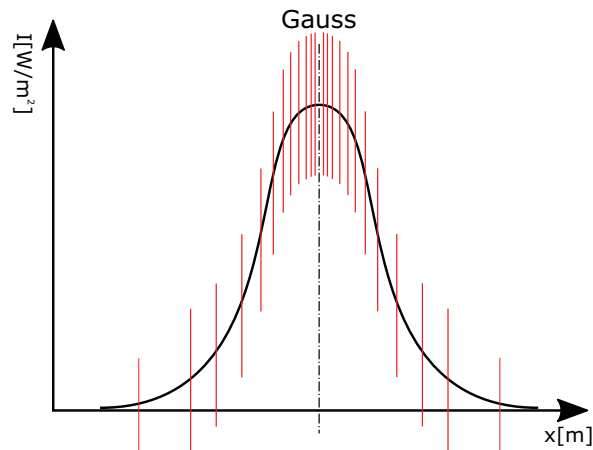
Tato kapitola se zabývá principem tvarování Gaussova svazku na Top-Hat svazek. Na obrázku 12.15 je vidět rozdíl mezi profily optických intenzit Gaussova svazku a Top-Hat svazku. Z obrázku 12.15 je patrné, že pro vytvoření Top-Hat svazku je nutno redistribuo-



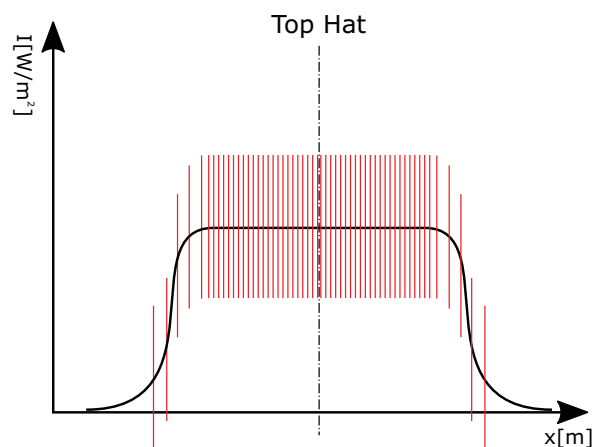
Obr. 12.15: Profil optických intenzit Gaussova a Top-Hat svazku

vat energii z Gaussova rozdělení na obdélníkové (Top-Hat). Jeden z principů redistribuce

spočívá v tzv. paprskovém mapování, kdy je svazek rozdělen na jednotlivé malé oblasti se stejnou hladinou energie. Každá tato oblast odpovídá oblasti ve výstupním profilu svazku. Příklad rozdělení oblastí vyobrazen na obrázku 12.16 a 12.17. Jednotlivé oblasti se stejnou hladinou energie jsou za pomoci transformační optiky, která leží mezi zdrojem optického svazku a dopadovou plochou, přeměněny na oblasti s hladinou energie odpovídající požadovanému výstupnímu profilu intenzity záření. Graficky je princip mapování znázorněn na obrázku 12.18. Pro převedení Gaussovského svazku na Top-Hat svazek musí svazek

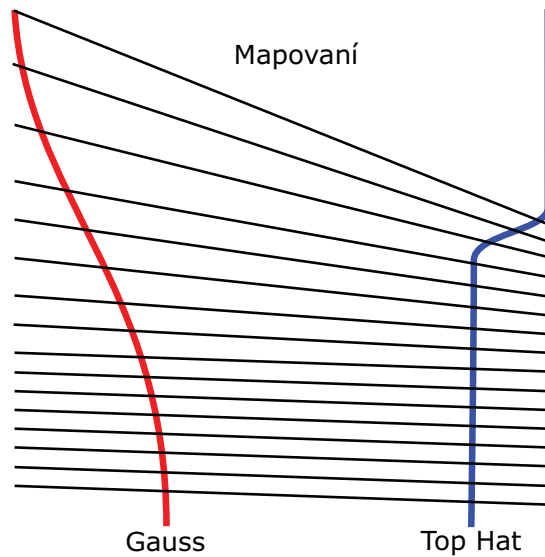


Obr. 12.16: Příklad rozdělení jednotlivých oblastí energie u Gaussovského svazku a Top-Hat svazku



Obr. 12.17: Příklad rozdělení jednotlivých oblastí energie u Gaussovského svazku a Top-Hat svazku

projít optickým prostředím, které se skládá z různých optických komponentů, které jsou schopny redistribuovat rozložení energie tak, abychom získali potřebný profil svazku.



Obr. 12.18: Příklad rozdělení jednotlivých oblastí energie u Gaussovského svazku a Top-Hat svazku

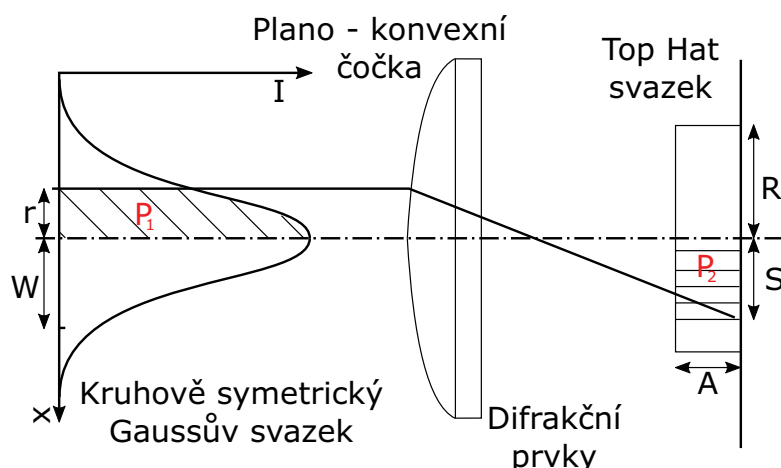
12.5.3 Popis Top-Hat svazku

Definice Top-Hat svazku vychází z toho, že jeho tvar má podobné kontury jako pánská pokrývka hlavy z dob 19. století, u nás známé pod názvem cylindr. Top-Hat je svazek, který má téměř rovnoměrné rozložení optické intenzity záření uvnitř kruhové nebo elipsovité stopy. Ideální Top-Hat svazek má rovnoměrné rozložení intenzity záření v celém svém profilu. Princip vytvoření svazku Top-Hat lze za pomoci plano-konvexní čočky a difrakčních prvků popsanych výše [136], [137]. Na obrázku 12.19 je zobrazen jeden ze způsobů vytvoření Top-Hat svazku. Na vstupu je kruhově symetrický Gaussov svazek s pološířkou svazku w a mající Gaussovské rozložení intenzity optického záření. U Top-Hat svazku je optická intenzita záření označována jako A [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]. Maximální šířka Top-Hat svazku je značena R a označení S představuje šířku svazku, která nabývá hodnot z intervalu $\langle 0; R \rangle$. Vztah mezi parametry Gaussova a Top-Hat svazku lze odvodit z podmínky rovnosti výkonů obou svazků. Pokud výkony P_1 a P_2 jsou si rovny, pak platí (12.25) [139], [140]:

$$\int_0^x I \cdot e^{-2 \cdot \frac{r^2}{w^2}} \cdot 2\pi \cdot r \cdot dr = A \cdot \pi \cdot S^2, \quad (12.25)$$

S využitím substituce pro $U = -2 \cdot \frac{r^2}{w^2}$ získáme vztah $dU = -4 \cdot \frac{r}{w^2} dr$, následně jej upravíme do tvaru $r \cdot dr = -\frac{w^2}{4} dU$ a použijeme jej v následující rovnici (12.26) [139], [140]:

$$P_1 = \int -I \cdot e^U \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{w^2}{4} dU = -\frac{I \cdot w^2 \cdot \pi}{2} \left[e^{\frac{-2 \cdot r^2}{w^2}} \right]_0^x = \frac{I \cdot w^2 \cdot \pi}{2} \left[1 - e^{\frac{-2 \cdot x^2}{w^2}} \right], \quad (12.26)$$



Obr. 12.19: Vytvoření Top-Hat svazku z Gaussovského svazku

Vztah mezi výkony P_1 pro Gaussovský svazek a P_2 pro Top-Hat svazek je pak dán následující rovnicí (12.27):

$$\frac{I \cdot w^2 \cdot \pi}{2} \left[1 - e^{-\frac{2 \cdot r^2}{w^2}} \right] = A \cdot \pi \cdot S^2. \quad (12.27)$$

Pro šířku Top-Hat svazku platí následující definice (12.28):

$$S^2 = \frac{I \cdot w^2}{2 \cdot A} \left[1 - e^{-\frac{2 \cdot r^2}{w^2}} \right]. \quad (12.28)$$

Výše uvedené vztahy definují vztah mezi šířkou Top-Hat svazku a parametry Gaussova svazku. Pro určení šířky S musíme navíc však znát i optickou intenzitu Top-Hat svazku. Intenzitu Top-Hat svazku můžeme ovlivňovat stejně jako ostatní parametry Top-Hat svazku pomocí plano-konvexní čočkou s difrakčními prvky a nastavením vzdálenosti mezi konverzní/transformační optickou soustavou a rovinou Top-Hat svazku. Jestliže budeme brát v úvahu výkon v celém Gaussovském svazku P_{celk} , pak získáme následující vztah (12.29):

$$P_{celk} = \frac{I \cdot w^2 \cdot \pi}{2} \cdot \left[1 - e^{-\frac{2 \cdot r^2}{w^2}} \right]_0^\infty = \frac{I \cdot w^2 \cdot \pi}{2}, \quad (12.29)$$

Za pomoci celkového výkonu Gaussova svazku s celkovým výkonem Top-Hat svazku můžeme určit maximální šířku Top-Hat svazku definovanou jako (12.30), (12.31):

$$\frac{I \cdot w^2 \cdot \pi}{2} = A \cdot \pi \cdot R^2, \quad (12.30)$$

$$R^2 = \frac{I \cdot w^2}{2 \cdot A}. \quad (12.31)$$

Pokud dosadíme do vzorce (12.31) ze vzorce (12.28) pak získáme vztah pro definici Top-Hat svazku a stanovíme na základě toho i maximální šířku Top-Hat svazku a velikost

Gaussova svazku (12.32):

$$S = \frac{I \cdot w^2}{2 \cdot A} \cdot \sqrt{\left[1 - e^{-\frac{2x^2}{w^2}}\right]}. \quad (12.32)$$

Při reálných testech přeměny svazků se nám nepodaří dosáhnout ideálního tvaru Top-Hat svazku, jelikož jeho kvalita je omezena, respektive bude záviset na kvalitativním provedení a použití konverzní/transformační optiky.

12.6 Volba optického vlákna pro zhotovení prototypu segmentu optického vysílače na bázi optických vláken

V práci bylo nutné najít vhodný typ optického vlákna, který by poté byl použit pro sestavení optického vysílače na bázi optických vláken. Ve fotonických komunikacích se používá několik typů optických vláken s různým typem indexu lomu jádra, pláště, ochrany a skladby materiálu. Nejčastěji se používají vlákna na bázi oxidu křemičitého SiO_2 pro své dobré optické vlastnosti především v oblasti nízkého měrného útlumu a zvládnutou metodiku výroby. Rovněž tento typ vláken je i standardizován ITU-T G.65x a i nadále vyvíjen největšími výrobci těchto vláken (Corning Glass, OFS Furukawa).

Reprezentanty vláken na bázi SiO_2 jsou především vlákna jednovidová (dle standardu ITU-T G.652x až G.657x) [125], [127], [128], [129], [130], [131] a mnohovidová (dle standardu ITU-T G.651x) [132], [133]. Ve fotonických komunikacích se v současnosti využívají primárně jednovidová optická vlákna z důvodu toho, že se u jednovidových vláken nevykytuje vidová disperze, která je dominujícím degradačním jevem u mnohovidových optických vláken. Nicméně na druhou stranu však, se u jednovidových vláken projevují zase jiné typy disperzí, které je nutné kompenzovat či snížit jejich vliv. Parametry jednovidových a mnohovidových optických vláken jsou shrnuty v rámci následující tabulky 12.1.

Tab. 12.1: Srovnání parametrů křemenných vláken [134]

Parametr	Jednovidové	Mnohovidové	Gradientní
Průměr jádra [μm]	4–10	50–2000	50–100
Průměr pláště [μm]	125	125–300	125–140
Průměr primární ochrany [μm]	250	250	250
Index lomu	1,45–1,49	-	-
Měrný útlum [$\text{db}\cdot\text{km}^{-1}$]	0,2–0,35	2,6–50	0,8–10
Použitelné vlnové délky [nm]	350–1800	850–1300	850–1300

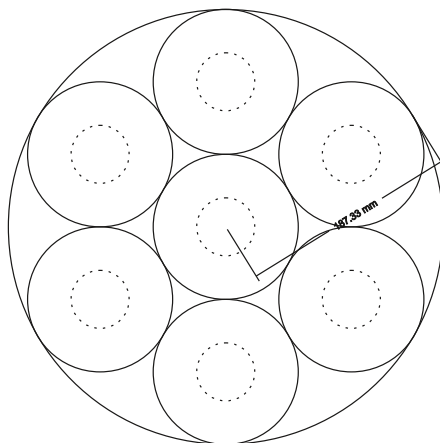
Ve fotonických aplikacích se používají i jiné typy vláken nežli na bázi SiO_2 a to polymerová optická vlákna tzv. POF. Největší předností těchto vláken je jednoduchá montáž a rychlá příprava konektorů v terénu. Jelikož polymerní optická vlákna dosahují velkých

hodnot útlumů (desítky až stovky dB), používají se výhradně na krátké vzdálenosti maximálně do 200 m. V posledních letech bylo zvládnutá metodika výroby těchto vláken, kdy se měrný útlum podařilo snížit na hodnotu $10 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ [135].

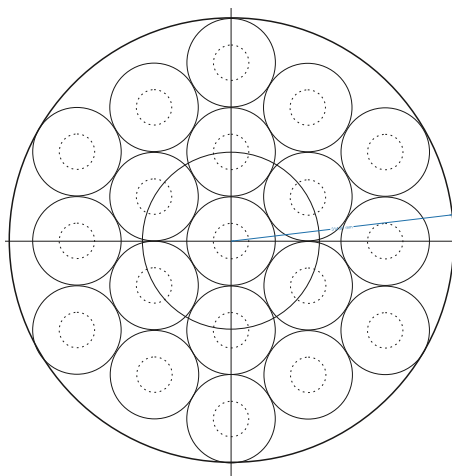
V práci bylo zvoleno optické vlákno od firmy Nufern s typovým označením S105/125-22A [136]. Toto vlákno má průměry jádra o velikosti $105 \mu\text{m}$ s tolerancí $\pm 3,0 \mu\text{m}$ a pláště $125 \mu\text{m}$ s tolerancí $\pm 2,0 \mu\text{m}$ a numerickou aperturou $0,220 \pm 0,020$ změřená při vlnové délce 1064 nm . Index lomu jádra je $1,4561$ a pláště $1,4378$. Použitelné vlnové délky definované výrobcem jsou v oblasti 800 až 1600 nm . Jelikož však v našem případě používáme ve viditelné oblasti spektra tj. mimo operační rozsah vlnových délek bude zde patrně vyšší měrný útlum, který bude působit na optické paprsky šířící se jádrem vlákna. Bohužel přesná hodnota měrného útlumu nebyla dohledatelná ani v katalogovém listu od optického vlákna, ani nebyla sdělena výrobcem. Je třeba říci, že volba optického vlákna s větším průměrem jádra a pláště má logický důvod, kdy větší plocha má za následek lepší možnost navázání, respektive vyzáření optického záření z vlákna. Především pak velikost plochy jádra je pro nás velice důležitá, jelikož bude buzeno primárně jádro optického vlákna, ve kterém dochází k vlnovodnému jevu. Optické vlákno Nufern s typovým označením S105/125-22A pak bylo se všemi parametry namodelováno i v rámci softwarové aplikace LightTools pro zhotovení simulací.

12.7 Volba počtu optických vláken v segmentu

Tento krok měl určit optimální rozvržení vláken v rámci segmentu, které má vliv na rozložení optické intenzity respektive výkonu vyzařovaného skrze tento segment s minimální ztrátou vázaného výkonu/intenzity. Při volbě umístění vláken v rámci segmentu je vhodné splnit určitá pravidla. Není vhodné volit obrazce, které nejsou symetrické vůči sobě, jako je například trojúhelník, obdélník, rovnoběžník, kosočtverec či jiné tvary. V práci bylo po několika typech volených obrazců rozhodnuto využití kruhu, do kterého jsou poté umístěna optická vlákna ve vhodném počtu. Optimální rozvržení vláken v segmentu optického vysílače se ukázalo s použitím 7 a 19 vláken, kdy dojde k efektivnímu zaplnění v rámci segmentu jakožto plochy jader a plášťů optických vláken. Návrh segmentu optického vysílače tvořeného 7 optickými vlákny je zobrazen na obrázku 12.20. Návrh segmentu optického vysílače tvořeného 19 optickými vlákny je zobrazen na obrázku 12.21. Pokud se podíváme pozorně na rozložení vláken v segmentu tvořeném 7 či 19 vlákny vidíme, že jsou zde stále menší plochy, které nejsou pokryty pláštěm či jádrem optických vláken. Nicméně tyto ztrátové oblasti jsou v kombinaci s plochami jader a plášťů optických vláken zanedbatelné. Jednoduchými výpočty pak můžeme vypočítat obsahy ploch pro jádra a pláště, které potřebujeme k tomu, abychom určili efektivní plochu segmentu, ze kterého bude vyzařovat optické záření do prostoru. Pro získání informací o efektivní ploše jádra či pláště pak využijeme vztahu pro výpočet obsahu kruhu. Pro mnohovidové optické vlákno o velikosti průměru jádra $105 \mu\text{m}$ je efektivní velikost plochy jader v segmentu $60613 \mu\text{m}^2$ a pro



Obr. 12.20: Rozvržení vláken do kruhu při tvorbě segmentu tvořeného 7 optickými vlákny typu S105/125-22A



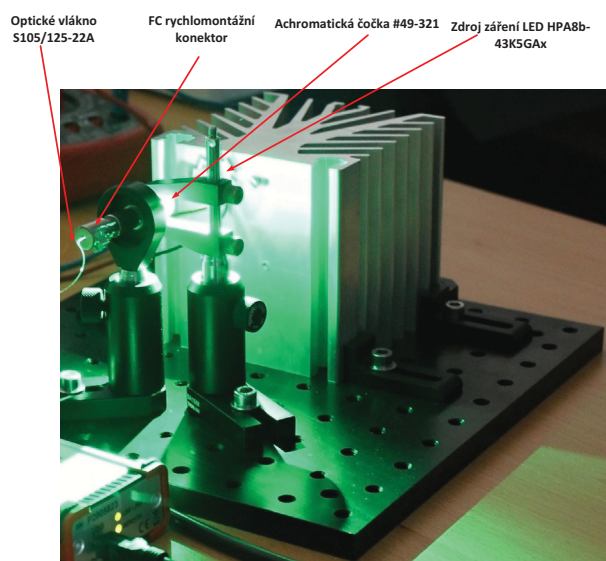
Obr. 12.21: Rozvržení vláken do kruhu při tvorbě segmentu tvořeného 19 optickými vlákny typu S105/125-22A

plášť o hodnotě průměru $125 \mu\text{m}$ pro 7 optických vláken v segmentu $85902 \mu\text{m}^2$. Pomocí základních matematických relací získáme poloměr vnější kružnice segmentu o velikosti $187,5 \mu\text{m}$. Pro mnohovidové optické vlákno o velikosti průměru jádra $105 \mu\text{m}$ je pak efektivní velikost plochy jader v segmentu $164521 \mu\text{m}^2$ a pro plášť o hodnotě průměru $125 \mu\text{m}$ pro 19 optických vláken v segmentu $233165 \mu\text{m}^2$. Pomocí základních matematických relací získáme poloměr vnější kružnice segmentu o velikosti $312,5 \mu\text{m}$.

Na jedné straně segmentového optického vysílače je nutné uvažovat, že se bude jednat o plochu kam bude fokusováno optické záření ze zářivého zdroje skrze adaptivní optiku. K uchycení vláken v segmentu tvořeného 7 či 19 vlákny bylo nutné najít vhodný typ konektoru. K tomuto účelu je vhodné využít SMA konektoru o velkém průměru ferule pro optická vlákna. Pro segment optického vysílače tvořený 7 optickými vlákny S105/125-

22A bylo použito SMA905 konektoru o průměru ferule 410 μm a pro segment s 19 vlákny SMA905 konektoru o průměru ferule 630 μm . Pro zalepení, respektive uchycení vláken do SMA konektorů daných typů bylo využito technologického vybavení firmy SQS vláknová optika a.s.

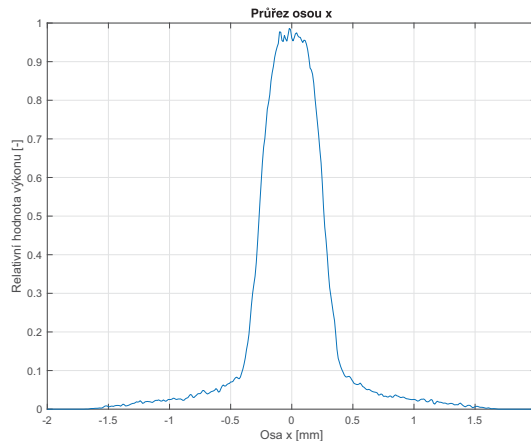
V práci se v následující části vracíme k problematice tvarování optických svazků a to právě z důvodu výběru optického konektoru SMA905 pro uchycení optických vláken typu S105/125-22A v počtu 7 nebo 19 kusů v rámci daného segmentu optického vysílače. Jak již bylo uvedeno v předchozích kapitolách, byl vybrán zářivý zdroj, achromatická plano-konvexní čočka pro fokusaci optického záření na čelo SMA905 konektoru pro segmentový vláknový vysílač. Na obrázku 12.22 níže můžeme vidět schéma při reálném měření, které bylo převedeno do softwarové aplikace LightTools pro simulaci tvarování svazků a uvedení, jak vypadá optický svazek za vybranou čočkou s typovým označením EDMUND OPTICS VIS-NIR Coated, Achromatic Lens #49-321. Vzdálenost mezi zářivým zdrojem HPA8b-43K5GAX a achromatickou čočkou byla 3,4 cm a vzdálenost mezi achromatickou čočkou a čelem SMA905 konektoru od segmentového optického vysílače byla dána ohniskovou vzdáleností $EFL=1,49$ cm. V simulacích byla provedena analýza chování optického



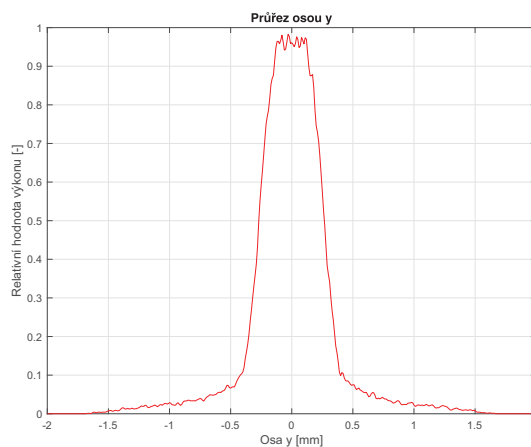
Obr. 12.22: Reálné uspořádání vazby zářivý zdroj do SMA905 konektoru pro segmentový vláknový vysílač

svazku za achromatickou čočkou zaostřenou do malého světelného bodu, který ozařuje čelo ferule SMA konektoru. Cílem bylo poukázat na to, jak vypadá svazek, a zároveň jaká část z fokusovaného svazku dopadá mimo čelo SMA konektoru, a není navázána do SMA konektoru, respektive do svazku vláken ve feruli. Zároveň je nutné provést analýzu, zda svazek dopadající na čelo SMA konektoru má uniformní rozdělení výkonu, čemuž odpovídá nejlépe Top-Hat svazek či dochází ke kolísání výkonové či intenzitní úrovně, což poté vede k různým vazebním podmínkám pro svazek optických vláken a jejich vý-

konovým rozdílům mezi jednotlivými vlákny. Na obrázcích níže můžeme vidět řezy v ose x 12.23 a y 12.24 pro optický svazek šířící se za achromatickou čočkou s typovým označením EDMUND OPTICS VIS-NIR Coated, Achromatic Lens #49-321 dopadající na čelo SMA konektoru segmentového optického vysílače. Hodnoty výkonu jsou převedeny na relativní hodnoty. Aby bylo možné analyzovat detailněji část optického zfokusova-



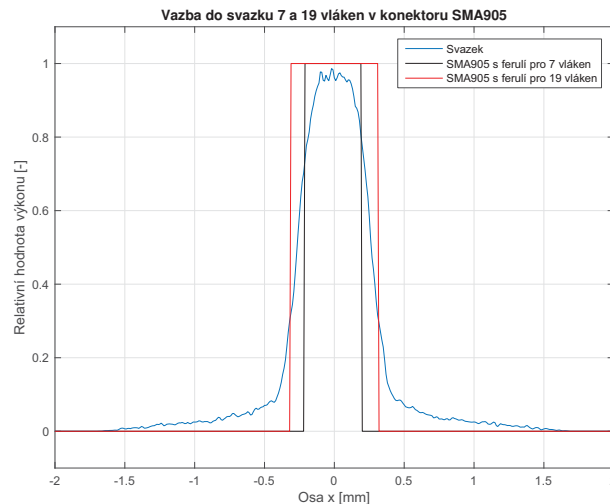
Obr. 12.23: Řez osou x pro optický svazek dopadající na čelo SMA905 konektoru pro segmentový vláknový vysílač ze softwaru LightTools



Obr. 12.24: Řez osou y pro optický svazek dopadající na čelo SMA905 konektoru pro segmentový vláknový vysílač ze softwaru LightTools

ného svazku dopadajícího na čelo SMA905 konektoru a ztrátových oblastí, kdy dojde k ořezání svazku mimo oblast ferule SMA905 konektoru, byl zhotoven obrázek 12.25, na kterém můžeme pozorovat průměry ferulí dvou použitých typů SMA905 konektorů. Jak již bylo uvedeno, tak pro 7 vláknový segment bylo použito SMA905 konektoru o průměru ferule 410 μm reprezentovaný černou barvou v rámci obrázku 12.25 a pro segment s 19 vlákny SMA905 konektoru o průměru ferule 630 μm je ořezání svazku reprezentováno červenou barvou 12.25. Pokud se podíváme pozorně, tak vidíme, že část svazku, která je

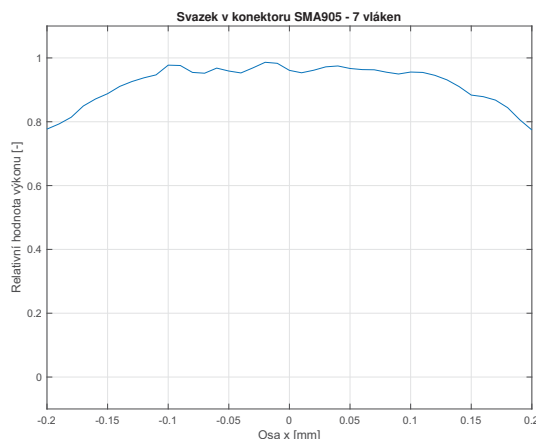
definována modrou barvou se jak pro SMA905 konektor s průměrem ferule o 410 μm či 630 μm dostává mimo definované části a tím dochází k výkonovým ztrátám. Nicméně je rovněž patrné, že tyto oblasti nejsou velké a dominantní část fokusovaného svazku proniká do SMA905 konektoru, respektive na čela uchycených optických vláken ve feruli, což nám zefektivňuje samotnou vazbu do vláken. Pokud se vrátíme zpět ke kapitole 12.5, tak vidíme, že nejvíce vystihuje toto ořezání, respektive tvarování svazku, dle apertury či metody malého otvoru viz obrázek 12.11. V rámci simulací byla provedena i hlubší analýza



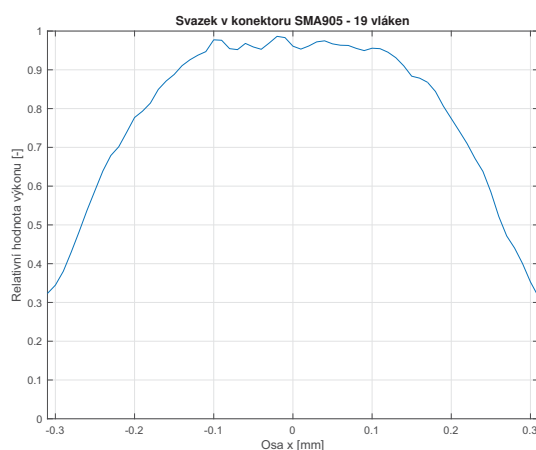
Obr. 12.25: Vazební podmínky pro SMA905 konektor (s průměry ferule 410 μm či 630 μm) pro segmentový vláknový vysílač ze softwaru LightTools

optického svazku, který dopadá na čelo SMA905 konektoru, kde jsou ve feruli umístěna optická vlákna typu S105/125-22A v počtu 7 nebo 19 kusů, podle volby segmentového vysílače. Na předešlém obrázku 12.25 tuto skutečnost reprezentují křivky označené černě a červeně podle průměru ferule daného typu SMA905 konektoru, kdy dochází k překryvu optického svazku dopadajícího na čelo ferule SMA905 konektoru a částí optického svazku, který se nenaváže do ferule SMA905 konektoru. Obrázek 12.26 nám pak zobrazuje tuto skutečnost pro SMA905 konektor s průměrem ferule 410 μm , kde je uchyceno 7 optických vláken typu S105/125-22A. Z obrázku 12.26 je patrné, že podstatná část optického svazku dopadajícího na čelo ferule SMA905 konektoru či čel optických vláken má v relativních hodnotách vyjádřený výkon rovnoměrný. Tím je zaručeno i rovnoměrné výkonové vybuzení jader jednotlivých optických vláken v segmentu. Následující obrázek 12.27 zobrazuje stejnou skutečnost, avšak pro SMA905 konektor s uchycením 19 optických vláken typu S105/125-22A. Zde lze již pozorovat, že plocha respektive průměr ferule SMA905 konektoru je větší a činí 630 μm , a tomu odpovídá i část navázaného optického svazku. Vidíme, že okrajové části ve kterých jsou umístěna optická vlákna budou méně vybuzena nežli tomu bude u vláken soustředěných v blízkosti osy. Právě nerovnoměrnost vybuzení jednotlivých optických vláken nám přináší další problémy, které je nutné řešit s ohledem na dodržení podmínky 3 dB kolísání výkonové hustoty vyzařované z optického vysílače.

Je třeba říci, že stejně jako bylo třeba vlákna uchytnit do SMA905 konektoru pro efek-



Obr. 12.26: Analýza vazebních podmínek pro segmentový vláknový vysílač ze softwaru Light-Tools a optický svazek dopadající na čelo SMA905 konektoru (s průměrem ferule 410 μm)



Obr. 12.27: Analýza vazebních podmínek pro segmentový vláknový vysílač ze softwaru Light-Tools a optický svazek dopadající na čelo SMA905 konektoru (s průměrem ferule 630 μm)

tivní navázání světelného záření do vláken, tak i druhý konec musel být zpracováván do nějakého úchytu. K tomu slouží výřezek s polystyrénu do kterého byly pod definovanými úhly vyvrtány otvory pro vložení a poté uchycení optických vláken typu S105/125-22A. Tyto výřezky byly vyrobeny pro segment tvořený 7 a 19 optickými vlákny pro zhotovení optického vysílače.

12.8 Inovativní řešení konců optických vláken pomocí PDMS (polydimetylsiloxanu)

V rámci práce bylo nutné tvarovat konce optických vláken tak, aby byla zvětšena numerická apertura vláken čili vyzařovací úhel optických vláken, které poté vedlo k lepším

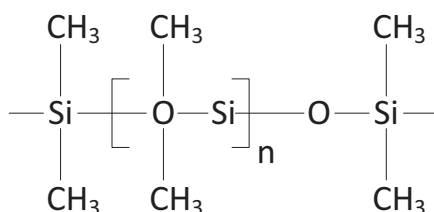
možnostem vykrytí měřené plochy, a zároveň k vyhlazení výkonových špiček vyzařovaných ze segmentu. Pro úpravu konců optických vláken bylo zvoleno inovativní řešení použitím polydimetylsiloxanu. Prvotní informace o využití PDMS pro tvarování konců či čel optických vláken vzešlo z komunikace s prof. Pudišem, který nabídnul svoji pomoc při počátečním zajištění výroby a nanesení siloxanu.

Dřívější práce poukazyvaly na možnost využití dodatečné adaptivní optiky v podobě čoček, či MEMS prvků, které měly za úkol rozšiřovat vyzařovací úhel z vlákna či svazku optických vláken. Polydimetylsiloxan patří mezi polymerní organokřemičité sloučeniny, které obsahují v jedné molekule vazbu Si-O, velice často je označován jako silikonový kaučuk. Pevnost silikonových kaučuků je nízká, ale v širokém rozsahu teplot se téměř nemění. Běžné teploty použitelnosti se pohybují v rozmezí -60°C až $+200^{\circ}\text{C}$ a při krátkodobém teplotním namáhání odolají teplotě až 350°C , [141], [142].

Základní rozdělení silikonových kaučuků:

- polydimetylsiloxany pro obecné použití,
- polydimetylsiloxany s fenylovými substituenty (za nízkých teplot zlepšená ohebnost),
- polydimetylsiloxany s 1,1,1- trifluorpropylovými substituenty (odolné vůči olejům a palivům).

Z hlediska chemického složení patří polydimetylsiloxan mezi opticky čisté materiály, které obsahují jen malou míru nečistot. Polydimetylsiloxan je čirý gel bez zápachu a chuti, který je díky své vysoké viskozitě téměř nerozpustný ve vodě. PDMS je odolný vůči vysokým teplotám, chemikáliím, radiaci a UV záření. Využití nachází v širokém spektru odvětví např. v letectví, kosmonautice, lékařství, potravinářství, elektronice a automobilovém průmyslu. Hlavní nevýhodou je nákladná a složitá výroba, výhodou je především výborná teplotní stabilita. Pro výrobu polydimetylsiloxanu se používá technický křemík a kombinace kyseliny chlorovodíkové a metanolu, která vytváří chlormetan. Výroba postupně prochází čtyřmi chemickými reakcemi (syntézou, rektifikací, hydrolýzou, polykondenzací). Konečné chemické složení polydimetylsiloxanu zobrazuje strukturní vzorec na obrázku 12.28.



Obr. 12.28: Organický substituent je většinou reprezentován metylem (CH₃)

12.8.1 Sylgard 184

Sylgard je název pro dvousložkový zalévací a zapouzdřovací elastomer na bázi PDMS doplněného o vytvrzovací činidlo od firmy Dow Corning. Až po přidání vytvrzovacího činidla lze PMDS za pomoci zvýšené konstantní teploty vytvrdit. Různé varianty silikonových gelů mají různé fyzikální a mechanické vlastnosti, a proto se liší i svým použitím.

V této práci bylo využito silikonového gelu Sylgard 184, který je na katedře k dispozici. Sylgard 184 patří mezi středně viskózní kapalné elastomery, který se používá v rozsahu teplot od -55°C do $+200^{\circ}\text{C}$. V širokém rozsahu frekvencí má tento silikonový gel výbornou fyzikální a elektrickou stabilitu a díky své odolnosti vůči vodě poskytuje ochranu proti vnějšímu prostředí. Sylgard 184 je odolný vůči mechanickému poškození a radiaci. Oproti jiným typům Sylgardu je rozdíl mezi těmito kaučuky ve způsobu a době vytvrzování. Zatímco např. Sylgard 182 je vytvrzován teplem, tak Sylgard 184 se vytvrdí již při pokojové teplotě 25°C , proto je vhodný pro zalévání např. solárních panelů [141], [142], [143].

12.8.2 Vlastnosti polydimetylsiloxanu

V následujících podkapitolách se nachází souhrn typických, mechanických a elektrických vlastností Sylgardu 184. Optické vlastnosti PDMS jsou porovnány s materiály, které se v současné době nejvíce využívají pro výrobu optických vláken (SiO_2 , PMMA) [141], [142].

12.8.3 Typické, mechanické a elektrické vlastnosti

V tabulce 12.2 jsou shrnuty hlavní typické vlastnosti Sylgardu 182 a 184, který se v současnosti nejvíce používá v průmyslové praxi pro jeho výhodné vlastnosti. Z tabulky 12.2 je patrné, že nízká viskozita, ale dobré vlastnosti vůči teplotnímu šoku či tepelné vodivosti [141], [142]. Hlavní mechanické vlastnosti Sylgardu 184 a 182, nejčastěji používaných

Tab. 12.2: Typické vlastnosti Sylgardu 182 a 184 [141]

Typická vlastnost	Sylgard 182	Sylgard 184
Viskozita základní složky [mPas]	5475	5100
Viskozita po přidání vytvrzovacího činidla [mPas]	4575	3500
Doba použitelnosti při 25°C [hod.]	8	2
Po vytvrzení		
Odolnost vůči teplotnímu šoku (-55° – 155°C)	10 cyklů	10 cyklů
Teplotní vodivost [$\text{W}\cdot\text{m}\cdot\text{K}$]	0,16	0,16
Hořlavost dle normy UL94	V-1	V-1

silikonových kaučuků je shrnuto v rámci tabulky 12.3. Tvrdost (Shore) se měří pomocí přítlačným tvrdoměrem, který se nazývá durometr. Stupnice tvrdost Shore A se používá pro určení tvrdosti měkkých gum, polyesterů, PVC, kůží, nitrilových gum apod. Číslo vyjadřuje tvrdost materiálu (0–100), kdy 0 reprezentuje měkké materiály a 100 materiály

Tab. 12.3: Mechanické vlastnosti Sylgardu 182 a 184 [141]

Mechanická vlastnost	Sylgard 182	Sylgard 184
Tvrdość (Shore)	A51	A48
Mez pevnosti v tahu [MPa]	6,2	6,2
Pevnost v roztržení [kN·m ⁻¹]	2,7	2,7
Bod lámavosti [°C]	<-70	<-70

tvrdé. Sylgard se nachází na této stupnici zhruba uprostřed a jeho tvrdost se dá např. přirovnat k tvrdosti těsnící gumy u dveří. Ve srovnání s polymerovými (48–76 MPa) a křemennými (3,4 5GPa) optickými vlákny má polydimetylsiloxan po vytvrzení malou pevnost v tahu (6,2 MPa) [141], [142], [143].

Polydimetylsiloxan patří díky své vysoké rezistivitě mezi elektrické izolanty, stane se vodivým až po překlenutí průrazného napětí řádově kV·mm⁻¹ (dielektrická pevnost). Elektrickou vodivost lze ovlivnit přidáním vodivých příměsí do PDMS při jeho vytvrzování či míchání. V následující tabulce 12.4 jsou shrnuty nejdůležitější elektrické vlastnosti PDMS Sylgardu 184 [141], [142], [143].

Tab. 12.4: Elektrické vlastnosti Sylgardu 182 a 184, [141]

Elektrická vlastnost	Sylgard 182	Sylgard 184
Dielektrická pevnost E_p [kV·mm ⁻¹]	19	14
Relativní permitivita ϵ , 100Hz	2,65	2,72
Relativní permitivita ϵ , 100kHz	2,65	2,68
Ztrátový součinitel $\tan \delta$, 100Hz	0,005	0,0023
Ztrátový součinitel $\tan \delta$, 100kHz	0,005	0,0013
Rezistivita ζ [Ω ·cm]	$1,6 \cdot 10^{15}$	$2,9 \cdot 10^{14}$

12.8.4 Optické vlastnosti

Ve srovnání s uvedenými materiály má polydimetylsiloxan velice výhodný index lomu. Díky nižšímu indexu lomu se sníží hodnota numerické apertury a navýší se tak možná přenosová rychlost a šířka pásma. Nevýhodou bude složitější navázání světla do vlákna. Optická propustnost PDMS nedosahuje sice propustnosti SiO₂ (99,99 %), ale převyšuje propustnost PMMA (92 %) o 4 %. Absorpce polydimetylsiloxanu se pohybuje okolo 0,04 %. Detailní porovnání optických vlastností pak zobrazuje tabulka 12.5. Pro zjištění velikosti indexu lomu pro Sylgard 184 při vlnové délce 525 nm bylo použito informací z publikací [141], [142], [143] a [144], kde jsou hodnoty indexů lomů při různých vlnových délkách. Na základě těchto hodnot byla vykreslena a proložena křivka a proveden odečet hodnoty indexu lomu při vlnové délce 525 nm. Index lomu Sylgardu 184 při 525 nm je 1,42. Je třeba říci, že tato hodnota je experimentálně odvozena, nikoliv změřena.

Tab. 12.5: Porovnání optických vlastností materiálů nejčastěji používaných ve fotonických komunikacích z pohledu indexu lomu, [134],[141],[142],[143]

Vlnová délka [nm]	Index lomu PDMS	Index lomu PMMA	Index lomu SiO ₂
589	1,411	1,490	1,458
632	1,422	1,488	1,457
1320	1,402	1,484	1,446
1550	1,399	1,479	1,444

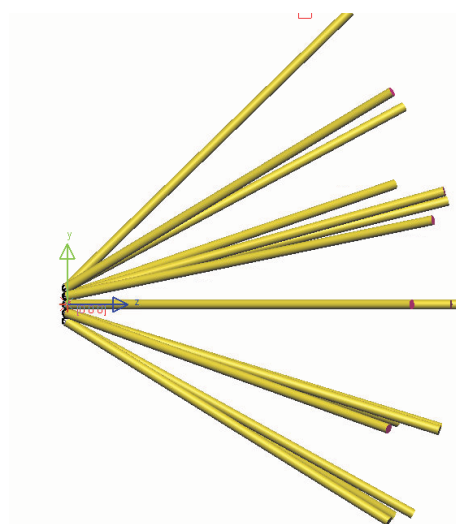
12.8.5 Postup výroby PDMS a nanesení na konce optických vláken

Při výrobě PDMS je nutné dodržet postupy definované dle výrobce Dow Corning, kdy byl do skleněné laboratorní nádoby o obsahu 25 ml dán silikonový gel Sylgard 184 o hmotnosti 5 g zvážený na přesné váze KB2400-2N [145] a poté přidáno vytvrzovací činidlo v poměru 10:1. Pomocí třepačky s typovým označením Vortex Genius 3 [146] byl silikonový gel s vytvrzovacím činidlem rovnoměrně rozmíchán po dobu 45 minut. Takto smíchaný gel byl poté ponechán po dobu 3 dnů v ledničce. Tímto způsobem se snažíme stimulovat proces zmizení vzduchových kapes (bublinek), kdy stoupají lehčí částice vzhůru mnohem rychleji (rozpuštnost kyslíku s rostoucí teplotou klesá). Pokud by nedošlo k potlačení vzniku bublinek, tak by docházelo k rozptylování světelného záření. Poté byla vytažena laboratorní nádoba se silikonovým gelem Sylgard 184 a ponechána v pokojové teplotě o 25°C po dobu 2 hodin pro vytvrzení a získání viskóznějšího charakteru pro lepší budoucí manipulaci. Po uplynutí této doby byl již PDMS Sylgard 184 dostatečně viskózní a částečně vytvrzen a bylo možné provést nanesení gelu na konce optických vláken o průměrech 105/125 μm. Před samotným nanesením PDMS bylo nutné optická vlákna vložit do polystyrénového výřezu pro uchycení vláken, do kterého byly vyvrtány otvory pro uchycení vláken. Otvory byly zhotoveny na základě výsledků ze simulací, které určily, jak musí být optická vlákna od sebe vzdálená vůči sobě od středového vlákna v rovině. Více informací k simulacím a volbě úhlů a vychýlení vláken mezi sebou je uvedeno v rámci kapitoly popisující simulované a reálné výsledky včetně zvolených variant. Pracoviště pro zhotovení otvorů, a umístění vláken do výřezku je v příloze A.1. Jakmile bylo takto vlákno usazeno v polystyrénovém výřezku, tak došlo k zalomení vlákna v lamačce. Posledním krokem je umístění jednotlivých optických vláken do nože s tří-osým mikroposuvem s typovým označením MBT616D [147]. Na tubu ochrany svaru byl nanesen PDMS a uchycen do druhého tří-osého mikroposuvu. Optické vlákno s rovným zakončením čela v noži bylo přiblíženo k nanesené vrstvě PDMS a po dotyku rovinného konce vlákna s PDMS bylo vlákno pomalu oddalováno od tuby ochrany svaru A.2. Ke kontrole dotyku rovinného zakončení optického vlákna S105/125-22A s PDMS sloužil mikroskop Bresser 58-02520 s 20 násobným přiblížením A.3, [148]. Pomocí mikropáčky došlo k ohřátí konce optického vlákna s PDMS po dobu 2 minut pro vytvrzení PDMS a uchycení či k optimálnímu optickému spojení s optickým vláknem. Takto se postupovalo analogicky pro další vlákna a to

podle počtu vláken v segmentu tj. buď pro 7 nebo 19. V konečné fázi úpravy a nanesení PDMS se optická vlákna povytáhla směrem od polystyrénového výřezku v optimální délce zakápnula Pattex gelem pro aretaci vláken do polystyrénového výřezku.

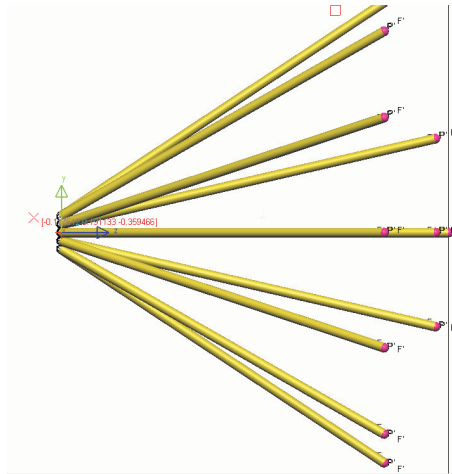
12.8.6 Volba zakončení optických vláken pro dosažení rovnoměrného rozložení světla

Pro nalezení optimálního vychýlení optických vláken pro dosažení rovnoměrného rozložení světla a dosažení, co největší světelné stopy ze segmentu bylo použito rovného zakončení optických vláken a pomocí PDMS (polydimetylsiloxanu). PDMS poté vytvořilo plankonvexní čočku na koncích svazku optických vláken v rámci segmentu. Rovná zakončení mnohoovidových optických vláken je nejjednodušší způsob docílení maximální velikosti numerické apertury. Pro rovné zakončení optických vláken stačí pouze dané vlákno očistit od primární ochrany 250 μm a poté zalomit v lamačce vláken, která zajistí rovný konec vlákna. Návrh simulace zakončení rovných konců u optických vláken je zobrazeno na obrázku 12.29. Návrh simulace zakončení konců u mnohoovidových optických vláken pomocí



Obr. 12.29: Návrh simulace rovného zakončení optických vláken v rámci segmentu tvořeného 19 vlákny

PDMS s konkávní čočkou je zobrazeno na obrázku 12.30 v segmentu tvořeného 19 optickými vlákny. Abychom mohli určit velikost a modelovat zakončení vytvořené pomocí PDMS, bylo nutné provést měření pomocí mikroskopu a zjistit tvar a vizualizaci daného zakončení. Pro tyto účely bylo použito mikroskopu ARSENAL MODEL LPT 3113iA-T [149]. Pro dobré zaostření na konec optického vlákna bylo použito přiblížení pomocí plano-chromatického objektivu o parametrech 4 \times 0,10 L Plan. Dále byla použita digitální kamera CMOS 550 s rozlišením 5 Mpix, čemuž odpovídá velikost v pixelech 2592 \times 1944. Kamera CMOS 550 [150] byla připojena k počítači skrze rozhraní USB, kde za pomocí



Obr. 12.30: Návrh simulace využití PDMS zakončení optických vláken v rámci segmentu tvořeného 19 vlákny

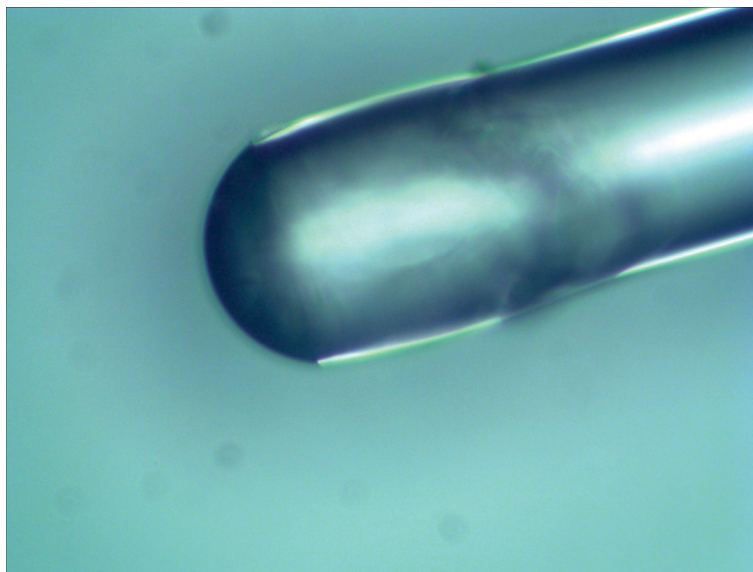
softwarového nástroje Tsview byly pořízeny snímky zakončení optických vláken pomocí PDMS.

Na obrázku 12.31 můžeme pozorovat optické zakončení s PDMS pro mnohovidové optické vlákno s parametry průměru jádra $105\ \mu\text{m}$ a pláště $125\ \mu\text{m}$. Z obrázku 12.31 je patrné, že vyrobený konec pomocí PDMS má tvar poloviny koule. Pro prosvícení skrze polovinu koule vyrobenou pomocí PDMS je vidět, jak se světlo rozptyluje do všech stran rovnoměrně. Vyrobena polovina koule na konci optického vlákna má relativně rovnoměrný tvar a při nanášení se ukázala značná reprodukovatelnost výroby polovin koule za pomoci PDMS na koncích vláken. Snímky byly pořízeny za pomoci kamery CMOS 550 a vyexportovány pomocí programu Tsview. Ve spolupráci s kolegy z Katedry fyziky, Fakulty elektrotechnické, Žilinské univerzity pod vedením prof. Pudiše byla provedena měření velikosti čoček z PDMS nanesených na konce optických vláken. V jejich speciálním software k mikroskopům bylo možné analyzovat velikost vytvořené čočky. Jak můžeme vidět na obrázku 12.32, tak velikost čočky byla $51,8\ \mu\text{m}$. Zhotovené čočky na koncích optických vláken byly vyrobeny a změřeny s tolerancí $\pm 4,2\ \mu\text{m}$.

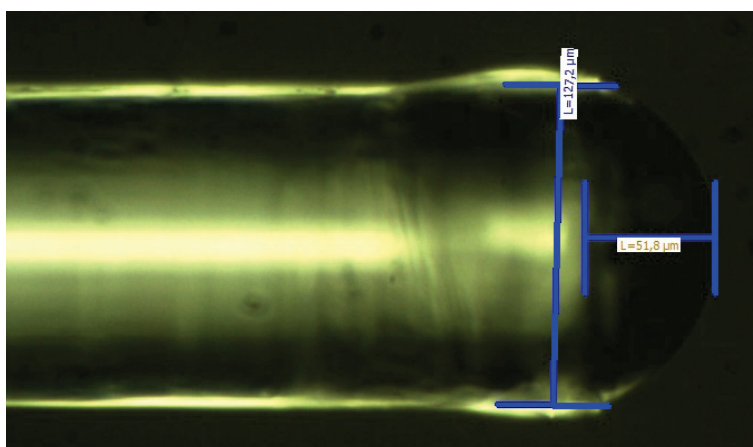
12.8.7 Měření numerické apertury optického vlákna S105/125-22A s a bez čoček

Numerická apertura optického vlákna je definována bezrozměrným parametrem, který nepřímo určuje rozsah úhlů vstupních paprsků, které se budou moci beze ztrát šířit optickým vláknem viz obrázek 12.33. Čím je NA větší, tím lépe je vlákno schopno do svého jádra navázat optické záření ze svého okolí. Numerická apertura je definována pouze pro meridionální paprsky, kde definujeme (12.33), [151]:

$$NA = \sin \Theta_a \cdot n_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}[-], \quad (12.33)$$

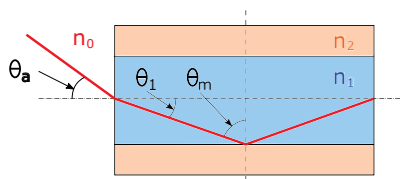


Obr. 12.31: Vizuální kontrola konců optických vláken pomocí mikroskopu s PDMS pro vlákno průměru jádra 105 μm a pláště 125 μm



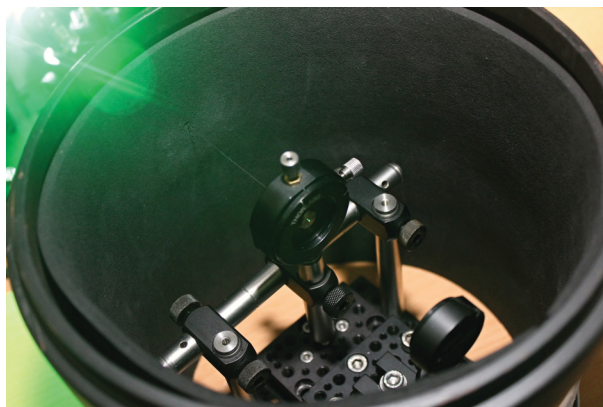
Obr. 12.32: Měření velikosti čoček z PDMS pro vlákno Nufern S105/125-22A

kde Θ_a je polovina vrcholového úhlu kužele paprsků vstupujících do optického vlákna a n_0 je index lomu vzduchu (odpovídá 1). Numerická apertura se rovněž může vypočítat ze znalostí indexu lomu jádra n_1 a pláště n_2 optického vlákna. V našem případě je volba a ve-



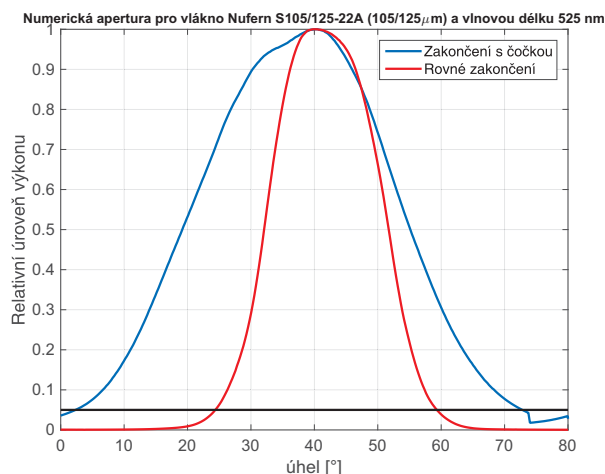
Obr. 12.33: Numerická apertura optického vlákna

likost numerické apertury důležitý parametr, jelikož určuje možnosti vyzařování optického záření ze segmentu optických vláken, respektive z vlákna. Naším cílem je získat co největší velikost numerické apertury při použití PDMS umístěného na konci optického vlákna či vláknec. Pro ověření zvětšení vyzařovacích úhlů z optického vlákna při použití PDMS bylo provedeno měření numerické apertury. Měření numerické apertury se řídí normou IEC 60793-1-43:2015 [152], při které je definováno měření numerické apertury na 5% hranici vystupujícího výkonu vůči maximu vyzařovacího úhlu optického vlákna. K proměření bylo použito zařízení zkonstruované pro tyto účely, které můžeme vidět na obrázku 12.34. Toto zařízení se skládalo z počítače, na kterém je ovládací softwarová aplikace naprogramována v softwaru LabVIEW, která nastavuje krok otáčení pro krokový motorek TST101 [153], na němž je připevněn detektor S120C [154] pracující s vlnovým rozsahem (400–1100 nm). Detektor S120C byl připojen do měřiče výkonu PM100USB [155] a ten pomocí USB kabelu do počítače, kde se pomocí stejné aplikace, jako pro ovládání vychýlení krokového motoru, snímaly hodnoty výkonu dopadajícího pod určitými úhly na detektor. K měření



Obr. 12.34: Zařízení pro měření numerické apertury optických vláken

numerické apertury bylo použito 0,5 m optického vlákna S105/125-22A, které bylo na jednom konci osazeno do rychlo-montážního konektoru FC a připevněno do držáku před kterým byla umístěna achromatická čočka a zářivý zdroj emitující záření na vlnové délce 525 nm. Druhý konec vlákna byl umístěn do držáku a naproti němu je připevněn detektor na krokový motorek TST101. Detektor podle nastaveného kroku snímá hodnotu výkonu v jednotlivých stupních. Vlákno bylo proměřeno s rovným zakončením a také s nanesením PDMS. Každé měření bylo provedeno 10×. Dále se z naměřených dat provedl statistický průměr. Z průměrných hodnot výkonů byly zhotoveny relativní hodnoty výkonu a vykresleny vyzařovací charakteristiky pro optické vlákno s rovným zakončením či s PDMS v MATLABu. Výsledky získané z měření a z výpočtů jsou zobrazeny na obrázku 12.35 pro rovné zakončení a s nanesením PDMS (čočkou). Po odečtu 5% z hodnoty relativní úrovně výkonu získáme vyzařovací úhly optického vlákna s rovným zakončením a s PDMS (čočkou). Pro rovné zakončení optického vlákna při buzení zářivým zdrojem pracujícím na 525 nm je úhel $17,385^\circ$ a pro zakončení s PDMS (čočkou) je úhel roven $34,765^\circ$. Hodnota



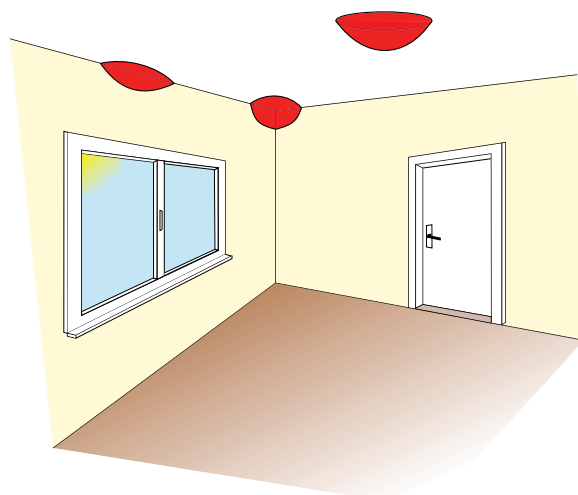
Obr. 12.35: Měření numerické apertury optického vlákna s rovným zakončením a s čočkou

numerické apertury s rovným zakončením je 0,298 a s PDMS (čočkou) 0,570.

12.9 Návrh plochy pro vyhodnocení rovnoměrného rozložení optické intenzity a volba místnosti pro měření

Cílem práce je navrhnutí prototypu optického segmentového vysílače, který bude mít za úkol efektivně pokrýt část místnosti s rovnoměrným rozložením optické intenzity v prostoru, kdy míra kolísání hustoty optického výkonu nepřesáhne 3 dB (50 % ztráty výkonu). Za tímto účelem bylo nutné zvážit plochu, na které budou prováděna měření a simulace. Jelikož daný optický vysílač je konstruován pro budoucí použití ve VLC komunikaci je třeba si uvědomit dvojí funkci takového vysílače. První funkcí je zajištění rovnoměrného rozložení optické intenzity pro předpokládané využití této vykryté plochy pro komunikaci viditelným světlem, a zároveň pro osvětlovací účely. Jelikož VLC komunikace je zaměřena primárně do vnitřních prostor, tak bylo nutné zohlednit tuto skutečnost při návrhu dané plochy. Při umístění optického segmentového vysílače v místnosti se uvažuje jeho pozice v rohu, uprostřed a na rozhraní stropu a nosné části místnosti, jak můžeme vidět na obrázku 12.36. Můžeme vidět, že umístění vysílače odpovídá v rohu osminy koule, u umístění uprostřed místnosti je to pak polovina koule a posledním umístěním je rozhraní stropu a nosné části místnosti čemuž odpovídá čtvrt koule. Kulová plocha poté slouží pro dodržení stejných vzdáleností či drah mezi zdrojem a měřenou plochou k dosažení rovnoměrného rozložení světla při hledání a dodržení 3 dB kolísání hustoty optického výkonu po řezu kulové plochy osminy koule. Za tímto účelem byl zhotoven reálný model osminy koule, který vycházel z koule o obvodu 205 cm, čemuž odpovídá poloměr 32,62 cm.

Pro výrobu osminy koule byl použit sklolaminát, který po vytvrzení byl ořezán na požadovanou velikost osminy koule. Poté byl nanesen tmel na osminu koule a po vytvrzení vybroušen do hladké vrstvy. V posledním kroku pak byla osmina koule opatřena



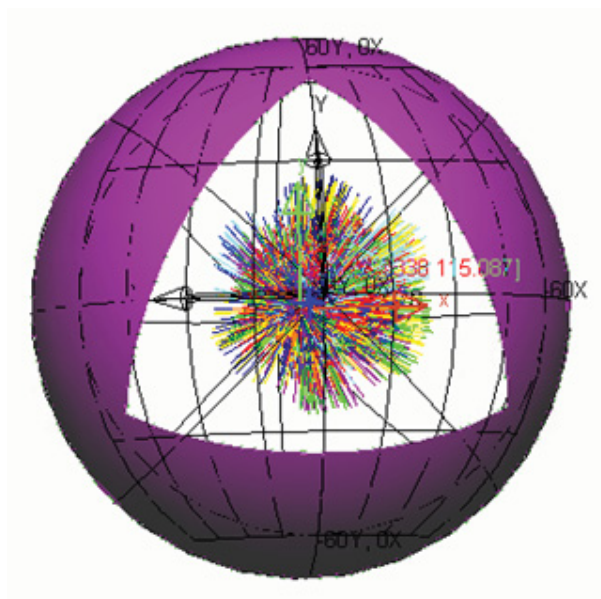
Obr. 12.36: Umístění optického segmentového vysílače v místnosti

bílou matnou barvou. Pro vyhodnocení řezu a určení míry kolísání hustoty optického výkonu na dané osmině kouli bylo nutné zhotovit měřicí body. K tomu účelu byly zhotoveny kružnice o průměru 2 cm se zvětšujícím se krokem 2 cm od středu osminy koule. Na jednotlivých kružnicích pak byly zhotoveny ve vzdálenostech 2 cm průsečíky a do nich byly vyvrtány díry o průměru 0,5 cm. Takto bylo celkem vytvořeno 507 měřících bodů na celé ploše osminy koule. Z vnější strany osminy koule byl zhotoven souřadnicový systém protisměru hodinových ručiček pro budoucí analýzu naměřených dat. Výslednou podobu návrhu plochy pro měření a vyhodnocování rovnoměrnosti a dodržení kritéria 3 dB kolísání hustoty optického výkonu můžeme vidět na obrázku 12.37. Osmina koule je



Obr. 12.37: Model osminy koule simulující plochu rohu místnosti

přípevněna na kloubové rameno (STABILA 14229), kterým lze nastavovat osminu v třech osách a je přípevněna na stativ STABILA 18194. Díky kloubovému rameni jsme schopni natočit osminu koule tak, aby byla vycentrována vůči prototypu segmentového vláknového vysílače, a zároveň za pomoci stativu je možné nastavovat výšku osminy koule v rámci měřené místnosti A.5. V softwarové aplikaci LightTools pro simulace byla využita inverzní funkce osminy koule, která je výřezem z poloviny koule, jak můžeme vidět na obrázku 12.38. Velikost jednotlivých stran osminy koule v rámci simulací byl nastaven na 32,8 cm. Experimentální ověření navržených prototypů optických segmentových vysílačů



Obr. 12.38: Model poloviny koule s výřezem na osminu simulující plochu umístění vysílače v rohu místnosti

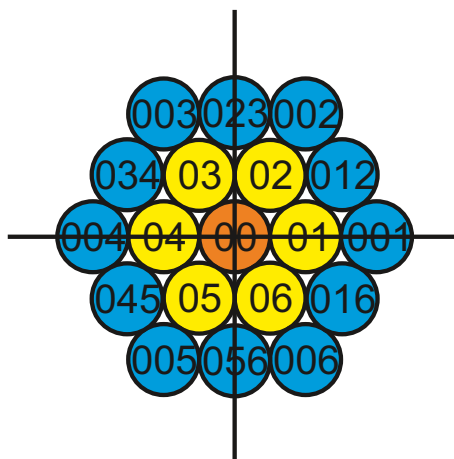
a proměření vystupující optické intenzity v závislosti na umístění vysílače v prostoru ve vybudované temné místnosti o velikostech $2,6 \times 3 \times 2,5$ metry bylo zvoleno kvůli potlačení parazitního (okolního) světla. Pro měření parazitního světla, které přesto vniká do temné místnosti byl použit přístroj PHOTON COUNTER PerkinElmer typ MP 984 RS, který je schopen měřit světelné podmínky v místnosti až na úrovni jednotlivých fotonů. Průměrná hodnota šumu, respektive fotonů vnikajících do temné místnosti byla změřena $CPS_{AVG} = 7,17945$ [fotonů·sekundu⁻¹], chyba měřicího přístroje je $0,715838$ [fotonů·sekundu⁻¹].

13 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ZE SIMULACÍ A REÁLNÉHO MĚŘENÍ PROTOTYPŮ OPTICKÝCH SEGMENTOVÝCH VYSÍLAČŮ

Jak již bylo uvedeno v předchozích kapitolách, tak bylo využito softwarového nástroje LightTools pro provedení simulačních návrhů optického vysílače. V softwarové aplikaci LightTools byl zhotoven návrh vysílače tvořeného 7 či 19 optickými vlákny typu Nufern S105/125-22A. Optická vlákna byla namodelována na základě katalogových parametrů. Toto vlákno disponuje průměrem jádra o velikosti 105 μm a pláště 125 μm s numerickou aperturou $0,220 \pm 0,020$ změřenou při vlnové délce 1064 nm. V první fázi simulace byly použity optická vlákna s rovným zakončením a druhé fázi byly na konce vláken namodelovány čočky, které simulovaly nanesení PDMS, a tím i rozšíření vyzařovacího úhlu z optického vlákna. Parametry pro nastavení simulace PDMS (index lomu, numerická apertura s PDMS) byly naměřeny v rámci experimentálních měření popsanych v kapitolách 12.8, 12.8.5.

Nedílnou součástí při simulacích byla nutnost i změny vychýlení optických vláken pro dosažení rovnoměrnosti rozložení optické intenzity na měřené ploše. Jedním z cílů vychýlení optických vláken je potlačení velikostí intenzitních maxim, které zapříčiňují velké změny intenzity na ploše, a tím i nerovnoměrnost rozložení světla na definované ploše. Druhým cílem vychýlení optických vláken je dosažení zvětšení ozařované plochy za pomocí optických vláken. Z tohoto důvodu bylo třeba najít vhodné úhlové rozložení optických vláken v rámci kruhu, jinými slovy, určit, zda při použití vychýlení mimo osových vláken dojde ke zlepšení rozložení výkonové hustoty na měřené ploše. Za tímto účelem bylo zhotoveno několik variant simulací, ze kterých byla vybrána jedna varianta simulace, která byla použita i v rámci reálného měření.

Jak již bylo uvedeno výše, bylo simulováno několik variant či konfigurací, které mají vždy jeden společný prvek, a to středové vlákno s nulovým vychýlením směřující podél osy z do kladného směru. Od tohoto středového vlákna se vychyluje 6 dalších vláken pod stejným úhlem. Další varianta obsahuje kromě vnitřního kruhu 6 vláken ještě vnější kruh 12 vláken. Těchto 12 vláken má opět stejný úhel vychýlení od středového vlákna, ovšem tento úhel vychýlení 12 vláken ve vnějším kruhu je odlišný od úhlu vychýlení 6 vláken ve vnitřním kruhu. Středové vlákno je označeno červeně, vnitřní kruh žlutě (6 vláken) a vnější kruh modře (12 vláken). Na obrázku 13.1 je zobrazeno uspořádání počátků vláken, nikoliv konců. V rámci vyhodnocení simulovaných vs reálně naměřených dat bylo využito varianty, kdy jsou vlákna umístěny do roviny vůči kulové ploše. Tímto způsobem sice není dodržena jednotnost drah mezi vysílačem a vyhodnocovací plochou, nicméně přístrojové a technologické zázemí nedovolilo zhotovení kulového prototypu segmentového vysílače. Navrhovaný model se skládal z definovaného počtu optických vláken pro segment, plochy pro vyhodnocení splnění podmínky dosažení rovnoměrné distribuce optické intenzity na ploše osminy koule, kdy míra kolísání hustoty optického výkonu nepřesáhne 3 dB či zářivosti.



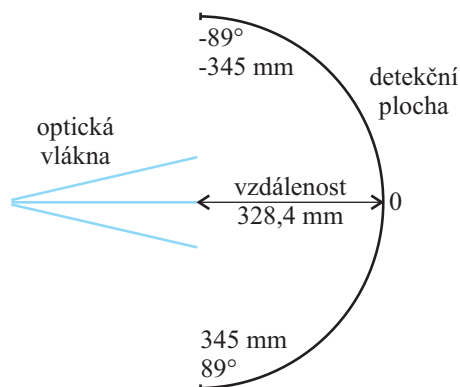
Obr. 13.1: Zobrazení uspořádání počátků vláken v segmentu a jejich označení

Je třeba zmínit, že vyhodnocení naměřených i simulovaných dat je v rámci následných grafů realizováno převážně v relativních hodnotách. U vyhodnocení optické intenzity a kolísání výkonové hustoty na osmině koule pro simulační modely bylo převedení absolutních hodnot provedeno tak, že hodnoty optické intenzity ze simulací pro řezy v těžnicích pro rovně zakončená optická vlákna byly převedeny do relativních hodnot. Jelikož je snahou poukázat na fakt, jak se liší rozložení optické intenzity po řezech těžnic na osmině koule, je nutné hodnoty optické intenzity pro vlákna s umístěním čoček normovat k maximální hodnotě pro příslušnou těžnici t_1 , t_2 , t_3 pro optická vlákna zakončená zalomením do roviny. Tímto způsobem dosáhneme sjednocení relativních úrovní hodnot optické intenzity a můžeme vykreslit příslušné grafy závislostí zobrazené v rámci následujících kapitol. Absolutní hodnoty nejsou vyhodnoceny, jelikož jejich nutnost není vyžadována.

Optická vlákna při simulacích byla vystředována vůči měřené ploše a vzdálenost mezi konci optických vláken a definovanou plochou odpovídala 32,8 cm, což je poloměr osminy 13.2 a pro reálné měření byla vzdálenost definována na 34 cm z důvodu nepřesnosti při výrobě komponent. Při reálném měření bylo vystředování segmentu s vlákny řešeno za pomoci laserového zdroje záření vyzařujícího skrze středový bod na reálné osmině koule, který označoval středové vlákno na prototypu segmentu optického vysílače A.4.

Pro simulaci bylo využito 25 miliónů paprsků a na měřené či detekční ploše 13.2 bylo použito rozlišení 69×69 při vyhodnocování optické intenzity a pro zobrazení zářivosti bylo na ploše změněno rozlišení na 89×89 . Prostorové omezení pro osu X_{min} na hodnotu -345 mm a X_{max} na 345 mm respektive pro Y_{min} -345 mm a Y_{max} 345 mm. U úhlového omezení plochy pro měření bylo při simulacích nastaveno pro horizontální prostor H_{min} -89° a H_{max} 89° a pro vertikální V_{min} -89° , V_{max} 89° . Je třeba zmínit, že v simulacích bylo pro vyhodnocení použito poloviny koule a to z toho důvodu, že bylo sledováno chování navržených typů optických vláknových vysílačů, které ozařovaly plochu i mimo

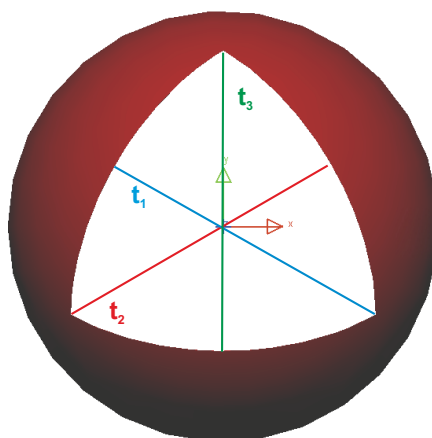
osminu koule, která byla použita při reálném měření. V softwarové aplikaci LightTools



Obr. 13.2: Schéma modelu simulace optického segmentového vysílače vůči detekční ploše poloviny koule pro vyhodnocení simulovaných dat

jsou vyhodnoceny simulovaná data na polovině koule s vložením detektoru osminy koule. Pro vyhodnocení splnění podmínky dosažení rovnoměrné distribuce optické intenzity, kdy míra kolísání hustoty optického výkonu nepřesáhne 3 dB je na plochu poloviny koule vložen detektor definující osminu koule na které jsou pak hodnoty intenzity posuzovány na základě řezů po těžnicích. Simulované hodnoty optické intenzity či zářivosti jsou v softwarové aplikaci transformovány z kulové detekční plochy na rovinu pro matice s hodnotami.

V rámci simulací jsme proto měli možnost sledovat i rozložení optické intenzity či zářivosti z optického vysílače tvořeného 7 či 19 optickými vlákny mimo oblast osminy koule, a proto jsou níže uvedeny i obrázky, které poukazují na to, že simulace, ačkoliv byla nastavená pro optimalizaci ozáření osminy koule, kde byla definována plocha detektoru, tak došlo i k dopadu paprsků, a tím rozložení intenzity či zářivosti i mimo plochu detektoru osminy koule. Pro výsledné efektivní rozložení optické intenzity na definované ploše, lze



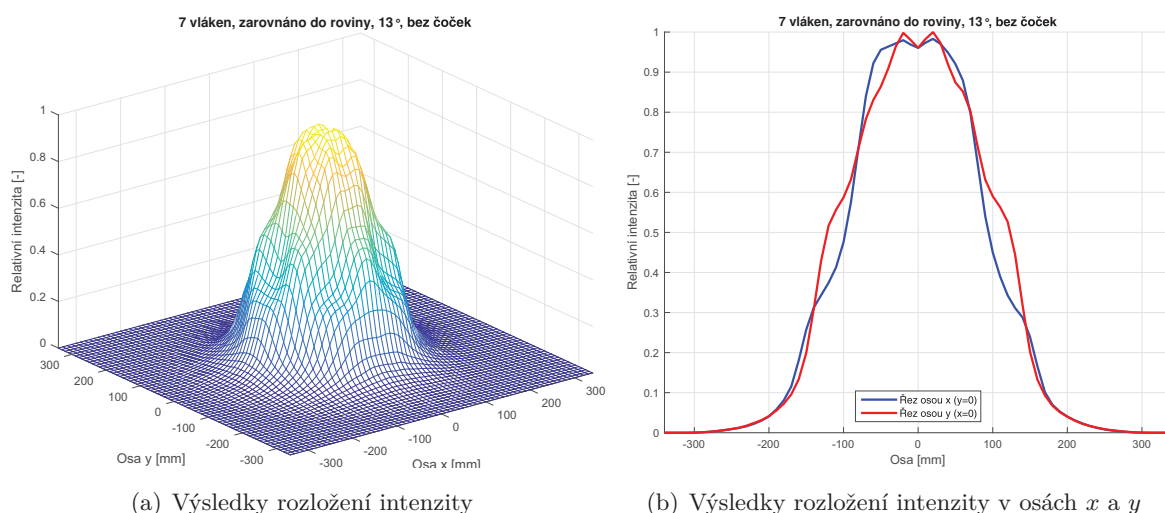
Obr. 13.3: Zobrazení řezů skrze definovanou plochu pro vyhodnocení míry kolísání výkonové hustoty

stanovit za pomoci řezů přes osminu koule. Jedná se o těžnice t_1 , t_2 a t_3 . Jejich směr je zaznamenán na obrázku 13.3 spolu s označením. Jednotlivé řezy těžnice jsou vyhodnocovány za pomoci aplikace MATLAB, která z matice simulovaných dat vybírá hodnoty v měřících bodech, které odpovídají rozměrům a umístění v rámci reálně zhotovené osminy koule.

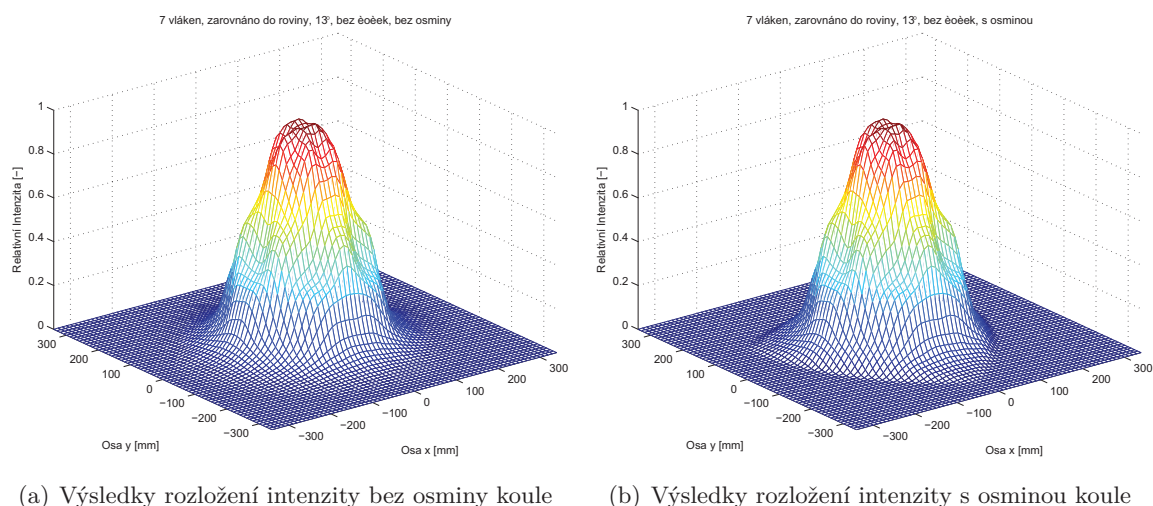
13.1 Výsledky ze simulace návrhu optického segmentového vysílače pro 7 vláken

V rámci simulací v softwarové aplikaci LightTools se ukázalo, že nejrovnoměrnější pokrytí osminy koule může být dosaženo za pomoci jednoho středového vlákna a 6 vláken, pokud bude úhel vychýlení těchto 6 vláken od středového činit 13° . Uvedme, že tato simulace byla zhotovena bez čoček. Pro porovnání chování optických vláken v segmentu byl ponechán stejný úhel i při zhotovení čoček na konce optických vláken. Při simulaci i měřeních pak byli brány v potaz úpravy konců optických vláken bez čoček a s čočkami. Nejdříve jsou vyhodnoceny vlákna bez čoček a pak s čočkami, které jsou vytvořeny za pomoci PDMS.

Pro výsledky ze simulace návrhu optického segmentového vysílače pro 7 vláken bez čoček je byla definována vzdálenost mezi koncem středového vlákna a koncem každého ze 6 vláken na hodnotu 1 cm v rovině, do které jsou vlákna zarovnána. Délka prostředního vlákna 43,3 mm, délka vychýlených vláken 44,5 mm. Tato simulace byla zhotovena při rovném zakončení optických vláken umístěných do roviny. Na obrázku 13.4 můžeme vidět v relativních hodnotách rozložení optické intenzity na detektoru poloviny koule pro 7 vláken bez čoček a k nim příslušné řezy v osách x , $y = 0$ a y , $x = 0$, kdy nejvyšší hodnota odpovídá intenzitě detekované na polovině koule vyzařující z koncům čel optických vláken



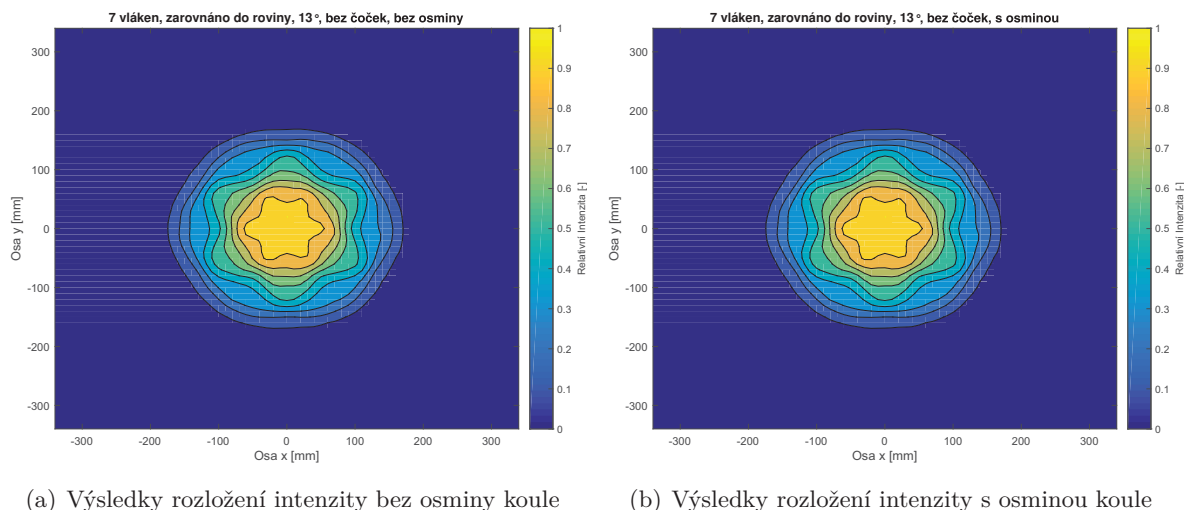
Obr. 13.4: Výsledky ze simulací pro změnu rozložení optické intenzity na detektoru poloviny koule pro 7 vláken bez čoček při zarovnání do roviny



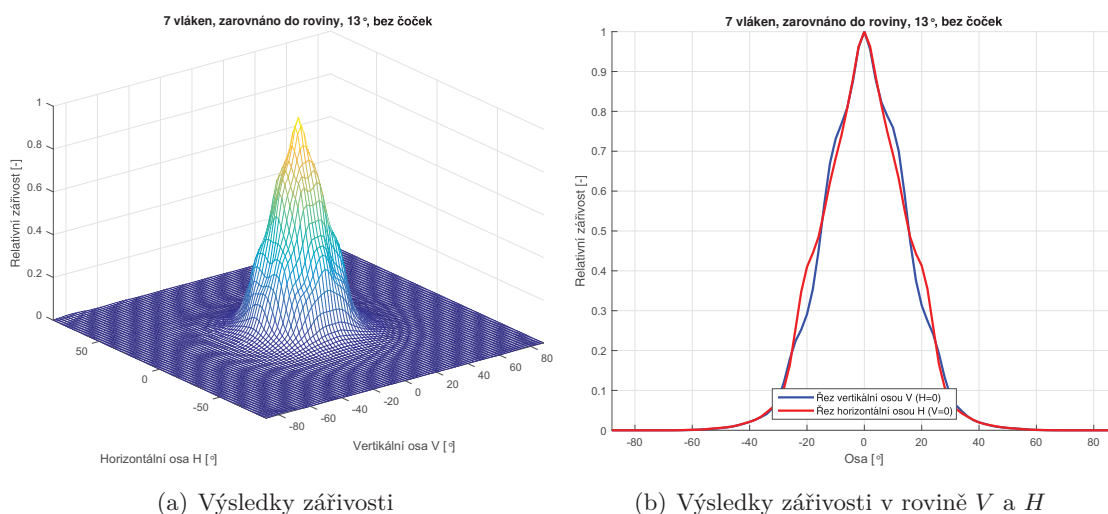
Obr. 13.5: Výsledky ze simulací pro změnu rozložení optické intenzity bez a s vložením detektoru osminy koule pro 7 vláken bez čoček při zarovnání do roviny

v rámci segmentu. Na obrázku 13.4 můžeme pozorovat rozložení optické intenzity na ploše poloviny koule od optického vysílače tvořeného 7 vlákny bez čoček při zarovnání do roviny.

Pro lepší pochopení výsledků získaných ze simulací a zároveň jejich vyhodnocení rozložení optické intenzity mezi segmentem optického vysílače tvořeného 7 optickými vlákny bez čoček a vyhodnocovací či detekční plochou je uveden na obrázku 13.5. Zde je patrné, že pro rozložení optické intenzity v relativních hodnotách na detektoru poloviny koule a s definováním detektoru pro osminu koule dojde k jednoznačnému omezení plochy a tím i omezení výsledků k vyhodnocení. Tato skutečnost má následně rovněž spojitost s dalšími uváděnými obrázky, které vyhodnocují v těžnicích splnění podmínky 3 dB kolísání výkonové hustoty na osmině koule. Jelikož v práci řešíme primárně rozložení relativní optické intenzity na ploše, je vhodné uvést i obrázky, které jsou vztaženy k definované detekční ploše poloviny, respektive osminy koule zachycující rozložení optické intenzity. Na níže uvedených obrázcích pak pozorujeme, že středová oblast dosahuje nejvyšších hodnot relativní optické intenzity pro optický segmentový vysílač tvořený 7 vlákny bez umístění čoček na konce vláken. Jsou uvedeny obrázky bez 13.6(a) a s vložením detektoru osminy koule 13.6(b). Vyhodnocení zářivosti v relativních hodnotách můžeme vidět na obrázku 13.7 níže. Je zde patrné, že nejvyšších hodnot relativní hodnoty optické intenzity na polovině koule je dosaženo od optického vysílače tvořeného 7 optickými vlákny bez čoček při zarovnání do roviny. Dalším krokem byla simulace chování optického vysílače s umístěním čoček, které simulovali nanosení PDMS na konce vláken. Jak již bylo uvedeno výše, tak úhel vychýlení 6 vláken od středového zůstal na původní hodnotě 13° z důvodu porovnání. Rovněž délka prostředního vlákna 43,3 mm a délka vychýlených vláken 44,5 mm je opět stejná i rovinným zakončením. Opět je nejdříve analyzována změna optické intenzity v relativních hodnotách dopadající na plochu detektoru pro polovinu koule, jak

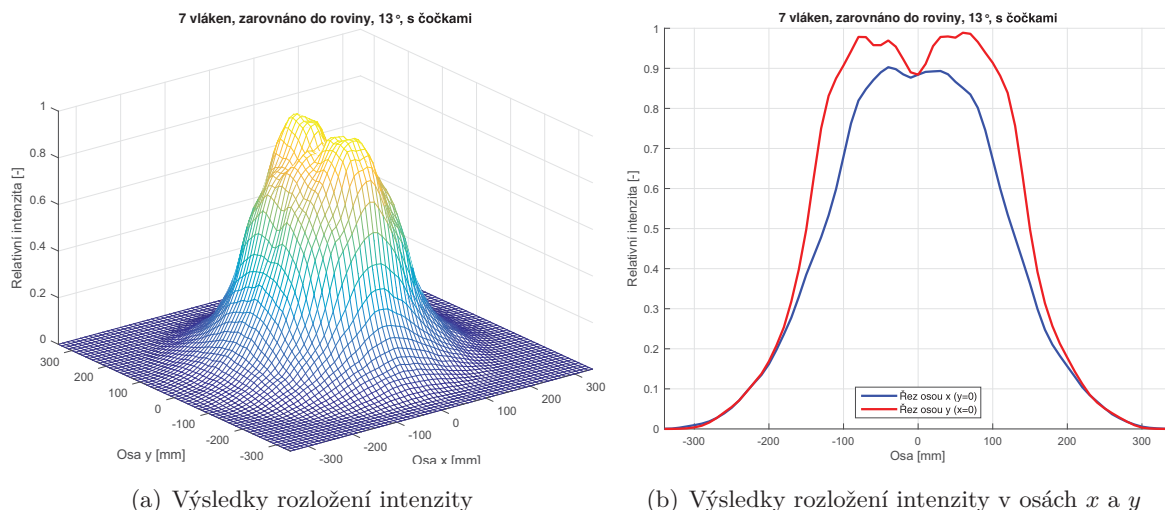


Obr. 13.6: Výsledky ze simulací pro změnu rozložení optické intenzity bez a s vložením detektoru osminy koule pro 7 vláken bez čoček při zarovnání do roviny v řezu

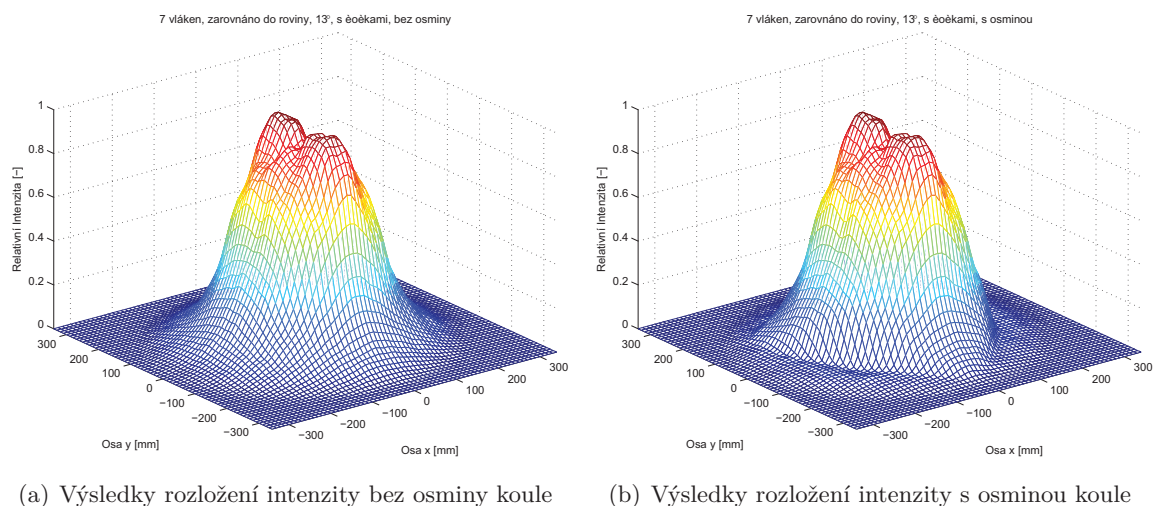


Obr. 13.7: Výsledky ze simulací pro změnu zářivosti pro 7 vláken bez čoček při zarovnání do roviny

můžeme pozorovat na obrázku 13.8 pro 7 vláken s čočkami a k nim příslušné řezy v osách $x, y = 0$ a $y, x = 0$. Nejvyšší hodnota optické intenzity odpovídá maximální intenzitě ve středu poloviny koule, která je vyzařovaná z konců čel optických vláken v segmentu optického vysílače tvořeného 7 optickými vlákny s čočkami při zarovnání do roviny. Rovněž jsou uvedeny výsledky ze simulací rozložení optické intenzity mezi segmentem optického vysílače tvořeného 7 optickými vlákny s čočkami a vyhodnocovací plochou je uvedeno na obrázku 13.9. Zde je patrné, že dochází ke ztrátě části simulovaných výsledků vlivem nastavení velikosti osminy koule pro pozdější vyhodnocení těžnic. Níže jsou uvedeny obrázky, které se zabývají rozložením relativní optické intenzity na definované detekční ploše

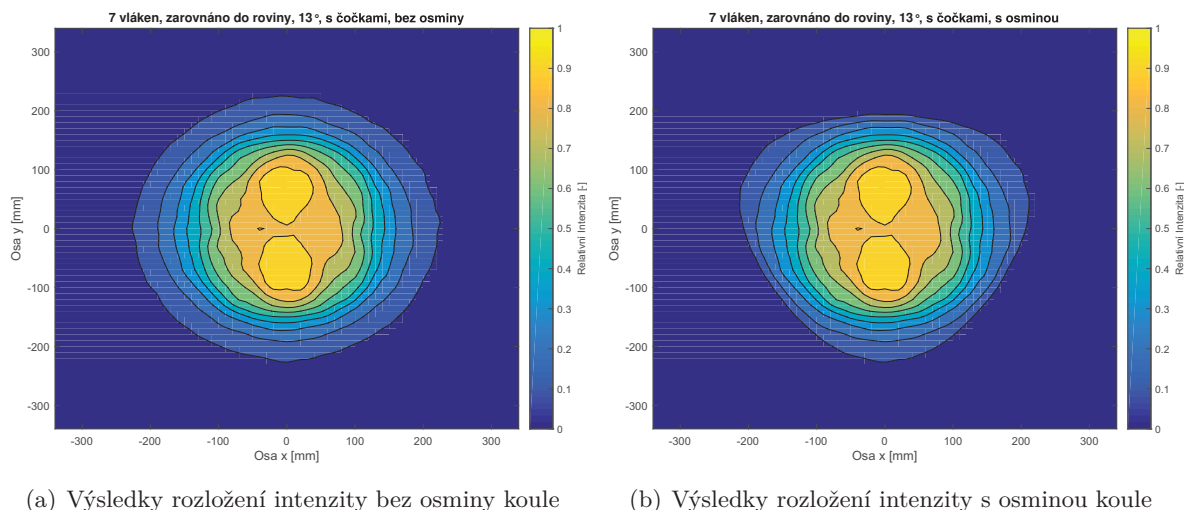


Obr. 13.8: Výsledky ze simulací pro rozložení intenzity na detektoru poloviny koule pro 7 vláken s čočkami při zarovnání do roviny

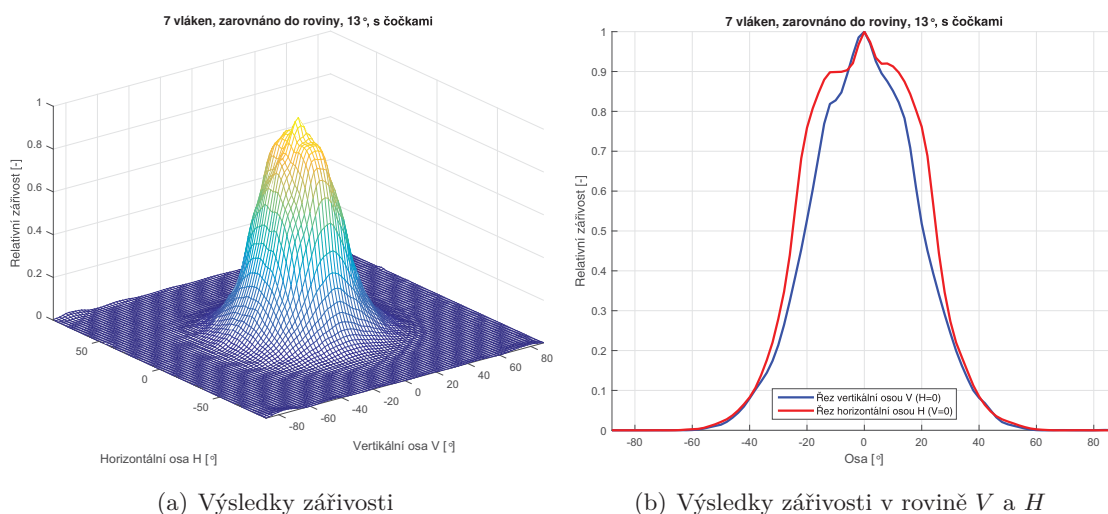


Obr. 13.9: Výsledky ze simulací pro změnu rozložení optické intenzity bez a s vložením detektoru osminy koule pro 7 vláken s čočkami při zarovnání do roviny

poloviny, respektive osminy koule. Na obrázcích pak pozorujeme, že středová oblast dosahuje stále nejvyšších hodnot relativní optické intenzity pro optický segmentový vysílač tvořený 7 vlákny s umístěním čoček na konce vláken, nicméně už se zde projevuje větší redistribuce rozložení optické intenzity na ploše. Ve středu jsou vytvořeny dvě základní intenzitní maxima a vidíme, že optická intenzita vzdalující se od středu klesá. Obrázky bez 13.10(a) a s vložením detektoru osminy koule 13.10(b). Vyhodnocení zářivosti v relativních hodnotách můžeme vidět na obrázku 13.11 níže. Nejvyšší hodnoty zářivosti je dosaženo při středu poloviny koule a postupně se snižuje relativní hodnota zářivosti od středu ke krajům detekční plochy osminy koule. Poté, co byla provedena prvotní analýza



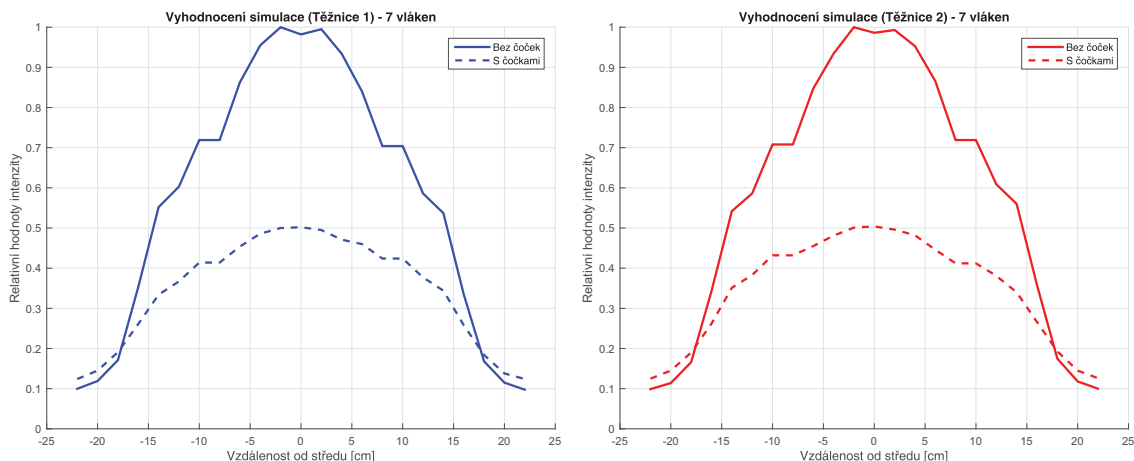
Obr. 13.10: Výsledky ze simulací pro změnu rozložení optické intenzity bez a s vložením detektoru osminy koule pro 7 vláken s čočkami při zarovnání do roviny v řezu



Obr. 13.11: Výsledky ze simulací pro změnu zářivosti pro 7 vláken s čočkami při zarovnání do roviny

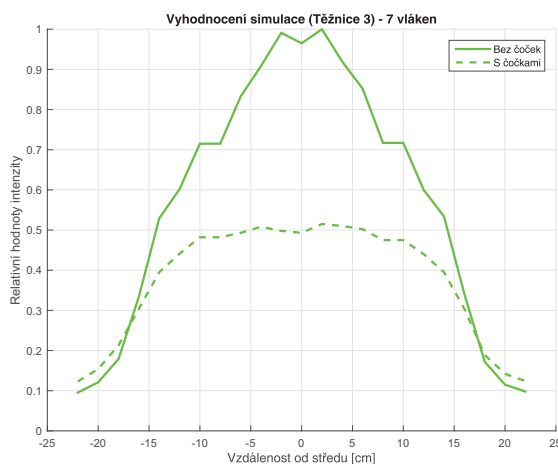
simulovaných dat za pomoci aplikace LightTools a MATLAB v podobě definování rozložení optické intenzity či zářivosti při použití optického segmentového vysílače tvořeného 7 optickými vlákny bez a s čočkami, můžeme přejít k vyhodnocení řezů po těžnicích na definované ploše osminy koule. Na obrázku 13.12 pak můžeme pozorovat rozložení relativních hodnot optické intenzity na ploše detektoru odpovídající osmině koule a řez těžnicemi t_1 , t_2 a t_3 , které jsou pro lepší orientaci zaznačeny na obrázku 13.3. Při těchto těžnicích můžeme pozorovat, že kolísání 3 dB bylo dodrženo, jak pro úpravu konců čel 7 vláken v segmentu bez a s čočkami.

Jak vidíme na obrázku 13.12, tak výsledky ze všech těžnic t_1 , t_2 a t_3 pro 7 vláken bez



(a) Výsledky rozložení intenzity pro těžnici t_1

(b) Výsledky rozložení intenzity pro těžnici t_2



(c) Výsledky rozložení intenzity pro těžnici t_3

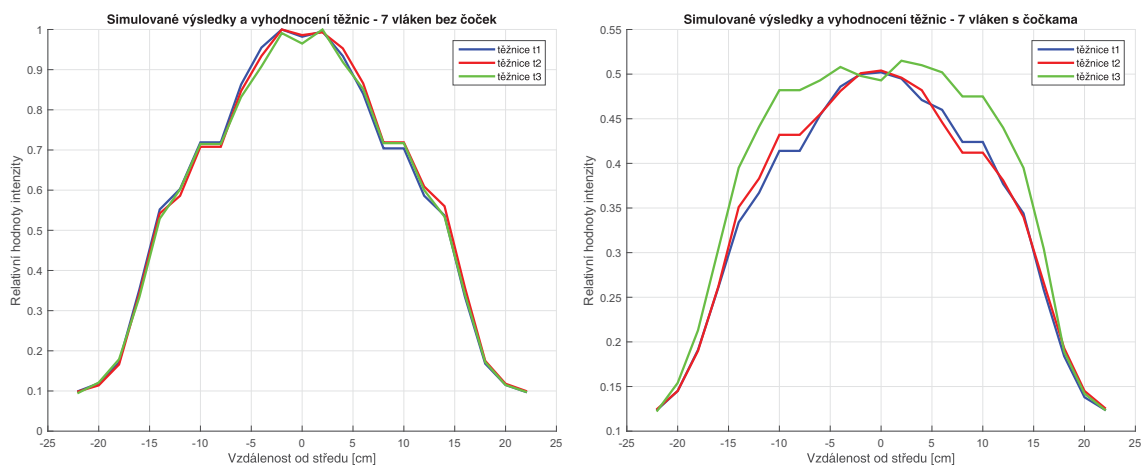
Obr. 13.12: Výsledky ze simulací pro těžnice (t_1 , t_2 a t_3) u 7 vláken bez a s čočkami při zarovnání do roviny

čoček má celkem symetrické rozložení relativních hodnot optické intenzity na definované ploše detektoru pro osminu koule. U rozložení relativních hodnot optické intenzity pro 7 vláken s čočkami dochází k výkonovému poklesu, které je dané tím, že index lomu PDMS je odlišný od indexu lomu optického vlákna používaného v při reálných měřeních. Parametry reálného optického vlákna Nufern s označením S105/125-22A jsou uvedeny v rámci kapitoly 12.6 zabývající se výběrem vhodného typu optického vlákna pro sestavení optického segmentového vysílače. Zde jsou definovány indexy lomu jádra je 1,4561 a pláště 1,4378.

Pro PDMS byla zjištěna hodnota indexu lomu 1,42 z čehož je patrné, že světlo dopadající na kulovou plochu tvořenou PDMS dosahuje zcela jiných hodnot indexu lomu a tudíž i paprsky šířící se jádrem optického vlákna, splňujících podmínky totálního odrazu budou přecházet do prostředí opticky řidšího, což má za následek, že se paprsky lámou

směrem od kolmice. Část mimo-osových paprsků se bude opět lámat a odrážet zpět do vlákna nebo se vyzáří ve velkém úhlu. Rovněž samotný PDMS snižuje výkonovou úroveň procházejícího světelného záření. Nicméně při využití čoček můžeme pozorovat, že došlo k rozšíření ozařované plochy. Zároveň došlo i k vyhlazení rozložení optické intenzity v řezech po těžnicích plochy osminy koule a byla potlačena i dominantní středová část.

Poslední obrázek 13.13 ilustruje řezy po těžnicích bez a s čočkami. Můžeme vidět, že pro segmentový optický vysílač bez čoček jsou těžnice symetrické vůči sobě. V případě segmentového optického vysílače je rovněž symetričnost těžnic dodržena, kromě středové těžnice t_3 , která má trochu jiné rozložení hodnot po řezu.



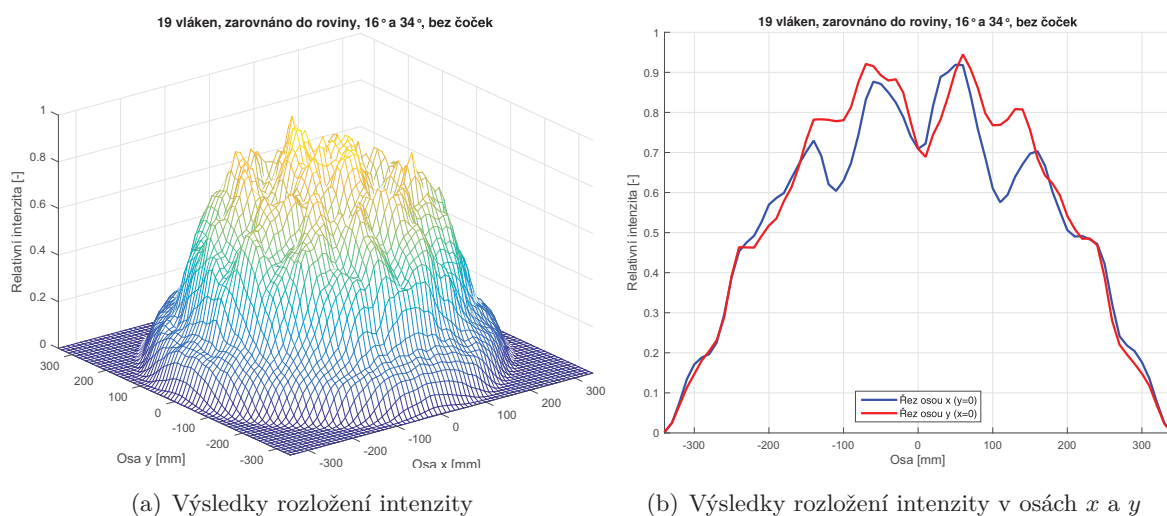
(a) Výsledky rozložení intenzity pro těžnice t_1 , t_2 a t_3 bez umístěných čoček (b) Výsledky rozložení intenzity pro těžnice t_1 , t_2 a t_3 s umístěnými čočkami

Obr. 13.13: Výsledky ze simulací těžnic (t_1 , t_2 a t_3) pro 7 vláken bez a s čočkami při zarovnání do roviny

13.2 Výsledky ze simulace návrhu optického segmentového vysílače pro 19 vláken

V další simulaci bylo zjištěno, že nejrovnoměrnější pokrytí detekční plochy osminy koule na polovině koule může být dosaženo i za pomoci jednoho středového vlákna, 6 vláken ve vnitřním kruhu a 12 vláken ve vnějším kruhu nastane, pokud bude úhel vychýlení vláken ve vnitřním kruhu 16° , a úhel vychýlení vláken ve vnějším kruhu bude 36° . Uvedme, že tato simulace byla opět zhotovena bez čoček. Vzdálenost mezi koncem středového vlákna a koncem každého ze 6 vláken ve vnitřním kruhu je 0,86 cm v rovině, do které jsou vlákna zarovnána. Vzdálenost mezi koncem středového vlákna a koncem každého z 12 vláken ve vnějším kruhu je 2 cm. Je třeba zmínit délku prostředního vlákna, které bylo nastaveno na 29,7 mm, následovalo nastavení 6 vláken ve vnitřním kruhu, které měly délku nastavenou na 30,8 mm a posledních 12 vláken ve vnějším kruhu měly délku 35,8 mm. Pro porovnání chování optických vláken v segmentu byl ponechán stejný úhel i při zhotovení čoček na konce optických vláken pro vnitřní a vnější kruh optických vláken. Při simulaci i měřeních byly brány v potaz úpravy konců optických vláken bez čoček a s čočkami. Nejdříve jsou vyhodnoceny vlákna bez čoček a pak s čočkami, které jsou vytvořeny za pomoci PDMS.

Na obrázku 13.14 pak můžeme vidět v relativních hodnotách rozložení optické intenzity na detektoru poloviny koule pro 19 vláken bez čoček a k nim příslušné řezy v osách x , $y = 0$ a y , $x = 0$, kdy nejvyšší hodnota optické intenzity je ve středu poloviny koule. S narůstající vzdáleností od středu detekční plochy poloviny koule můžeme pozorovat postupné rozložení optické intenzity, které v daleko větší míře vykrývá plochu rovnoměrněji, nežli tomu bylo u segmentového optického vysílače tvořeného 7 optickými vlákny. Rovněž i plocha ozařovaná těmito 19 optickými vlákny je daleko větší. Podrobnější popis rozložení optické intenzity pro definované plochy bude rozebrán v rámci dalších obrázků. Opět se

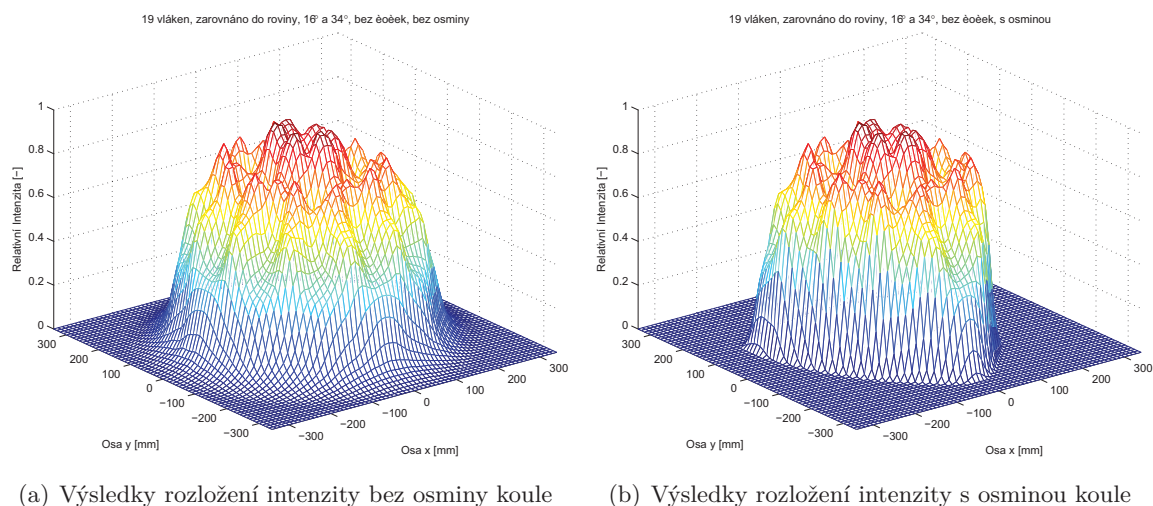


(a) Výsledky rozložení intenzity

(b) Výsledky rozložení intenzity v osách x a y

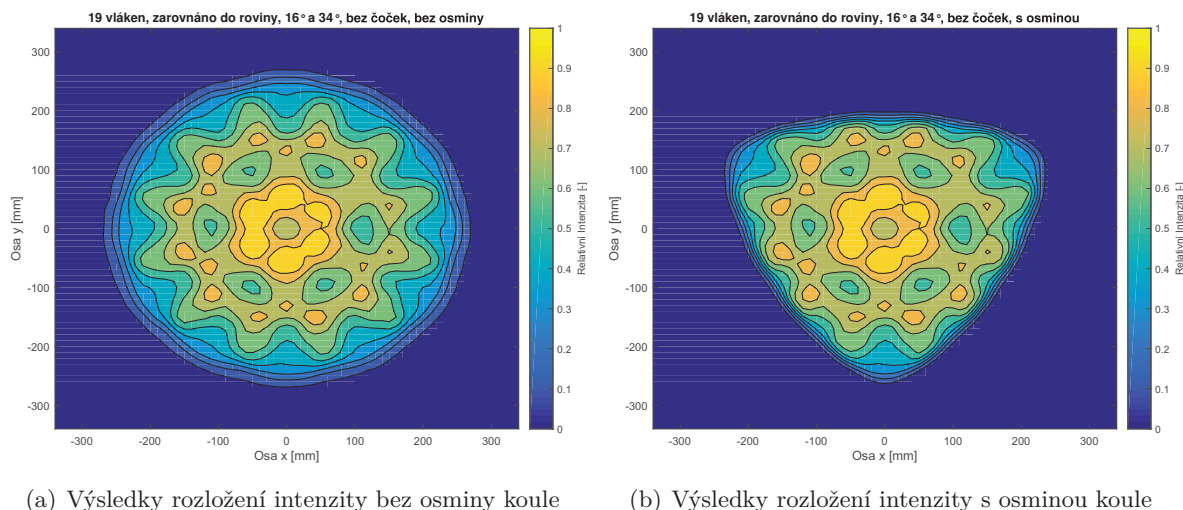
Obr. 13.14: Výsledky ze simulací pro změnu rozložení optické intenzity na detektoru poloviny koule pro 19 vláken bez čoček při zarovnáání do roviny

opakuje situace, kdy je nutné poukázat na to, že pro lepší pochopení simulací a vyhodnocení výsledků rozložení optické intenzity mezi segmentem optického vysílače tvořeného 19 optickými vlákny bez čoček a vyhodnocovací, respektive detekční plochou je použito obrázku 13.15. Zde je patrné, že pro rozložení optické intenzity v relativních hodnotách na detekční ploše poloviny koule při definování detektoru pro osminu koule dojde k jednoznačnému omezení plochy a tím i odebrání části simulovaných výsledků k vyhodnocení. To následně má rovněž spojitost s navazujícími uváděnými obrázky, které vyhodnocují v těžnicích splnění podmínky 3 dB kolísání výkonové hustoty na osmině koule. Níže jsou

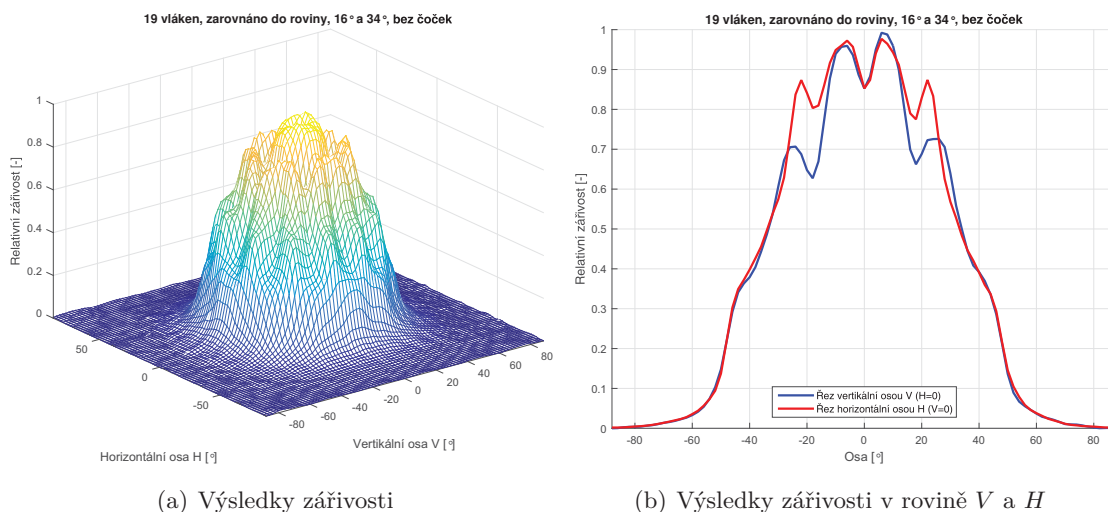


Obr. 13.15: Výsledky ze simulací pro změnu rozložení optické intenzity bez a s vložením detektoru osminy koule pro 19 vláken bez čoček při zarovnání do roviny

uvedeny obrázky, které se opět zabývají rozložením relativní optické intenzity na definované detekční ploše poloviny, respektive osminy koule. Z obrázků je pak patrné, že středová oblast dosahuje stále vyšších hodnot relativní optické intenzity pro optický segmentový vysílač tvořený 19 vlákny bez umístěných čoček na koncích vláken. Středová oblast je tvořena necelým kruhem maximální hodnoty relativní optické intenzity, ale tato oblast není přímo ve středu detekční plochy poloviny či osminy koule. Středové vlákno vykazuje nižší hodnoty relativní optické intenzity, nicméně skládáním zdrojů záření z dalších vláken vede i ke zvýšení optické intenzity od středu detekční plochy poloviny či osminy koule. Obrázky bez 13.16(a) a s vložením detektoru osminy koule 13.16(b). Vyhodnocení zářivosti v relativních hodnotách můžeme vidět na obrázku 13.17 níže. Je zde patrné, že nejvyšších hodnot je opět dosaženo od optického vysílače tvořeného 19 optickými vlákny bez čoček při zarovnání do roviny ve středu detekční plochy osminy koule a se vzrůstající vzdáleností od středu se zvětšuje vyzařovací úhel zářivosti ve stupních. Vidíme zde jemný rozdíl mezi řezy pro V a H rovinu řezu. Stejně jako tomu bylo u předešlého typu optického segmentového vysílače na bázi 7 optických vláken, tak i zde byl následným krokem simulace chování optického vysílače tvořeného 19 optickými vlákny s umístěním čoček,

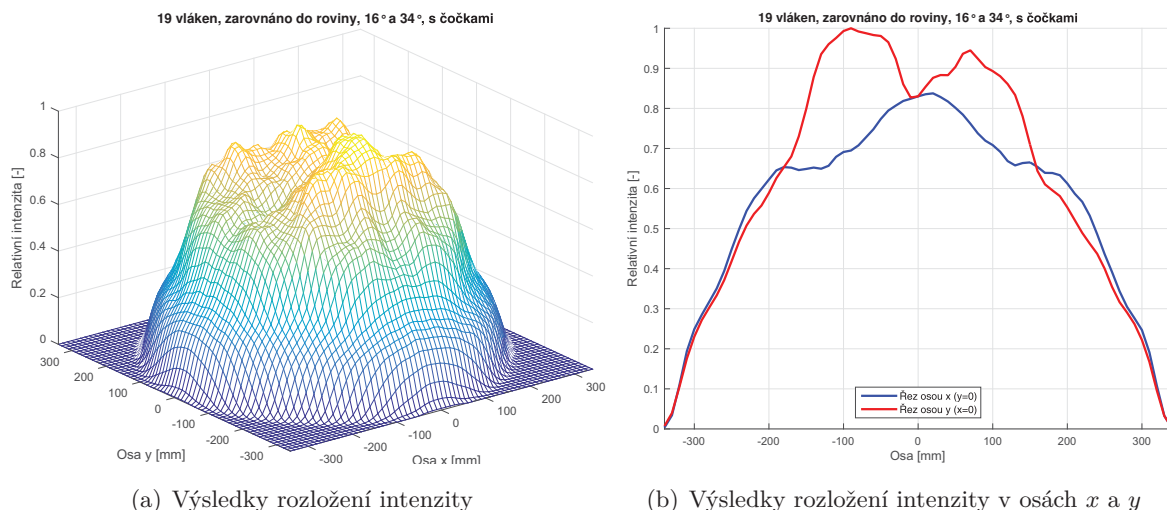


Obr. 13.16: Výsledky ze simulací pro změnu rozložení optické intenzity bez a s vložením detektoru osminy koule pro 19 vláken bez čoček při zarovnání do roviny v řezu



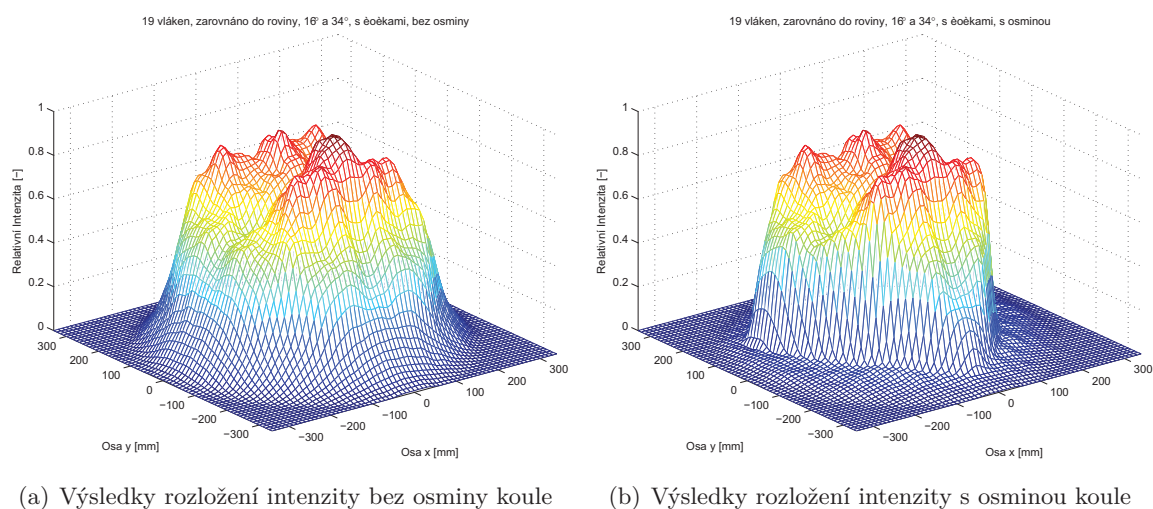
Obr. 13.17: Výsledky ze simulací pro změnu zářivosti pro 19 vláken bez čoček při zarovnání do roviny

které simulovali nanesení PDMS na konce vláken. Jak bylo uvedeno výše, tak úhel vnitřní kružnice tvořené 6 optickými vlákny od středového zůstali na původní hodnotě činící 16° a vnější kružnice tvořená 12 optickými vlákny měla úhel vychýlení vláken od středového o velikosti 36°. To vše bylo opět nutné z důvodu porovnání výsledků získaných pro rovné zakončení optických vláken vůči vláknům s čočkami. Délka prostředního vlákna je 29,7 mm, délka vláken ve vnitřním kruhu je 30,8 mm, délka vláken ve vnějším kruhu je 35,8 mm opět platí, že hodnoty jsou stejné pro rovné zakončení konců optických vláken, tj. bez čoček. Opět je nejdříve analyzována změna optické intenzity v relativních hodnotách dopadající na plochu detektoru pro polovinu koule, jak můžeme pozorovat na obrázku 13.18

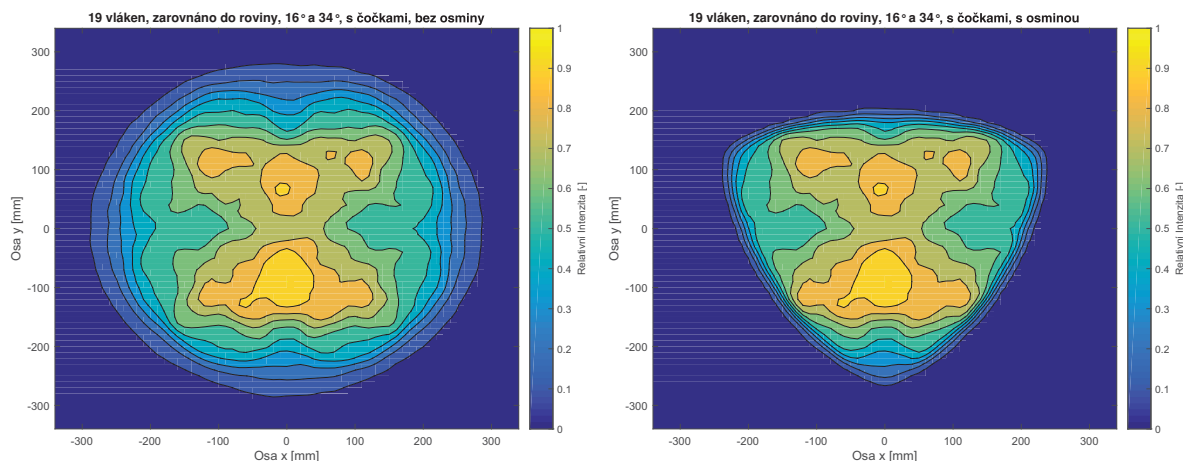


Obr. 13.18: Výsledky ze simulací pro rozložení intenzity na detektoru poloviny koule pro 19 vláken s čočkami při zarovnání do roviny

pro 19 vláken s čočkami a k nim příslušné řezy v osách x , $y = 0$ a y , $x = 0$. Nejvyšší hodnota optické intenzity odpovídá simulované hodnotě optické intenzity ve středu poloviny koule, kde se vzrůstající se vzdáleností od středu klesá rozložení optické intenzity na ploše poloviny koule. Rovněž jsou uvedeny výsledky ze simulací rozložení optické intenzity mezi segmentem optického vysílače tvořeného 19 optickými vlákny s čočkami a vyhodnocovací plochou je uvedeno na obrázku 13.19. Zde je patrné, že dochází ke ztrátě části simulovaných výsledků na detekční ploše poloviny koule vlivem nastavení velikosti detektoru osminy koule pro pozdější vyhodnocení těžnic. Níže jsou uvedeny obrázky, které mají umožnit hlubšímu porozumění rozložení relativní optické intenzity na definované detekční



Obr. 13.19: Výsledky ze simulací pro změnu rozložení optické intenzity bez a s vložením detektoru osminy koule pro 19 vláken s čočkami při zarovnání do roviny



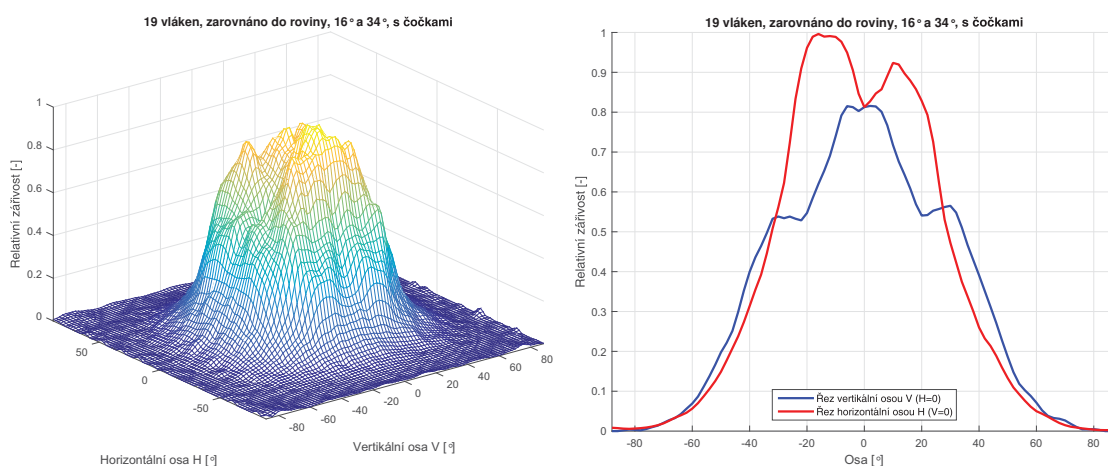
(a) Výsledky rozložení intenzity bez osminy koule

(b) Výsledky rozložení intenzity s osminou koule

Obr. 13.20: Výsledky ze simulací pro změnu rozložení optické intenzity bez a s vložením detektoru osminy koule pro 19 vláken s čočkami při zarovnání do roviny v řezu

ploše poloviny, respektive osminy koule. Vidíme, že středová oblast plochy už vykazuje nižší hodnoty relativní optické intenzity a maxima relativní optické intenzity se tvoří na částech mimo střed pro optický segmentový vysílač tvořený 19 vlákny s umístěním čoček na koncích vláken. Obrázky bez 13.20(a) a s vložením detektoru osminy koule 13.20(b).

Vyhodnocení zářivosti v relativních hodnotách můžeme vidět na obrázku 13.21 níže. Je zde patrné, že nejvyšších hodnot je opět dosaženo od optického vysílače tvořeného 19 optickými vlákny s čočkami při zarovnání do roviny ve středu detekční plochy osminy koule a se vzrůstající vzdáleností od středu se zvětšuje vyzařovací úhel zářivost ve stupních. Rozdílnost mezi rovinami V , H je zajímavá a souvisí s vychýlením jednotlivých

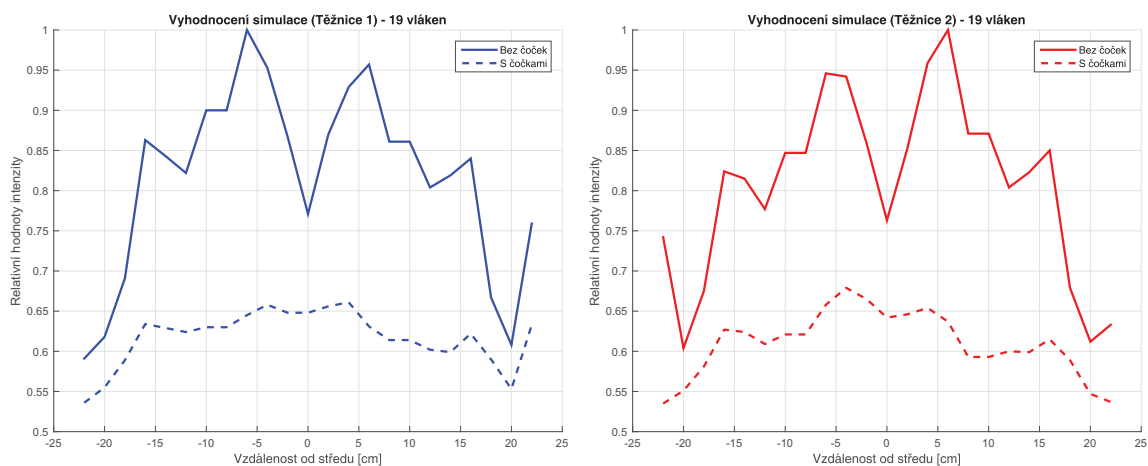


(a) Výsledky zářivosti

(b) Výsledky zářivosti v rovině V a H

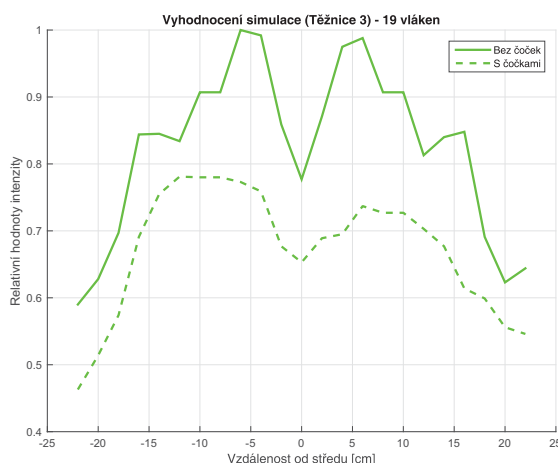
Obr. 13.21: Výsledky ze simulací pro změnu zářivosti pro 7 vláken s čočkami při zarovnání do roviny

vláken ve vnitřním, a vnějším kruhu a tím dochází i ke změnám vyzařování světelného záření z konců optických vláken, kde jsou umístěny čočky. Navíc jednotlivé paprsky se šíří různě v rámci optického vlákna a vychýlením se ještě více mění podmínky pro šíření těchto paprsků skrze jednotlivá optická vlákna. Tím, že je ještě navíc na koncích optických vláken umístěna čočka, tak dochází ke změnám vyzařovacích úhlů z jednotlivých optických vláken. To vše vede v konečném důsledku i ke změně velikosti světelné stopy na detekční ploše poloviny koule. Poté, co byla provedena prvotní analýza simulovaných dat za pomoci aplikací LightTools a MATLAB v podobě definování rozložení optické intenzity či zářivosti při použití optického segmentového vysílače tvořeného 19 optickými vlákny bez a s čočkami, můžeme přejít k vyhodnocení řezů po těžnicích na definované ploše osminy koule. Na obrázku 13.22 pozorujeme rozložení relativních hodnot optické intenzity na ploše detektoru odpovídající osmině koule a řez těžnicemi t_1 , t_2 a t_3 , které jsou pro lepší orientaci zaznačeny na obrázku 13.3. Jak vidíme na obrázku 13.22, tak výsledky ze



(a) Výsledky rozložení intenzity pro těžnici t_1

(b) Výsledky rozložení intenzity pro těžnici t_2

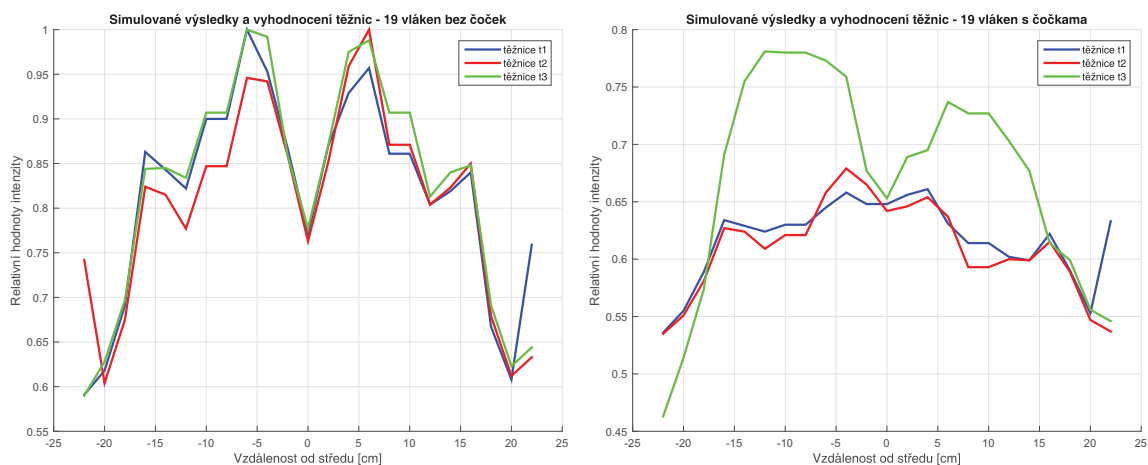


(c) Výsledky rozložení intenzity pro těžnici t_3

Obr. 13.22: Výsledky ze simulací pro těžnice (t_1 , t_2 a t_3) u 19 vláken bez a s čočkami při zarovnání do roviny

všech těžnic t_1 , t_2 a t_3 pro 19 vláken bez čoček má velice symetrické rozložení relativních hodnot optické intenzity na definované ploše detektoru pro osminu koule. Při těchto těžnicích můžeme pozorovat, že kolísání 3 dB bylo dodrženo, jak pro úpravu konců čel 19 vláken v segmentu bez a s čočkami. To, co však stojí za zmínku je chování středového vlákna, které vykazuje nižší hodnotu intenzity nežli je tomu u vláken v kruzích pro 19 vláken bez čoček. V tomto případě, lze těžko předjímat, kde může být chyba. Respektive to může být dáno tím, že středové vlákno vyzařuje primárně pouze svůj světelný kruh na středovou část osminy koule, nicméně vlákna ve vnitřním a vnějším kruhu vyzařují ve větším počtu navzájem. Skládání optických výkonů jednotlivých zdrojů v tomto případě zářeními z konců optických vláken vede ke zvýšení optické intenzity na měřené ploše. U rozložení relativních hodnot optické intenzity pro 19 vláken s čočkami opět dochází k výkonovému poklesu, které je dáno výše uvedenými parametry tohoto silikonového kaučuku naneseného na konce optických vláken.

Jednoznačně se však ukázalo, že s aplikací PDMS na konce optických vláken došlo k vyhlazení vyzařovací křivky a byly potlačeny výkyvy pro rovné ukončení optických vláken. Jediný rozdíl se zdá být pouze u středové těžnice t_3 , která vykazuje vyšší hodnoty relativní intenzity oproti těžnicím t_1 a t_2 . Poslední obrázek 13.23 pak ilustruje řezy po těžnicích bez a s čočkami pro všechny těžnice t_1 , t_2 a t_3 do jednoho grafu. Můžeme vidět, že pro segmentový optický vysílač bez čoček jsou těžnice symetrické vůči sobě, až na malé odchylky. V případě segmentového optického vysílače je rovněž symetričnost těžnic dodržena. Popis výsledků pro těžnice, kdy byly umístěny na konce vláken čočky pro jednotlivá vlákna je shrnut předcházejícím odstavci.



(a) Výsledky rozložení intenzity pro těžnice t_1 , t_2 a t_3 bez umístěných čoček (b) Výsledky rozložení intenzity pro těžnice t_1 , t_2 a t_3 s umístěnými čočkami

Obr. 13.23: Výsledky ze simulací těžnic (t_1 , t_2 a t_3) pro 19 vláken bez a s čočkami při zarovnání do roviny

13.3 Dílčí závěr z výsledků ze simulace návrhu optického segmentového vysílače pro 7 a 19 vláken

Ze simulací pro 7 nebo 19 vláken v segmentu optického vysílače bylo zjištěno, že pro 7 vláken v simulacích dochází sice k dodržení podmínky kolísání 3 dB výkonové hustoty po řezu v rámci těžnic t_1 , t_2 a t_3 , po optimalizaci v softwarové aplikaci bylo dosaženo ozáření téměř celé osminy koule umístěné na detekční ploše poloviny koule. Při simulaci optického vysílače pro 7 vláken bez čoček vidíme, že dominantní maximum se vytvořilo ve středu osminy a od středu k rohům detektoru plochy osminy koule klesá optická intenzita či zářivost, která byla rovněž vyhodnocena. To, co však stojí za povšimnutí je chování stejného typu vysílače poté, co byly na konce optických vláken umístěny čočky (PDMS). Došlo k výraznému snížení výkonu (až k 50%) respektive intenzity až o 3 dB, nicméně byla dodržena podmínka kolísání výkonové hustoty po řezu a navíc došlo k vyhlazení křivek po všech řezech těžnic (t_1 , t_2 a t_3) na detektoru osminy koule. Jednotlivé řezy po těžnicích jsou téměř symetrické, což zaručuje rovnoměrné rozložení optické intenzity na detektoru osminy koule. Co však je nutné podotknout je ten fakt, že koncové body již nesplní podmínku 3 dB kolísání výkonové hustoty zcela a to z toho důvodu, že bylo použito rovného zakončení vláken a nikoliv do kulové plochy, která by lépe kopírovala kulovou plochu detektoru osminy koule.

Ze simulace pro 19 vláken bez čoček v rámci optického vysílače v segmentu bylo zjištěno, že došlo k zajímavému poklesu ve středu detektoru osminy koule umístěné do detekční plochy poloviny koule, což může být zapříčiněno velkým množstvím neznámých. Jedna z nich může být daná tím, že detektor osminy koule je ozařován primárně středovým vláknem a vlákna ve vnitřním či vnějším kruhu jsou hodně vychýlená. Z tohoto důvodu nedochází k tak významnému skládání optických výkonů jednotlivých zdrojů, v tomto případě zářeními z konců optických vláken v rámci segmentu optického vysílače. Ale po umístění čoček na konce optických vláken pro optický segmentový vysílač tvořený 19 vlákny došlo k výraznému vyhlazení řezu křivky po těžnici t_1 , t_2 , nicméně u těžnice t_3 došlo k jemnému zvýšení výkonové úrovně. Zároveň je třeba zmínit, že jak pro 7 či 19 vláken při umístění čoček došlo k ozáření plochy větší nežli byla samotná osmina, z toho důvodu bylo při simulacích plocha pro vyhodnocení nastavená na polovinu koule s výřezem pro detektor osminy koule pro vyhodnocení těžnic vůči reálnému měření.

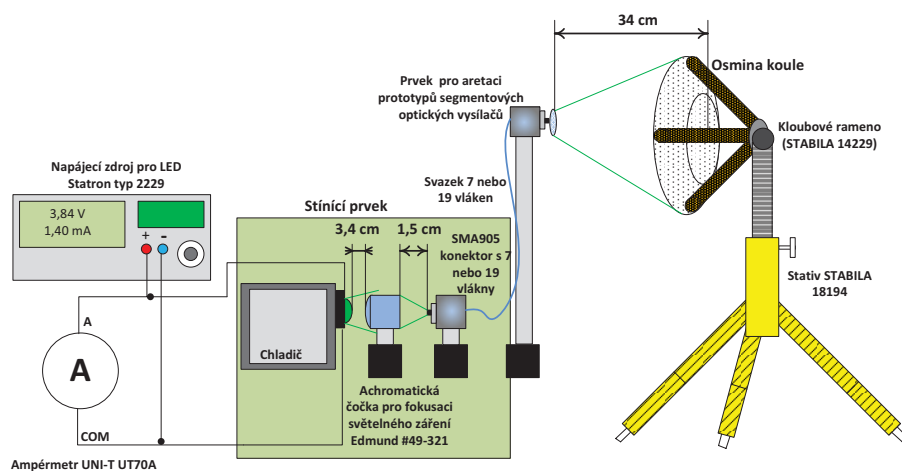
Závěrem k simulacím lze konstatovat, že byl nalezen způsob jak zhotovit a nasimulovat segment optického vysílače tvořeného 7 či 19 optickými vlákny typu Nufern S105/125-22A, které měly za úkol rovnoměrně ozářit detektor osminy koule, která v tomto případě měla simulovat měřicí a vyhodnocovací plochu. V jednotlivých těžnicích t_1 , t_2 až t_3 byly zhotoveny grafy demonstrující dodržení 3 dB kolísání výkonové úrovně. Na základě simulací jsou zhotoveny reálné prototypy optických vysílačů.

13.4 Výsledky z reálného měření návrhu optického segmentového vysílače pro 7 a 19 vláken

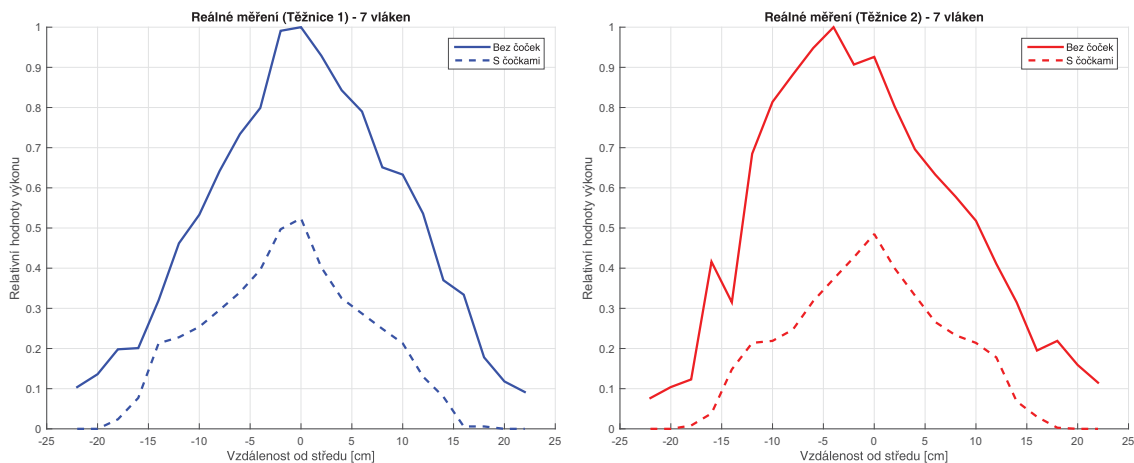
Tato kapitola popisuje výsledky z měření s prototypy optických segmentových vysílačů na bázi optických vláken, a to pro 7 či 19 vláken s a nebo bez čoček. Při výrobě se vycházelo ze simulací, které nám měly napovědět, jak zvolit optimální úhly vychýlení pro optická vlákna v rámci vnitřního či vnějšího kruhu pro rovnoměrnou distribuci optické intenzity na ploše osminy koule. Mějme na paměti, že stále zůstává středové vlákno v ose bez vychýlení a kolem tohoto středového vlákna v kruzích dochází k vychylování dalších vláken v definovaných vzdálenostech od středového vlákna, dle simulace. Na obrázku 13.24, níže můžeme vidět schématické rozložení komponent při reálném měření. Jsou zde značeny i vzdálenosti mezi jednotlivými komponentami, tak jak bylo popsáno v rámci předcházejících kapitol. Při proměřování prototypů optických segmentových vysílačů na bázi optických vláken, a to pro 7 či 19 vláken, byla zvolena vzdálenost mezi konci optických vláken a středovou plochou osminy koule na 34 cm. Pro potlačení záření emitovaného LED zdrojem do prostoru temné místnosti byl použit stínící prvek, ve kterém byla celá aparatura bez prvku pro aretaci pro prototypy optických segmentových vysílačů schována.

K proměřování rozložení optického výkonu na osmině koule v definovaných bodech o průměru 0,5 cm byl použit měřič výkonu PM100D [155] a k němu fotodetektor S120VC [156] s velikostí detekční plochy o průměru 9,5 mm od dodavatele Thorlabs. V jednotlivých bodech na osmině koule byly měřeny hodnoty výkonu a zapisovány do matice odpovídající souřadnicovému systému na osmině koule. Pro vyhodnocení řezů přes těžnice t_1 , t_2 a t_3 byla zhotovena v MATLABu aplikace, která vybírá hodnoty z matice rozložení výkonu odpovídající bodům po těžnici na osmině koule. Obrázek z reálného měření v temné místnosti můžeme vidět v příloze A.5.

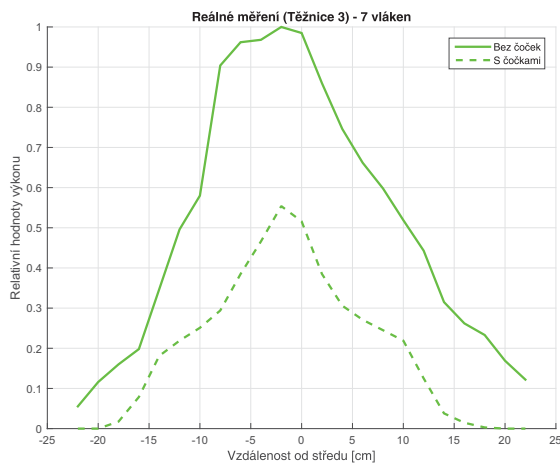
Prvním kroku byl proměřován prototyp optického segmentového vysílače se 7 optic-



Obr. 13.24: Schématický obrázek při měření s prototypy optických segmentových vysílačů



(a) Výsledky rozložení optického výkonu pro těžnici t_1 (b) Výsledky rozložení optického výkonu pro těžnici t_2



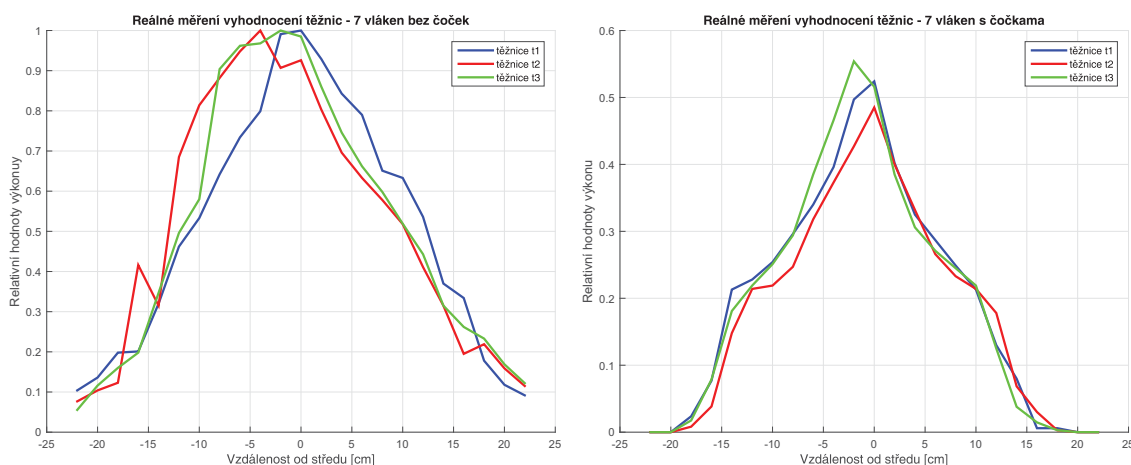
(c) Výsledky rozložení optického výkonu pro těžnici t_3

Obr. 13.25: Výsledky z reálného měření rozložení optického výkonu pro těžnice (t_1 , t_2 a t_3) pro 7 vláken bez a s čočkami při zarovnání do roviny

kými vlákny s rovným zakončením či čočkami. V příloze A.6 můžeme vidět boční pohled. Pro tyto prototypy bylo zvoleno uspořádání do kruhu, kdy vnější kružnice s 6 optickými vlákny měla poloměr 2 cm a vychýlení vláken bylo vůči středovému o velikosti 13° . Jak vidíme, byly kompletně převzaty parametry ze simulace. V příloze můžeme vidět fotografii z reálného měření pro prototyp tvořený 7 optickými vlákny s rovným zakončením A.7 optických vláken a s umístěním čoček A.8 na konce optických vláken. Na obrázcích 13.25(a), 13.25(b), 13.25(c) pak můžeme vidět rozložení relativních hodnot výkonu po osmině koule pro řezy, dle definovaných těžnic t_1 , t_2 a t_3 pro reálné měření při měření prototypu se 7 optickými vlákny. První obrázek 13.25(a) reprezentuje vyhodnocení reálně naměřených hodnot výkonu převedených do relativních hodnot pro těžnici t_1 u prototypu se 7 optickými vlákny bez a s umístěním čoček na konce optických vláken.

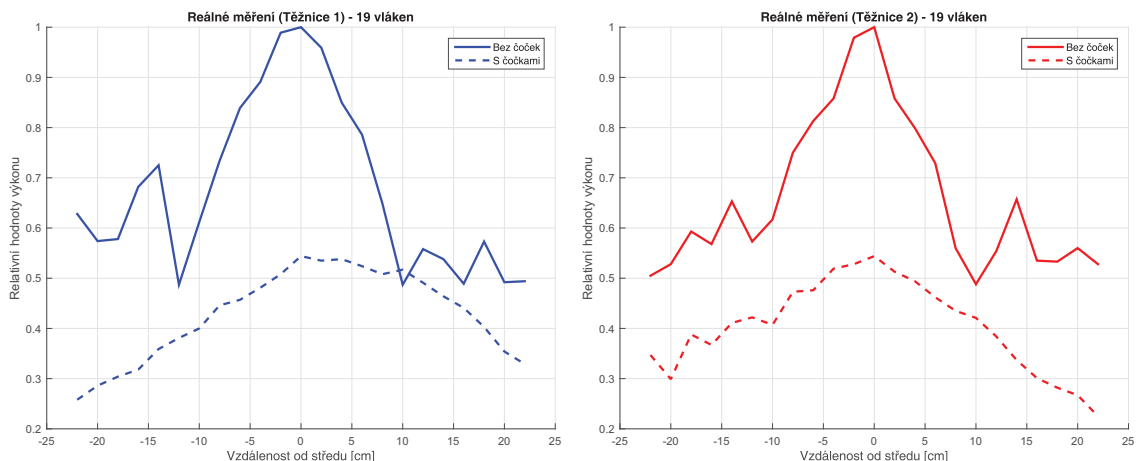
Jak vidíme, tak z reálně naměřených dat je patrné, že dominantní výkonové centrum se nachází uprostřed osminy koule a se vzrůstající vzdáleností od středu klesá optický výkon definovaný v relativních hodnotách pro rovně zakončená optická vlákna. U prototypu 7 vláken s umístěním čoček na konce optických vláken došlo opět ke snížení výkonové úrovně, stejně jako tomu je i u simulace, avšak zde je patrný rozdíl v tom, že nedošlo k tak velkému potlačení výkonového maxima ve středu osminy koule. Rovněž splnění podmínky 3 dB kolísání hustoty výkonu bylo splněno na menší ploše nežli je velikost osminy koule. Pro těžnice t_2 viz obrázek 13.25(b) a t_3 viz obrázek 13.25(c) je situace totožná s jemnými změnami.

Shrnující obrázek 13.26 ukazuje rozložení relativních hodnot výkonu v řezech, dle všech těžnic t_1 , t_2 a t_3 pro reálné měření při měření prototypu se 7 optickými vlákny bez 13.26(a) a s čočkami 13.26(b) na osmině koule. Smyslem tohoto obrázku 13.26 je demonstrovat symetričnost těžnic, a tím i dosažení rovnoměrné distribuce optického záření na osmině koule. Jak můžeme vidět na obrázku 13.26, tak řezy v těžnicích se mírně liší v rozložení optického výkonu na osmině kouli, nicméně tyto změny nejsou příliš velké. Nerovnoměrnost relativních hodnot optického výkonu v těžnicích může být způsobena tím, že nanesené čočky nejsou zcela stejné mezi sebou, či uvnitř čoček se mohly vytvořit vzduchové kapsy v podobě bublinek, které nebyly odstraněny ani po dlouhodobém uskladnění siloxanu Sylgard 184 v chladu, a tím došlo k nerovnoměrnému rozptylování či utlumování světelného záření pronikajícího skrze tyto čočky. Další možností je nedodržení přesných velikostí úhlů pro jednotlivá vlákna a jejich umístění do prototypu optického vláknového segmentu tvořeného 7 optickými vlákny. V následujícím kroku byl proměřován optický segmentový vysílač tvořený 19 optickými vlákny v příloze A.9 pak můžeme vidět boční

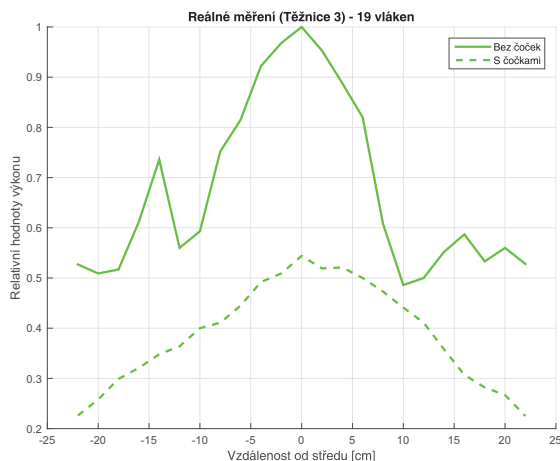


(a) Výsledky rozložení výkonu pro těžnice t_1 , t_2 a t_3 bez umístěných čoček (b) Výsledky rozložení výkonu pro těžnice t_1 , t_2 a t_3 s umístěnými čočkami

Obr. 13.26: Výsledky z reálného měření rozložení optického výkonu pro těžnice (t_1 , t_2 a t_3) pro 7 vláken bez a s čočkami při zarovnání do roviny



(a) Výsledky rozložení optického výkonu pro těžnici t_1 (b) Výsledky rozložení optického výkonu pro těžnici t_2



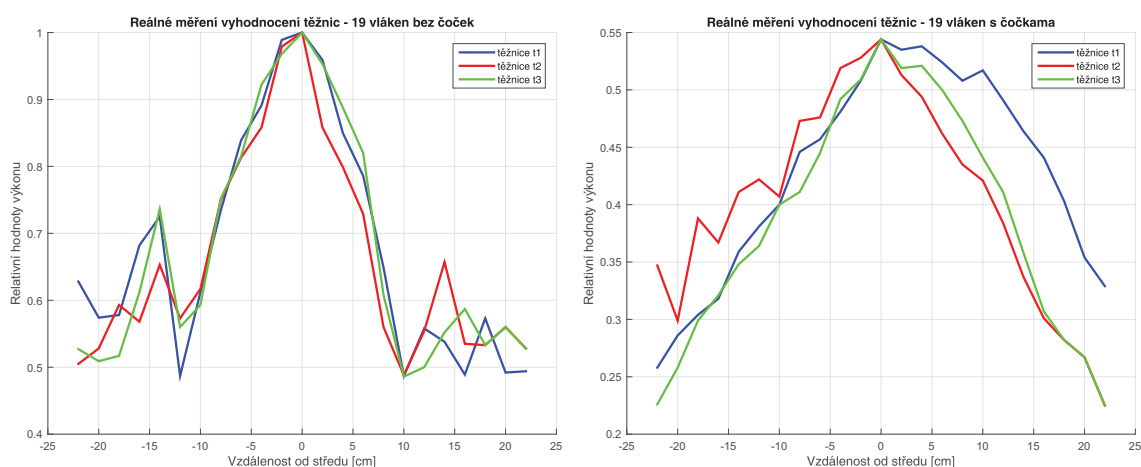
(c) Výsledky rozložení optického výkonu pro těžnici t_3

Obr. 13.27: Výsledky z reálného měření rozložení optického výkonu pro těžnice (t_1 , t_2 a t_3) pro 19 vláken bez a s čočkami při zarovnání do roviny

pohled. Při reálném měření pak bylo středové vlákno a k němu 6 vláken ve vnitřním kruhu a 12 vláken ve vnějším kruhu. Úhel vychýlení vláken ve vnitřním kruhu je 16° , a úhel vychýlení vláken ve vnějším kruhu je 36° . Reálné měření rozložení optického výkonu na ploše osminy koule bylo zhotoveno se stejnými parametry nastavení vychýlení vláken v kruzích při rovném zakončení či umístění čoček na konce optických vláken. V příloze pak můžeme vidět fotografii z reálného měření pro prototyp tvořený 19 optickými vlákny s rovným zakončením A.10 optických vláken a s umístěním čoček A.11 na konce optických vláken. Na obrázcích 13.27(a), 13.27(b), 13.27(c) pak můžeme vidět rozložení relativních hodnot výkonu po osmině koule pro řezy, dle definovaných těžnic t_1 , t_2 a t_3 pro reálné měření při měření prototypu s 19 optickými vlákny. První obrázek 13.27(a) reprezentuje vyhodnocení reálně naměřených hodnot výkonu převedených do relativních hodnot pro

těžnici t_1 u prototypu s 19 optickými vlákny bez a s umístěním čoček na konce optických vláken. Opět můžeme pozorovat z reálně naměřených hodnot rozložení optického výkonu pro segment tvořený 19 optickými vlákny, že dominantní výkonové centrum se nachází uprostřed osminy koule a se vzrůstající vzdáleností od středu klesá optický výkon definovaný v relativních hodnotách pro rovně zakončená optická vlákna. U prototypu 19 vláken s umístěním čoček na konce optických vláken došlo opět ke snížení výkonové úrovně, stejně jako tomu je i u simulace, avšak zde je patrný rozdíl oproti segmentu tvořeného 7 optickými vlákny, kde dochází k potlačení výkonového maxima ve středu osminy koule. Z tohoto pohledu se jeví, že segment obsahující 19 vláken dokáže efektivněji vykrýt plochu osminy koule a zároveň nedochází k tak velkému výkonovým rozdílům maxima uprostřed osminy koule vůči mimo středovým bodům. Splnění podmínky 3 dB kolísání hustoty výkonu bylo dodrženo na celé ploše osminy koule, což je obzvláště důležité. Pro těžnice t_2 viz obrázek 13.27(b) a t_3 viz obrázek 13.27(c) je situace totožná s jemnými změnami.

Shrnující obrázek 13.28 pak ukazuje rozložení relativních hodnot výkonu v řezech, dle všech těžnic t_1 , t_2 a t_3 pro reálné měření při měření prototypu s 19 optickými vlákny bez 13.28(a) a s čočkami 13.28(b) na osmině koule. Jak již bylo uvedeno v předchozím případě prototypu segmentového optického vysílače se 7 optickými vlákny smyslem tohoto obrázku 13.28 je demonstrovat symetričnost těžnic, a tím i dosažení rovnoměrné distribuce optického záření na osmině koule. Jak můžeme vidět na obrázku 13.28, tak řezy v těžnicích se mírně liší v rozložení optického výkonu na osmině kouli, nicméně tyto změny nejsou příliš velké. Možná by se dalo říci, že u těžnice t_1 dochází k jemné odchylce v polovině řezu těžnice procházející středem osminy koule. Ovšem opět jako v předešlém případě platí, že dané nerovnoměrnosti relativních hodnot optického výkonu v těžnicích mohou



(a) Výsledky rozložení výkonu pro těžnice t_1 , t_2 a t_3 bez umístěných čoček (b) Výsledky rozložení výkonu pro těžnice t_1 , t_2 a t_3 s umístěnými čočkami

Obr. 13.28: Výsledky z reálného měření rozložení optického výkonu pro těžnice (t_1 , t_2 a t_3) pro 19 vláken bez a s čočkami při zarovnání do roviny

být způsobeny tím, že nanosené čočky nejsou zcela stejné mezi sebou či uvnitř čoček se mohly vyskytovat vzduchové kapsy v podobě bublinek, které nebyly odstraněny ani po dlouhodobém uskladnění siloxanu Sylgard 184 v chladu, a tím došlo k nerovnoměrnému rozptylování či utlumování světelného záření pronikajícího skrze tyto čočky. Další možností je nedodržení přesných velikostí úhlů pro jednotlivá vlákna a jejich umístění do prototypu optického vláknového segmentu tvořeného 19 optickými vlákny.

13.5 Dílčí závěr z výsledků z reálného měření a návrhu optického segmentového vysílače pro 7 a 19 vláken

V předešlých kapitolách jsme měli možnost se seznámit s reálně naměřenými výsledky pro 7 nebo 19 vláken v segmentu optického vysílače. Bylo proměřeno a vyhodnoceno chování segmentu optického vysílače tvořeného 7 optickými vlákny bez a s umístěním čoček na konce optických vláken. Stejně úpravy konců optických vláken bylo dosaženo u segmentu optického vysílače tvořeného 19 optickými vlákny. Reálná měření vycházela z poznatků získaných ze simulací v softwarové aplikaci LightTools, kde byly zjištěny úhly vychýlení pro vnitřní a vnější kružnici v segmentu optického vysílače. Pro segment tvořený 7 optickými vlákny byl úhel vychýlení 6 optických vláken vůči středovému vláknu 13° a v rovině od středového vlákna byly vlákna vzdáleny 1 cm (průměr 2 cm). Z reálně naměřených hodnot v relativních hodnotách bylo zjištěno, že pro rovné konce optických vláken se dominantní maximum nachází ve středu osminy koule a postupně se vzrůstající vzdáleností od středového bodu na osmině koule klesá optický výkon ku kraji osminy koule.

Pro segment optického vysílače tvořeného 19 optickými vlákny bez a s umístěním čoček na konce optických vláken se vycházelo opět ze simulovaného modelu, kdy vnitřní kružnice měla 6 vláken vychýlených o 16° a vnější kružnice tvořená 12 vlákny měla vychýlení nastaveno na hodnotu 36° vůči středovému vláknu. Vzdálenost optických vychýlených vláken od středového vlákna v rovině byla 0,86 cm (průměr 1,72 cm) a vnější kružnici 2 cm (průměr 4 cm).

Z reálně naměřených výsledků pro 19 vláken v rámci optického vláknového segmentu bylo zjištěno, že výkonové maximum se stále nachází ve středu osminy koule pro zakončení vláken do roviny, nicméně pro měření s umístěním čoček na konce optických vláken došlo k potlačení výkonového maxima, a tím i k vyhlazení křivky. Kromě toho taky bylo docíleno rozšíření vyzařovacího úhlu při aplikaci PDMS na konce optických vláken, kdy byla ozářená plocha více jako je definovaná plocha pro osminu.

Na závěr lze konstatovat, že se podařilo navrhnout, zrealizovat a odměřit prototypy optických segmentových vysílačů na bázi optických vláken tvořenými 7 či 19 optickými vlákny typu Nufern S105/125-22A. Byla dodržena podmínka 3 dB kolísání výkonové hustoty po těžnicích osminy koule, která simulovala měřenou a vyhodnocovací plochu. V případě prototypu optického segmentového vysílače tvořeného 7 optickými vlákny sice

nedošlo ke kompletnímu ozáření celé měřené plochy osminy koule, ale šlo o to, ukázat, zda skládáním takovýchto typů vysílačů do buněk může rovnoměrně pokrýt větší plochu.

14 ZÁVĚR

V této práci bylo zkoumáno, jaké jsou možnosti realizace optického vysílače s optickými vlákny pro budoucí použití v systémech VLC, kdy chceme zajistit dvě funkce a to dostatečné osvětlení plochy a komunikaci. K tomu, abychom mohli sestrojít optický vláknový vysílač, bylo nejdříve nutné prostudovat aktuální stav zkoumané problematiky a porovnat vědecké pokroky s jinými vědeckými týmy v rámci světa. Bylo zjištěno, že většina vědeckých týmů se ubírá cestou využití čoček, kolimátorů, MEMS prvků a další adaptivní optiky, která má za úkol zvětšit vyzařovací úhel vystupující z optického vlákna či vysílače. Tyto metody jsou již odzkoušené a dobře známé, pouze se hledá optimální velikost těchto komponent. Při použití adaptivní optiky jsme pak nuceni vytvářet robustní typy optických vysílačů, což není optimální z pohledu umístění v rámci vnitřních prostor, a zároveň i ceny daného vysílače.

Tato práce hledala jiný inovativní přístup k řešení daného problému a to, jak najít vhodné uspořádání vláken, geometrický obrazec optického segmentu tvořeného optickými vlákny, volbu typu vlákna, počtu vláken, vychýlení vlákna, zakončení vlákna a v neposlední řadě i měření v prostoru. Všechny uvedené parametry musely v konečném důsledku splňovat kritérium efektivního pokrytí části místnosti s rovnoměrným rozložením optické intenzity v prostoru, kdy míra kolísání hustoty optického výkonu nepřesáhne 3 dB.

Prvním krokem při konstrukci vysílače bylo najít vhodný typ zdroje záření, který bude emitovat dostatečný výkon použitelný pro navázání do optického vysílače, a zároveň bude využitelný, jak pro osvětlování, tak i pro komunikaci. Z tohoto pohledu se jevílo vhodné využít polovodičového zdroje záření, které dosahují vysokých výkonů, jsou využívány v rámci systémů VLC a mohou být využity i pro komunikační účely. Na základě těchto informací byla vybrána LED dioda s typovým označením HPA8b-43K5GAx pracující na vlnové délce 525 nm s malým vyzařovacím úhlem činícím 35° . Protože vybraný typ LED zdroje záření má i tak stále velký vyzařovací úhel nežli mají laserové zdroje záření, je nutné koncentrovat maximum emitovaného světelného záření generovaného polovodičovým zdrojem záření do bodu pro snížení výkonových ztrát. Ke koncentraci, respektive fokusaci optického výkonu emitovaného polovodičovou diodou typu HPA8b-43K5GAx do malého světelného bodu je využito čočkového optického elementu v podobě spojné (achromatické plano-konvexní) čočky typu EDMUND OPTICS VIS-NIR Coated, Achromatic Lens #49-321, která je umístěná za zářivý zdroj. Jakmile nám byl znám typ optické soustavy pro fokusaci optického záření, bylo nutné nastudovat problematiku tvarování optických svazků. V práci je pro hlubší analýzu uvedena problematika vazebních podmínek spolu s matematickým definováním pole, které vychází za obecnou čočkou.

Následně bylo nutné hledat optické vlákno, které má své využití ve fotonických komunikacích a bude dosahovat větších průměru jádra i pláště z důvodu efektivní vazby. Je nutné zmínit i ten fakt, že s větší plochou jádra budeme moci ozářit větší plochu v kombinaci se změnou vyzařovacích úhlů. V práci bylo vybráno mnohovidové optické vlákno

od firmy Nufern s typovým označením S105/125-22A. Toto optické vlákno dosahuje velké hodnoty numerické apertury $0,220 \pm 0,020$, změřenou při vlnové délce 1064 nm. Jak již bylo uvedeno výše, v práci byla použita LED dioda emitující světelné záření na vlnové délce 525 nm, proto byla numerická apertura proměřena pro tuto vlnovou délku, o čemž pojednává jedna z kapitol. Po nalezení komponent pro sestavení optického segmentového vysílače bylo nutné přejít k dalšímu bodu práce, a tím je rozvržení optických vláken v rámci segmentu, a také jejich počet. Z tohoto hlediska byla vybrána volba umístění optických vláken do kruhu kvůli symetričnosti. Pro jeden segment optického vysílače bylo využito buď 7 nebo 19 vláken, které byly uspořádány do tvaru "kruhového obrazce". Zároveň díky umístění vláken do kruhu v obrazci poskytuje optimální vazbu na čela optických vláken. Proto je nutné uvažovat nad uchycením jedné ze stran optických vláken pro dosažení maximální vazby, jelikož samotný čočkový element tvořený achromatickou čočkou není dostačující. Z tohoto pohledu bylo využito SMA905 konektoru o velkém průměru ferule, kdy pro segment optického vysílače tvořený 7 optickými vlákny S105/125-22A bylo použito SMA905 konektoru o průměru ferule 410 μm a pro segment s 19 vlákny SMA905 konektoru o průměru ferule 630 μm . Pro uchycení vláken do SMA konektorů daných typů bylo využito technologického vybavení firmy SQS vláknová optika a.s. Vyřešením vazby, a také uchycením vláken na jedné ze stran optických vláken, byla dalším krokem úprava druhých konců optických vláken pro dosažení rovnoměrného rozložení optické intenzity na definované ploše s 3 dB kolísáním výkonové hustoty.

Při řešení hledání úpravy konců optických vláken bylo využito rovného zakončení vláken a pomocí inovativního řešení za pomoci PDMS. PDMS byl použit s typovým označením Sylgard 184 od firmy Dow Corning a v práci je uvedena metodika výroby, nanášení PDMS na konce optických vláken a jeho měření pomocí mikroskopu. Právě využití PDMS je jedním z přínosů této práce, kdy za použití PDMS došlo ke zlepšení v podobě zvětšení vyzařovací charakteristiky optických vláken, respektive numerické apertury oproti rovnému zakončení vláken. V práci je uvedena metodika měření numerické apertury, dle normy IEC 60793-1-43:2015, kdy bylo zhotoveno pracoviště pro měření numerické apertury optických vláken bez a s čočkami zhotovenými díky PDMS. Každé měření bylo provedeno 10 \times . Dále se z naměřených dat provedl statistický průměr. Z průměrných hodnot výkonů byly zhotoveny relativní hodnoty a vykresleny vyzařovací charakteristiky pro optické vlákno s rovným zakončením či s PDMS v MATLABu. Po odečtu 5% z hodnoty relativní úrovně výkonu byly určeny vyzařovací úhly optického vlákna s rovným zakončením a s PDMS (čočkou). Pro rovné zakončení optického vlákna při buzení zářivým zdrojem pracujícím na 525 nm je úhel 17,385° a pro zakončení s PDMS (čočkou) je úhel roven 34,765°. Hodnota numerické apertury s rovným zakončením je 0,298 a s PDMS (čočkou) 0,570. Můžeme tedy konstatovat, že došlo k zvýšení vyzařovacích úhlů či numerické apertury o téměř 100%. Je třeba uvést, že využití PDMS pro úpravu konců vláken zatím není ve vědeckých kruzích příliš využito, spíše se hledá jiné uplatnění tohoto silikonového kaučuku.

Posledním krokem bylo definování měřicí a vyhodnocovací plochy pro vyjádření splnění podmínky efektivního pokrytí části místnosti s rovnoměrným rozložením optické intenzity v prostoru, kdy míra kolísání hustoty optického výkonu nepřesáhne 3 dB. Byla vybrána osmina koule, která odpovídá ploše při rohovém umístění optického vysílače. V kapitole 12.9 je popis výroby reálného modelu osminy koule, který vycházel z koule o obvodu 205 cm, čemuž odpovídá poloměr 32,62 cm. Pro výrobu osminy koule byl použit sklolaminát, který po vytvrzení byl ořezán na požadovanou velikost osminy koule. Pro vyhodnocení řezu a určení míry kolísání hustoty optického výkonu na dané osmině kouli bylo nutné zhotovit měřicí body. K tomu účelu byly zhotoveny kružnice o průměru 2 cm se zvětšujícím se krokem 2 cm od středu osminy koule. Na jednotlivých kružnicích byly zhotoveny ve vzdálenostech 2 cm průsečíky a do nich byly vyvrtány díry o průměru 0,5 cm. Takto bylo celkem vytvořeno 507 měřicích bodů na celé ploše osminy koule. Z vnější strany osminy koule byl zhotoven souřadnicový systém protisměru hodinových ručiček pro budoucí analýzu naměřených dat. Volba kulové plochy má logické důsledky, jelikož pouze kulová plocha nám zaručí stejnou dráhu všech paprsků z optického segmentového vysílače. Vyhodnocení pro dosažení rovnoměrného rozložení optické intenzity na detekční ploše poloviny koule s detektorem na osminu koule s 3 dB kolísáním výkonové hustoty je pak za pomoci těžnic t_1 , t_2 a t_3 , které protínají osminu koule vždy v jejím středu. 3D modely rozložení optické intenzity byly vytvořeny pouze za pomoci simulací pro celkové vyhodnocení a jsou uvedeny v rámci práce.

Jelikož byly nedefinovány všechny komponenty, postupy, jak docílit optimálních vazebních podmínek, tvar obrazce, počet optických vláken, uchycení vláken a úprava konců optických vláken v rámci segmentu tvořeného 7 či 19 vlákny, vyvstala otázka, který z těchto typů segmentového vysílače s úpravou konců optických vláken bude dosahovat lepších parametrů, a jak bude vypadat optický svazek za achromatickou čočkou dopadající na feruli SMA905 konektoru o různých průměrech. K ověření těchto hypotéz bylo využito softwarového nástroje LightTools, který počítá distribuci optického záření v prostoru, a můžeme v něm simulovat všechny námi hledané parametry.

Před samotným zhotovením simulačního modelu optického segmentového vysílače byly proměřeny některé základní komponenty, zvažované pro tvorbu vysílače. Jednalo se o polovodičovou diodu HPA8b-43K5GAXd, která emituje optický výkon 5 W. Naměřené údaje spektrální charakteristiky získané z HPA8b-43K5GAX byly poté importovány do simulovaného modelu v softwarové aplikaci LightTools. Cílem prvotní simulace bylo zhotovit model pro optimalizaci vazebních podmínek a změnu tvaru optického svazku za achromatickou čočkou vstupující na čelo SMA905 konektoru. Zároveň je nutné provést analýzu, zda svazek dopadající na čelo SMA konektoru má uniformní rozdělení výkonu čemuž odpovídá nejlépe Top-Hat svazek či dochází ke kolísání výkonové úrovně, což vede k různým vazebním podmínkám pro svazek optických vláken a jejich výkonovým rozdílům mezi jednotlivými vlákny. V simulaci se musela použít jiná čočka, jelikož stejný typ čočky EDMUND OPTICS VIS-NIR Coated, Achromatic Lens #49-321, jako byl použit při reálných

měřeních nebyl v knihovně softwaru. Proto byla z knihovny čoček vybrána čočka, respektive spojený dublet s typovým označením EDMUND OPTICS MgF2 Coated, Achromatic Doublet Lens #45-209, který nejvíce odpovídal geometrickým a optickým parametrům čočky, byla použita v rámci reálných měření. Rozdíl mezi čočkami je uveden v rámci práce kapitole.

Ze simulací v softwarovém prostředí LightTools bylo zjištěno, že svazek dopadající na čelo ferule SMA905 konektoru pro segment tvořený 7 optickými vlákny nedochází k větším vazebním nerovnoměrnostem mezi jednotlivými vlákny uchycenými v SMA905 konektoru. Situace je trochu odlišná pro vazební podmínky u 19 optických vláken v rámci segmentu optického vysílače. Zde již pozorujeme větší výkonové poklesy pro vlákna umístěna mimo střed ferule, a tím dojde k menšímu vybuzení těchto mimo středových vláken. To celé má za následek výkonové změny i na výstupní straně optického vysílače.

V další části tvorby modelu optických segmentových vysílačů v softwarové aplikaci LightTools už bylo použito parametrů z vybraného optického vlákna S105/125-22A. Simulace byly vytvořeny se 7 či 19 optickými vlákny s úpravou konců vláken bez a s čočkami, kdy konce optických vláken byly zarovnané do roviny, jelikož tomu odpovídalo i reálné měření. Zdroj záření bílého světla v simulacích byl nastaven na výkon 1 W, s teplotou chromatičnosti barvy na 6500 K pro každé optické vlákno, podle zvoleného typu segmentu. V rámci simulací v softwarové aplikaci LightTools se ukázalo, že nejrovnoměrnější pokrytí osminy koule může být dosaženo za pomoci jednoho středového vlákna a 6 vláken, pokud bude úhel vychýlení těchto 6 vláken od středového činit 13° . Uvedme, že tato simulace byla zhotovena bez čoček. Pro porovnání chování optických vláken v segmentu byl ponechán stejný úhel i při zhotovení čoček na konce optických vláken. Ze simulací pro 7 vláknový optický segment nám vyplývá, že dosažení efektivního pokrytí osminy koule je dosaženo, jak pro rovné konce optických vláken, tak i s čočkami po těžnicích t_1 , t_2 a t_3 . Nicméně v případě rovných konců dochází k značnému výkonovému poklesu směrem od středu k rohům osminy koule. Tato výkonová nevyváženost je při umístění čoček potlačena a křivka v řezech po těžnicích osminy koule je rovnoměrnější. Tím je dosaženo i rovnoměrnějšího rozložení optické intenzity na části detektoru osminy koule.

Lepších výsledků je dosaženo při zhotovení optického segmentového vysílače s 19 optickými vlákny pro stejnou úpravu konců optických vláken a zarovnání do roviny. Při simulaci bylo zjištěno, že nejrovnoměrnější pokrytí osminy koule může být dosaženo i za pomoci jednoho středového vlákna, 6 vláken ve vnitřním kruhu a 12 vláken ve vnějším kruhu nastane, pokud bude úhel vychýlení vláken ve vnitřním kruhu 16° , a úhel vychýlení vláken ve vnějším kruhu bude 36° . Pro optický segment tvořený 19 optickými vlákny bez čoček jsou těžnice t_1 , t_2 a t_3 symetrické v jednotlivých řezech, ale zajímavostí je chování středového vlákna. Toto vlákno dosahovalo nižší hodnoty a vytvořilo v řezech v simulacích pokles, který lze těžko popsat. Ani četné konzultace s kolegy z firmy LightTec nevedlo ke zdárnému vyřešení problému. Tento pokles může být zapříčiněn například tím, že středové vlákno vyzařuje primárně pouze svůj světelný kruh na středovou část osminy, nicméně

vlákna ve vnitřním a vnějším kruhu vyzařují ve větším počtu navzájem a jejich součet je vyšší, jelikož dochází k většímu skládání výkonů mezi těmito zdroji záření. U rozložení relativních hodnot optické intenzity pro 19 vláken s čočkami došlo k vyhlazení vyzařovací křivky a byly potlačeny výkonové výkyvy. Jediný rozdíl se zdá být pouze u středové těžnice t_3 , která vykazuje vyšší hodnoty relativní intenzity oproti těžnicím t_1 a t_2 .

Kromě simulací optické intenzity a míry kolísání výkonové hustoty na ploše detektoru osminy koule byla studována i zářivost pro jednotlivé typy optických segmentových vysílačů pro 7 a 19 vláken. Pro lepší pochopení definování detekční plochy pro rozložení optické intenzity je využito v softwarové aplikaci polovina koule s výřezem pro detektor osminy koule, kdy můžeme vidět, že při vložení osminy koule dojde k ořezání části výsledků rozložení optické intenzity. Simulace, ačkoliv byly nastaveny pro optimalizaci rozložení optické intenzity na osminu koule, tak ozařovaly i plochu mimo ní.

Posledním bodem práce bylo zhotovit prototypy optických segmentových vysílačů, dle předlohy získané ze simulací, a ověřit jejich funkčnost v temné místnosti pro potlačení okolního světelného záření, které by vnášelo chybu do měření. Prototypy optických segmentových vysílačů pro 7 a 19 vláken byly zhotoveny a umístěny do polystyrénového výřezku bez a s umístěním čoček. Úhly vychýlení pro optická vlákna ve vnitřním či vnějším kruhu byly pro oba prototypy optických vysílačů vyvrtány shodně. Měření kolísání výkonové hustoty v řezech po těžnicích osminy koule bylo provedeno ve vzdálenosti 34 cm mezi segmentem optického vysílače pro 7 či 19 vláken vůči středu osminy koule. Bohužel technologické zázemí katedry nedovolilo vyrobit prototypy optických segmentových vysílačů na kulové ploše. Proto je nutné říci, že není dodržena jednotná vzdálenost drah mezi vysílačem a kulovou plochou osminy koule.

S reálně vytvořeným prototypem optického segmentového vysílače se 7 optickými vlákny bez a s umístěním čoček na konce optických vláken bylo zjištěno, že reálný model je proti simulovanému jiný, jelikož v reálném měření nedošlo k vyhlazení křivky po těžnicích. Bez čoček je výkonové maximum uprostřed a postupně klesá od středu směrem k rohům osminy koule. Stejná situace je i pro segment tvořený 7 optickými vlákny s čočkami. I zde výkon klesá se vzrůstající vzdáleností od středu osminy koule. Cílem návrhu tohoto prototypu vysílače bylo poukázat na to, zda je možné skládáním segmentů efektivně a rovnoměrně pokrýt část definované plochy stejně jako je tomu třeba u mobilních sítích skrze buňkové rozložení základnových stanic či rozložením LED zdrojů záření v případě komunikace v VLC systému. Druhý typ prototypu optického segmentového vysílače tvořeného 19 optickými vlákny dosahoval velice dobrých výsledků oproti simulaci. Na základě reálně provedených měření výkonového rozložení světla na detektoru osminy koule došlo ke splnění podmínky 3 dB kolísání výkonové hustoty po řezu těžnic osminy koule.

Rozdíly vzniklé mezi simulačním modelem návrhu prototypu optického segmentového vysílače pro 7 či 19 vláken dochází ke změnám či rozdílům, které mohou být způsobeny tím, že zatím co v simulacích počítáme s ideálními parametry tj. homogenní složení materiálu čoček definovaných za pomoci indexu lomu a přesnému umístění na konce optických

vláken. Opačná situace je u reálného prototypu vysílače, kde vstupuje do vyhodnocení a rozložení světla na osmině koule k chybám, které mohou snížit kvalitu reálných měření. Můžeme třeba uvést fakt, že při reálné výrobě PDMS se snažíme potlačit vznik vzduchových kapes či bublinek pomocí umístění do chladného prostředí. Zároveň při nanášení PDMS na zalomené konce optických vláken předpokládáme, že se nevytvoří vzduchová kapsa či bublinka mezi PDMS a konci optických vláken, což by mělo pak za následek značné rozptylování světla s tím snižování výkonové úrovně vystupující z optického vlákna či vláken spolu se změnou vyzařovacích úhlů. V simulacích předpokládáme ideální typ optického vlákna s dokonalou válcovou strukturou, ideální vazbou do všech vláken ze zdroje záření atd. Další chyby mohly vzniknout při výrobě prototypu optického segmentového vysílače např. při vrtání dírek pro umístění vláken do polystyrénového výřezku a jejich uchycení.

Budoucí vývoj optických vysílačů na bázi vláken může být směřován do problematiky optimalizace optické soustavy pro fokusaci, výběr jiných typů optických vláken s většími průměry jádra a pláště, úprava konců optických vláken do jiných tvarů. Zároveň je třeba hledat jiný typ siloxanu Sylgardu s indexem lomu bližší optickému vláknu. Velice zajímavé se jeví využití smíchání PDMS a luminoforu, kdy při homogenně rozloženém luminoforu v PDMS po ozáření světlem modré barvy dojde ke změně vyzářeného světla z konců optických vláken na bílé světlo, které je vhodné pro osvětlování vnitřních prostor.

Na závěr lze říci, že byl nalezen způsob tvorby optických segmentových vysílačů na bázi optických vláken, které splňují podmínku efektivního pokrytí části místnosti (v našem případě osminy koule či její části) s rovnoměrným rozložením optické intenzity v prostoru, kdy míra kolísání hustoty optického výkonu nepřesáhne 3 dB. K významnému zlepšení vykrytí prostoru došlo při aplikaci čoček vyrobených pomocí PDMS. Dané řešení nanesení PDMS na konce optických vláken za účelem rovnoměrného vykrytí definované plochy v rámci této práce nebylo do současné doby publikováno na mezinárodní scéně. Byla navázána spolupráce s prof. Pudišem z Žilinské univerzity v oblasti vývoje dalších typů zakončení optického vysílače tvořeného optickými vlákny či zlepšení metodiky nanesení PDMS, výroby PDMS aj. Zároveň byl projeven zájem se podílet na budoucím vývoji optického vysílače tvořeného optickými vlákny ze strany Dr. Gunnara Böttgera z Fraunhofer Institute for Reliability and Microintegration IZM, který je schopen vytvořit optická vlákna s vnořeným profilem do optického vlákna, a tím, značně měnit vyzařovací úhel i numerickou aperturu [157]. Ve spolupráci s kolegou Dr. Martinem Smržem z výzkumného centra HiLASE, Fyzikálního ústavu akademie věd, bude možné zhotovit v budoucnu prototypy těchto vláken s vnořenými profily. O dané výsledky z této práce projevila zájem společnost SQS vláknová optika a.s., která má zájem se podílet svým výrobním a vývojovým zázemím na budoucím vývoji nového prototypu vysílače pro VLC komunikaci.

LITERATURA

- [1] COLEMAN, Ch. *Introduction to radio frequency engineering*. Cambridge: Cambridge Univ Press, 2011. ISBN 978-110-7402-607.
- [2] BOWICK, Ch. *RF circuit design*. 2nd ed. London: Newnes, 2008. ISBN 978-0-7506-8518-4.
- [3] HALONEN, T., J. ROMERO a J. MELERO. *GSM, GPRS and EDGE performance: evolution towards 3G/UMTS*. New York: Wiley, 2002. ISBN 04-708-4457-4.
- [4] LÁTAL, J. *Testování datových přenosů v datových mobilních sítích*. Ostrava, 2006. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10084/59421>. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Roman Šebesta, Ph.D.
- [5] PROKOPEC, J. a S. HANUS. *Systémy mobilních komunikací*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2008. ISBN 978-80-214-3791-3.
- [6] HANUS, S.. *Bezdrátové a mobilní komunikace*. Brno: Vysoké učení technické, 2001. ISBN 80-214-1833-8.
- [7] 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP). *Technical Specification Group GSM/EDGE Radio Access Network; Enhanced Data rates for GSM Evolution: Enhanced Data rates for GSM Evolution (EDGE): Project scheduling and open issues for EDGE*. Francie: ITU-T, 2001. Dostupné také z: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/50_series/50.059/50059-401.zip.
- [8] HOLMA, H. a A. TOSKALA. *WCDMA for UMTS: Radio access for third generation mobile communications*. Hoboken, N.J.: J. Wiley, 2002. ISBN 04-708-4467-1.
- [9] JAVIER SANCHEZ, M. T. *UMTS: services, architecture et WCDMA*. Paris: Hermes Science, 2001. ISBN 27-462-0335-9.
- [10] HARTE, L. *Introduction to Bluetooth: technology, market, operation, profiles, and services*. 2nd ed. Fuquay-Varina, NC: Althos Publishing, 2010. ISBN 978-193-2813-722.
- [11] REID, N., P. a R. SEIDE. *802.11 (Wi-Fi): Networking handbook*. New York: McGraw-Hill/Osborne, 2003. ISBN 00-722-2623-4.
- [12] PERAHIA, E. a R. STACEY. *Next generation wireless LANs: 802.11n, 802.11ac, and Wi-Fi direct*. Second edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. ISBN 11-070-1676-2.
- [13] REED, J., H.. *An introduction to ultra wideband communication systems*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 2005. ISBN 01-314-8103-7.

-
- [14] OPPERMAN, I., M. HÄMÄLÄINEN a J. IINATTI. *UWB Theory and Applications*. Chichester: John Wiley, 2004. ISBN 978-0470869178.
- [15] FARAHANI, S. *ZigBee wireless networks and transceivers*. Boston: Newnes/Elsevier, 2008. ISBN 07-506-8393-7.
- [16] SMITH, C. a D. COLLINS. *Wireless networks: design and integration for LTE, EVDO, HSPA, and WiMAX*. Third edition. New York: McGraw-Hill Education, 2014. ISBN 00-718-1983-5.
- [17] T. J. PENTTINEN, J. *The Telecommunications Handbook: Engineering Guidelines for Fixed, Mobile and Satellite Systems*. New York: Wiley, 2015. ISBN 978-1119944881.
- [18] *DigitalAir Wireless Networks: MRV TereScope - Free Space Optic Laser Links*. [online]. Dostupné z: <http://www.digitalairwireless.com/mrv-terescope-fso.asp>.
- [19] HENNIGER, H., B. EPPLE a D. GIGGENBACH. Mobil FSO Activities in Europe and Fading Mitigation Approaches. In: *2007 17th International Conference Radioelektronika*. Brno: IEEE, 2007, s. 1–6. ISBN 1-4244-0821-0. DOI: 10.1109/RADIOELEK.2007.371452.
- [20] PLANK, T., M. CZAPUTA, E. LEITGEB, S., S. MUHAMMAD, N., DJAJA, B. HILLBRAND, P., MANDL a M. SCHÖNHUBER. Wavelength selection on FSO-links. In: *(EURAAP), [European Association on Antennas and Propagation. Antennas and Propagation (EUCAP), Proceedings of the 5th European Conference on*. Piscataway: IEEE, 2011, s. 2508–2512. ISBN 9781457702501.
- [21] KIM, I., I., E. J. KOREVAAR. Availability of free-space optics (FSO) and hybrid FSO/RF systems. In: *Proceedings of SPIE 4530, Optical Wireless Communications IV*. Bellingham: SPIE, 2001, s. 84–95. ISBN 9780819442543. DOI: 10.1117/12.449800.
- [22] STOTTS, L., B., N. PLASSON, Todd W. MARTIN, David W. YOUNG a Juan JUAREZ. Progress towards reliable free-space optical networks. In: *2011-MILCOM 2011 Military Communications Conference*. Baltimore: IEEE, 2011, s. 1720–1726. ISBN 978-1-4673-0081-0. DOI: 10.1109/MILCOM.2011.6127559.
- [23] KHVOROSTYANOV, V., I. a J. A. CURRY. Fall Velocities of Hydrometeors in the Atmosphere: Refinements to a Continuous Analytical Power Law. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2005, roč. 62, č. 12, s. 4343–4357. ISSN 0022-4928. DOI: 10.1175/JAS3622.1.
- [24] 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 1350-2433. DOI: 10.1049/ip-opt:19960881.

- [25] IEC-60825-1. *Safety of Laser Products*. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2007.
- [26] ČSN EN 60825-1. *A Bezpečnost laserových zařízení*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [27] BARRY, J. R. *Wireless infrared communications*. Boston: Kluwer Academic, 1994. ISBN 07-923-9476-3.
- [28] LANGER, K.-D. a J. VUCIC. Optical wireless indoor networks: Recent implementation efforts. In: *36th European Conference and Exhibition on Optical Communication*. Torino: IEEE, 2010, s. 1–6. ISBN 978-1-4244-8536-9. DOI: 10.1109/ECOC.2010.5621583.
- [29] SINGH, Ch., J. JOHN, Y., N. SINGH a K., K. TRIPATHI. *A review on indoor optical wireless systems*. Indian Institute of Technology Kanpur [online]. s. 1–36. Dostupné z: <http://home.iitk.ac.in/~ynsingh/papers/OwsRev-paper1.pdf>.
- [30] SMYTH, P.P., D. WOOD, S. RITCHIE a S. CASSIDY. Optical wireless: New enabling transmitter technologies. In: *Proceedings of ICC '93 - IEEE International Conference on Communications*. Geneva: IEEE, 1993, s. 562–566. ISBN 0-7803-0950-2. DOI: 10.1109/ICC.1993.397327.
- [31] Laser Safety Manual - UCSB Environmental Health & Safety. <http://www.ehs.ucsb.edu/files/docs/rs/lasersafetyman.pdf>.
- [32] RAMIREZ-INIGUEZ, R., S., M IDRUS a Z. SUN. *Optical wireless communications: IR for wireless connectivity*. Boca Raton: CRC Press, 2008. ISBN 08-493-7209-7.
- [33] SCHUBERT, E. *Light-emitting diodes*. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2006. ISBN 05-218-6538-7.
- [34] LÁTAL, J., P. KOUDELKA, V. VAŠINEK, F. DOSTÁL a K. SOKANSKÝ. Possible use of power LEDs for lighting and communication. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2011, roč. 87, č. 4, s. 25–28. ISSN 0033-2097.
- [35] LÁTAL, J., P. KOUDELKA, V. VAŠINEK, F. DOSTÁL a K. SOKANSKÝ. Possible use of power LEDs for lighting and communication. In: *sborník, Lumen V4*, Ostrava: 2010, s. 115–118, ISBN 978-80-248-2247-1.
- [36] GFELLER, F.R. a U. 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. DOI: 10.1109/PROC.1979.11508.
- [37] MARSH, G.W. a J.M. KAHN. Performance evaluation of experimental 50 Mb/s diffuse infrared wireless link using on-off keying with decision-feedback equalization. *IEEE Transactions on Communications*. 1996, roč. 44, č. 11, s. 1496–1504. ISSN 0090-6778. DOI: 10.1109/26.544466.

- [38] O'BRIEN, D. C., G. E. FAULKNER, K. JIM, E. B. ZYAMBO, D. J. EDWARDS, M. WHITEHEAD, P. N. STAVRINOU, G. PARRY, J. BELLON, M. J. N. SIBLEY, V. A. LALITHAMBIKA, V. M. JOYNER, R. J. SAMSUDIN, R. M. ATKINSON, D. M. HOLBURN a R. J. MEARS. High-speed integrated optical wireless transceivers for in-building optical LANs. In: *Proceedings of SPIE Vol. 4214, Optical Wireless Communications III*. Bellingham: SPIE, 2001, s. 104–114. ISSN 0277-786X. DOI: 10.1117/12.417501.
- [39] SINGH, Ch., J. JOHN, Y N SINGH a K K TRIPATHI. Indoor Optical Wireless Systems: Design Challenges, Mitigating Techniques and future Prospects. *IETE Technical Review*. 2015, roč. 21, č. 2, s. 101–117. ISSN 0256-4602. DOI: 10.1080/02564602.2004.11417136.
- [40] KOMINE, T. a M. NAKAGAWA. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. 2004, roč. 50, č. 1, s. 100–107. ISSN 0098-3063. DOI: 10.1109/TCE.2004.1277847.
- [41] AMIRSHAHI, P. a M. KAVEHRAD. Broadband access over medium and low voltage power-lines and use of white light emitting diodes for indoor communications. In: *CCNC 2006. 2006 3rd IEEE Consumer Communications and Networking Conference, 2006*. Las Vegas: IEEE, 2006, s. 897–901. DOI: 10.1109/CCNC.2006.1593168. ISBN 1-4244-0085-6.
- [42] GREEN, R.J., H. JOSHI, M.D. HIGGINS a M.S. LEESON. Recent developments in indoor optical wireless systems. *IET Communications*. 2008, roč. 2, č. 1, s. 3–10. ISSN 1751-8628. DOI: 10.1049/iet-com:20060475.
- [43] PAKRAVAN, M.R., E. SIMOVA a M. KAVEHRAD. Holographic diffusers for indoor infrared communication systems. In: *Proceedings of GLOBECOM'96. 1996 IEEE Global Telecommunications Conference*. London: IEEE, 1996, s. 1608–1612. DOI: 10.1109/GLOCOM.1996.591912. ISBN 0-7803-3336-5.
- [44] PAKRAVAN, M. R., E. SIMOVA a M. KAVEHRAD. Holographic Diffusers for Indoor Infrared Communication Systems. *International Journal of Wireless Information Networks*. 1997, roč. 4, č. 4, s. 259–274. ISSN 1068-9605.
- [45] JIVKOVA, S. T. a M. KAVEHARD. Multispot diffusing configuration for wireless infrared access. *IEEE Transactions on Communications*. 2000, roč. 48, č. 6, s. 970–978. ISSN 0090-6778. DOI: 10.1109/26.848558.
- [46] YUN, G. a M. KAVEHRAD. Spot-diffusing and fly-eye receivers for indoor infrared wireless communications. In: *1992 IEEE International Conference on Selected Topics in Wireless Communications*. Vancouver: IEEE, 1992, s. 262–265. ISBN 0-7803-0723-2. DOI: 10.1109/ICWC.1992.200761.

- [47] ELMIRGHANI, J.M.H. a A.G. AL-GHAMDI. Spot diffusing technique and angle diversity performance for high speed indoor diffuse infra-red wireless transmission. *IEE Proceedings - Optoelectronics*. 2004, roč. 151, č. 1, s. 46–52. ISSN 1350-2433. DOI: 10.1049/ip-opt:20040140.
- [48] CARRUTHER, J.B. a J.M. KAHN. Angle diversity for nondirected wireless infrared communication. *IEEE Transactions on Communications*. roč. 48, č. 6, s. 960-969. DOI: 10.1109/26.848557. ISSN 00906778.
- [49] SIVABALAN, A. a J. JOHN. Improved power distribution in diffuse Indoor Optical Wireless systems employing multiple transmitter configurations. *Optical and Quantum Electronics*. 2006, roč. 38, č. 8, s. 711–725. ISSN 0306-8919. DOI: 10.1007/s11082-006-9008-x.
- [50] GHASSEMLOOY, Z. a A. C. BOUCOUVALAS. Indoor optical wireless communication systems and networks. *International Journal of Communication Systems*. 2005, roč. 18, č. 3, s. 191–193. ISSN 1074-5351. DOI: 10.1002/dac.698.
- [51] LE MINH, H., D. O'BRIEN, G. FAULKNER, O. BOUCHET, M. WOLF, L. GROBE a J. LI. 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. DOI: 10.1109/LPT.2010.2073696.
- [52] SINGH, C., J. JOHN, Y.N. SINGH a K.K. TRIPATHI. Design aspects of high-performance indoor optical wireless transceivers. In: *2005 IEEE International Conference on Personal Wireless Communications, 2005. ICPWC 2005*. London: IEEE, 2005, s. 14–18. ISBN 0-7803-8964-6. DOI: 10.1109/ICPWC.2005.1431292.
- [53] MCKEE, P., D. WOOD, J. TOWERS a P. SMYTH. Applications of computer generated, free-space diffractive optics from interconnections and packaging to optical wireless antennas. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Holographic Systems, Components and Applications*. Neuchatel: IET, 1993, s. 260–264. ISSN 0537-9989.
- [54] KAVEHRAD, M. a S. JIVKOVA. Indoor broadband optical wireless communications: optical subsystems designs and their impact on channel characteristics. *IEEE Wireless Communications*. 2003, roč. 10, č. 2, s. 30–35. ISSN 1536-1284. DOI: 10.1109/MWC.2003.1196400.
- [55] GREENWOOD, N a A. EARNSHAW. *Chemie prvků*. 1. vyd. Praha: Informatorium, 1993. ISBN 80-854-2738-9.
- [56] MILLAR, C.A., B.J. AINSLIE, M.C. BRIERLEY a S.P. CRAIG. Fabrication and characterisation of D-fibres with a range of accurately controlled core/flat distances. *Electronics Letters*. 1986, roč. 22, č. 6, s. 322–324. ISSN 0013-5194. DOI: 10.1049/el:19860221.

- [57] WANG, K., A. NIRMALATHAS, Ch. LIM a E. 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. DOI: 10.1364/OE.18.025199.
- [58] WANG, K., A. NIRMALATHAS, Ch. LIM, E. SKAFIDAS, Y. SU, E. CIARAMELLA, X. LIU a N. WADA. Gigabit optical wireless communication system for indoor applications. In: *Proceedings of SPIE - Vol. 7988: Optical Transmission Systems, Switching, and Subsystems VIII*. China: SPIE, 2011, s. 79880Z-79880Z-6. ISBN 978-081948556-4. DOI: 10.1117/12.887955.
- [59] WANG, K., A. NIRMALATHAS, Ch. LIM a E. 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. DOI: 10.1109/LPT.2011.2113331.
- [60] WANG, K., A. NIRMALATHAS, Ch. LIM a E. SKAFIDAS. 4×12.5 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. DOI: 10.1109/JLT.2011.2155622.
- [61] PEDROTTI, K., R. P. DAHLGREN, J. A. WYSOCKI, S. E. RALPH, R. GANDHI a A. POLLEY. *Multi-gigabit transmission over POF*. POF World West, 2006. Dostupné z: <http://alumni.soe.ucsc.edu/~rdahlgren/papers/pub044.pdf>.
- [62] MONTERO, D.S., I. GASULLA, I. MOLLERS, D. JAGER, J. CAPMANY a C. VAZQUEZ. Experimental analysis of temperature dependence in multimode optical fiber links for radio-over-fiber applications. In: *2009 11th International Conference on Transparent Optical Networks*. London: IEEE, 2009, s. 1-4. ISBN 978-1-4244-4825-8. DOI: 10.1109/ICTON.2009.5185019.
- [63] GIARETTA, G., W. WHITE, M. WEGMULLER a T. ONISHI. High-speed (11 Gbit/s) data transmission using perfluorinated graded-index polymer optical fibers for short interconnects (<100 m). *IEEE Photonics Technology Letters*. 2000, roč. 12, č. 3, s. 347-349. ISSN 1041-1135. DOI: 10.1109/68.826936.
- [64] SCHOELLMANN, S., Ch. WREE, A. JOSHI a W. ROSENKRANZ. First Experimental Transmission over 50 m GI-POF at 40 Gb/s for Variable Launching Offsets. In: *33rd European Conference and Exhibition of Optical Communication - Post-Deadline Papers (published 2008)*. Berlin: VDE-Verlang, 2007, s. 1-2. ISBN 978-3-8007-3059-9 .
- [65] HAJJAR, H. A., B. FRACASSO a D. LEROUX. Fiber-Distributed Indoor High Bitrate Optical Wireless System. *Wireless Personal Communications*. 2013, roč. 72, č. 3, s. 1771-1782 ISSN 1572-834X. DOI: 10.1007/s11277-013-1134-8.

- [66] AL HAJJAR, H., B. FRACASSO a D. LEROUX. Fiber-distributed indoor high bit-rate optical wireless system. In: *2011 14th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*. Piscataway, N.J.: IEEE, 2011, s. 1–5. ISBN 978-1-4577-1786-4.
- [67] AL HAJJAR, H., B. FRACASSO a D. LEROUX. Transmission characterisation of PF-GI-POF for high bitrate indoor wireless network. In: *International conference on plastic optical fibers 2011*. Bilbao: Spain, 2011.
- [68] AL HAJJAR, H., B. FRACASSO a D. LEROUX. Offset-launch characterization of transmission loss in PF-GI-POF for wireless home networks. In: *20th International conference on polymer optical fibers*. Bilbao, Spain, 2011.
- [69] AL HAJJAR, H., B. FRACASSO a D. LEROUX. Indoor optical wireless Gbps link dimensioning. In: *Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2013*. Washington, D.C: OSA, 2013, NTu3J.3-. ISBN 978-1-55752-962-6. DOI: 10.1364/NFOEC.2013.NTu3J.3.
- [70] AL HAJJAR, H., B. FRACASSO a K. HEGGARTY. Uniform free-space cell shaping using diffractive-type beam diffusers for optical wireless links. *Optics Letters*. 2014, roč. 39, č. 24, s. 6871–6874. ISSN 0146-9592. DOI: 10.1364/OL.39.006871.
- [71] AL HAJJAR, H., B. FRACASSO a F. LAMARQUE. Mini optical concentrator design for indoor high bit rate optical wireless communications. In: *2013 2nd International Workshop on Optical Wireless Communications (IWOW)*. Newcastle upon Tyne: IEEE, 2013, s. 147–151. ISBN 978-1-4799-1188-2. DOI: 10.1109/IWOW.2013.6777796.
- [72] KOLEV, D. R., T. KUBO, T. YAMADA, N. YOSHIMOTO a K. WAKAMORI. Non-directed indoor optical wireless network with a grid of direct fiber coupled ceiling transceivers for wireless epon connectivity. In: *2013 Proceedings of ITU Kaleidoscope Building Sustainable Communities*. Piscataway: IEEE, 2013, s. 1–8. ISBN 978-1-4673-4676-4.
- [73] KOLEV, D. R., K. WAKAMORI, M. MATSUMOTO, T. KUBO, T. YAMADA a N. YOSHIMOTO. Gigabit indoor laser communication system for a mobile user with MEMS mirrors and image sensors. In: *2012 International Workshop on Optical Wireless Communications (IWOW)*. Piscataway: IEEE, 2012, s. 1–3. ISBN 978-1-4673-2735-0. DOI: 10.1109/IWOW.2012.6349683.
- [74] KOLEV, D. R., M. MATSUMOTO, K. WAKAMORI, T. KUBO, T. YAMADA a N. YOSHIMOTO. Hybrid line-of-sight indoor infrared laser wireless link with 10Gbps downlink and 1Gbps uplink. In: *2013 2nd International Workshop on Optical Wireless Communications (IWOW)*. N. J.: IEEE, 2013, s. 132–136. ISBN 978-1-4799-1188-2. DOI: 10.1109/IWOW.2013.6777793.

- [75] KOLEV, D. R. a M. MATSUMOTO. A Low Speed Uplink with Diverged Laser Beam and Multiple Receivers for Indoor Optical Wireless System. *Image Electronics and Visual Computing 2012*. Kuching, Malaysia, 2012. s. 1–6. Dostupné z: www.iieej.org/trans/IEVC/IEVC2012/PDF/5C-5.pdf.
- [76] KOLEV, D. R., K. WAKAMORI a M. MATSUMOTO. Transmission Analysis of OFDM-Based Services Over Line-of-Sight Indoor Infrared Laser Wireless Links. *Journal of Lightwave Technology*. 2012, roč. 30, č. 23, s. 3727–3735. ISSN 0733-8724. DOI: 10.1109/JLT.2012.2227456.
- [77] GLUSHKO, B., D. KIN a A. SHAR. High bandwidth optical wireless network for gigabit communication. In: *2013 IEEE Global High Tech Congress on Electronics*. N. J.: IEEE, 2013, s. 114–120. ISBN 978-1-4799-3209-2. DOI: 10.1109/GHTCE.2013.6767254.
- [78] GLUSHKO, B., D. KIN a A. SHAR. Gigabit optical wireless communication system for personal area networking. *Optical Memory and Neural Networks*. 2013, roč. 22, č. 2, s. 73-80. ISSN 1060-992x. DOI: 10.3103/S1060992X13020033.
- [79] GLUSHKO, B., D. KIN a A. SHAR. Gigabit optical wireless communication system for personal area networking. In: *Proceedings of the 2013 18th European Conference on Network and Optical Communications*. N. J.: IEEE, 2013, s. 145–148. ISBN 978-1-4673-5823-1. DOI: 10.1109/NOC-OCI.2013.6582880.
- [80] LOPRESTI, P. G., N. BROOKS, W. SUMPTER, H. REFAI, C. Y. YOUNG a G. Ch. GILBREATH. Fiber bundles in transceivers to mitigate scintillation effects on free-space optical networks. In: *Proceedings of SPIE - Vol. 6551, Atmospheric Propagation IV*, 2007, s. 65510N-1–65510N-9. ISBN 978-081946673-0. DOI: 10.1117/12.718265.
- [81] LOPRESTI, P., S. PONDELİK, N. YE, S. PRATHIPATY, S. SPAUNHORST a H. REFAI. Experimental demonstration/analysis of fiber-bundle-based receiver performance. In: *2009 IEEE/AIAA 28th Digital Avionics Systems Conference*. N. J.: IEEE, 2009, s. 6.A.2-1-6.A.2-12. ISBN 978-1-4244-4077-1. DOI: 10.1109/DASC.2009.5347453.
- [82] YI, W., P. G. LOPRESTI, A. KAADAN a H. H. REFAI. Wavelength agile FSO receiver. In: *2013 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*. N. J.: IEEE, 2013, s. 1–23. ISBN 978-1-4673-6253-5. DOI: 10.1109/ICN-Surv.2013.6548663.
- [83] LOPRESTI, P., N. HUTCHINS, S. KOHRMANN, M. F. BABELLI a H. H. REFAI. Wavelength dependence of a fiber-bundle based FSO link. In: *2014 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. N. J.: IEEE, 2014, s. 493–498. ISBN 978-1-4799-7470-2. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2014.7063480.

- [84] LOPRESTI, P.G., H. REFAI, J. J. SLUSS, C. Y. YOUNG a G. Ch. GILBREATH. Mitigating angular misalignment from atmospheric effects in FSO links. In: *Proceedings of SPIE - Vol. 6551, Atmospheric Propagation IV*. Bellingham: SPIE, 2007, s. 65510K-1–65510K-8. ISBN 978-081946673-0. DOI: 10.1117/12.719772.
- [85] LOPRESTI, P. G., G. Ch. GILBREATH, L. M. WASICZKO, C. KIISTER, S. SPAUNHORST a H. REFAI. Maximizing receiver misalignment tolerance in a hybrid wireless system. In: *Proceedings of SPIE - Vol. 6551, Atmospheric Propagation IV*. Bellingham: SPIE, 2008, s. 65510K-1-65510K-8. ISBN 978-081947142-0. DOI: 10.1117/12.777442.
- [86] LOPRESTI, P. G., D. ZHOU, H. REFAI, L. M. WASICZKO THOMAS a E. J. SPILLAR. Evaluation of the performance of a fiber-bundle-based optical wireless link. In: *Proceedings of SPIE - Vol. 8038, Atmospheric propagation VIII*. Bellingham: SPIE, 2011. ISBN 978-081948612-7. DOI: 10.1117/12.883291.
- [87] LOPRESTI, P. G., D. ZHOU, Z. SHI a H. H. REFAI. Design simulation and analysis of a fiber-bundle based optical wireless link. In: *Proceedings of SPIE - Vol. 8380 - Atmospheric Propagation IX*. Bellingham: SPIE, 2012, s. 838006-838006-9. ISBN 978-081949058-2. DOI: 10.1117/12.919423.
- [88] HAHN, D. V., D. M. BROWN, A. M. BROWN, Ch.-H. BAIR, M. J. MAYR, N. W. ROLANDER, J. E. SLUZ a R. VENKAT. Conformal Free-Space Optical Communications Terminal Designs for Highly Confined Vehicles. *Johns Hopkins APL Technical Digest (Applied Physics Laboratory)*. 2012, roč. 30, č. 4, s. 321–330. ISSN 0270-5214.
- [89] BROWN, A. M., D. V. HAHN, D. M. BROWN, N. W. ROLANDER, Ch.-H. BAIR a J. E. SLUZ. Experimental implementation of fiber optic bundle array wide FOV free space optical communications receiver. *Applied Optics*. 2012, roč. 51, č. 18, s. 3995–4002. ISSN 0003-6935. DOI: 10.1364/AO.51.003995.
- [90] ZHOU, D., P. G. LOPRESTI a H. H. REFAI. Design analysis of a fiber-bundle-based mobile free-space optical link with wavelength diversity. *Applied Optics*. 2013, roč. 52, č. 16, s. 3689–3697. ISSN 0003-6935. DOI: 10.1364/AO.52.003689.
- [91] MORADI, H., H. H. REFAI a P. G. LOPRESTI. Spatial Diversity for Fiber-Bundled FSO Nodes With Limited Mobility. *Journal of Lightwave Technology*. 2012, roč. 30, č. 1, s. 175–183. ISSN 0733-8724. DOI: 10.1109/JLT.2011.2179789.
- [92] ZHOU, D., P. G. LOPRESTI a H. H. REFAI. Enlargement of Beam Coverage in FSO Mobile Network. *Journal of Lightwave Technology*. 2011, roč. 29, č. 10, s. 1583–1589. ISSN 0733-8724. DOI: 10.1109/JLT.2011.2134069.
- [93] ZHOU, D., Z. SHI, W. YI, P. LOPRESTI, H. REFAI a E. J. SPILLAR. Evaluation of optical transceivers for mobile FSO applications. In: *Proceedings of SPIE - Vol. 8380, Atmospheric Propagation IX*. Bellingham: SPIE, 2012, s. 83800B-83800B-9. ISBN 978-081949058-2. DOI: 10.1117/12.919576.

- [94] LOPRESTI, P. G., W. YI, E. ROHLMAN, H. REFAI, L. M. WASICZKO THOMAS a E. J. SPILLAR. Wavelength diversity assessment of fiber bundle receiver under misalignment and turbulence. In: *Proceedings of SPIE - Vol. 8732, Atmospheric Propagation X*. Bellingham: SPIE, 2013, s. 87320C-1-87320C-8. ISBN 978-081949523-5. DOI: 10.1117/12.2018239.
- [95] ZHOU, D., P. G. LOPRESTI a H. H. REFAI. Evaluation of Fiber-Bundle Based Transmitter Configurations With Alignment Control Algorithm for Mobile FSO Nodes. *Journal of Lightwave Technology*. 2013, roč. 31, č. 2, s. 249–256. ISSN 0733-8724. DOI: 10.1109/JLT.2012.2228467.
- [96] KAADAN, A., DAYONG ZHOU, H. H. REFAI a P. G. LOPRESTI. Modeling of aerial-to-aerial short-distance free-space optical links. In: *2013 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*. IEEE, 2013, s. 1–12. ISBN 978-1-4673-6253-5. DOI: 10.1109/ICNSurv.2013.6548513.
- [97] KAADAN, A., H. H. REFAI a P. G. LOPRESTI. Multielement FSO Transceivers Alignment for Inter-UAV Communications. *Journal of Lightwave Technology*. 2014, roč. 32, č. 24, s. 4785–4795. ISSN 0733-8724. DOI: 10.1109/JLT.2014.2364795.
- [98] KUBO, T., T. YAMADA, K-I. SUZUKI, N. YOSHIMOTO, T. UMEKI, M. ASOBE, D. R. KOLEV a M. MATSUMOTO. 1.25-Gb/s 2-m indoor visible light transmission employing wavelength conversion with quasi phase matching device. In: *2012 International Workshop on Optical Wireless Communications (IWOW)*. IEEE, 2012, s. 1–3. ISBN 978-1-4673-2735-0. DOI: 10.1109/IWOW.2012.6349695.
- [99] KUBO, T., T. UMEKI, T. KANAI, H. SUZUKI, H. HADAMA a M. ASOBE. A High-Speed Visible Light Indoor Network Employing a Short Pulse Modulation and a QPM-LN Module. In: *Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2011*. Washington, D.C: OSA, 2011, s. JWA073–JWA076. ISBN 978-1-55752-906-0. DOI: 10.1364/NFOEC.2011.JWA073.
- [100] BORAH, D. K., A. C BOUCOUVALAS, Ch. C DAVIS, S. HRANILOVIC a K. YIANNPOULOS. A review of communication-oriented optical wireless systems. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. 2012, roč. 2012, č. 91, s. 1–28. ISSN 1687-1499. DOI: 10.1186/1687-1499-2012-91.
- [101] PATHAK, P., X. FENG, P. HU a P. MOHAPATRA. Visible Light Communication, Networking and Sensing: Potential and Challenges. *IEEE Communications Surveys*. 2015, roč. PP, č. 99, s. 1–35. ISSN 1553-877x. DOI: 10.1109/COMST.2015.2476474.
- [102] IEEE 802.15.7. *Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light*. New York, USA: IEEE Computer Society, 2011.
- [103] ARNON, S., J. R. BARRY, G. K. KARAGIANNIDIS, R. SCHOBER a M. UYSAL. *Advanced optical wireless communication systems*. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. ISBN 978-0-521-19787-8.

- [104] KAGAWA, K., T. IKEUCHI, J. OHTA a M. NUNOSHITA. An image sensor with a photoreceiver function for indoor optical wireless LANs fabricated in 0.8- μm BiCMOS technology. In: *Proceedings of the IEEE Sensors 2004*, N. J.: IEEE, 2004, s. 288–291. ISBN 0-7803-8692-2.
- [105] ALATTAR, J. M. a J. M. H. ELMIRGHANI. Optical Wireless Systems Employing Adaptive Collaborative Transmitters in an Indoor Channel. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2010, roč. 59, č. 1, s. 63–74. ISSN 0018-9545. DOI: 10.1109/TVT.2009.2020427.
- [106] ELGALA, H., R. Y. MESLEH a H. HAAS. Practical Considerations for Indoor Wireless Optical System Implementation using OFDM. In: *ConTEL 2009: Proceedings of the 10th International Conference on Telecommunications*. Zagreb, 2009, s. 25–29. ISBN 978-953-184-130-6.
- [107] ELGALA, H., R. MESLEH a H. HAAS. Indoor optical wireless communication: potential and state-of-the-art. *IEEE Communications Magazine*. 2011, roč. 49, č. 9, s. 56–62. ISSN 0163-6804. DOI: 10.1109/MCOM.2011.6011734.
- [108] LATAL, J., J. VITASEK, P. KOUDELKA, P. SISKÁ, A. LINER, L. HAJEK, A. VANDERKA, V. VASINEK a M. LUCKI. Software design of segment optical transmitter for indoor free-space optical networks. In: *Proceedings of SPIE: Vol. 9387, Broadband Access Communication Technologies IX*. Bellingham: SPIE, 2015, s. 93870Y-1–93870Y-11. ISBN 978-162841477-6. DOI: 10.1117/12.2087118.
- [109] LATAL, J., P. KOUDELKA, J. VITASEK, L. HAJEK, S. HEJDUK, A. LINER, P. SISKÁ a V. VASINEK. New approach to design of optical transmitter for indoor free space optical network. In: *Proceedings of SPIE: Vol. 9450, Photonics, Devices, and Systems VI*. Bellingham: SPIE, 2015, s. 94501D-1–94501D-09. ISBN 978-162841477-6. DOI: 10.1117/12.2073495.
- [110] VITÁSEK, J., P. KOUDELKA, J. LÁTAL, F. DOSTÁL a K. SOKANSKÝ. Indoor optical free space networks - reflectivity of light on building materials. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2011, roč. 87, č. 4, s. 41–44. ISSN 0033-2097.
- [111] VITÁSEK, J., P. KOUDELKA, J. LÁTAL, F. DOSTÁL a K. SOKANSKÝ. Indoor optical free space networks – reflectivity of light on building materials. In: *sborník, Lumen V4*, Ostrava: 2010, s. 244–247, ISBN 978-80-248-2247-1.
- [112] LÁTAL, J., P. KOUDELKA a V. VAŠINEK. Communication among the cars by the optical fibreless network. In: *48th FITCE Congress 2009*, Praha. 2009, pp. 82–85.
- [113] LightTools Illumination Design Software: Design, Analyze, Optimize and Deliver Illumination Optics. In: *Optical Research Associates*. 2011. Dostupné z: http://www.opticalres.com/lt/LIGHT_TOOLS.pdf.

- [114] LINDLEIN, N. *Geometrical and Technical Optics: Lecture about the principles of geometrical and technical optics*. In: University of Erlangen–Nürnberg [online]. 2007. Dostupné z: www.optik.uni-erlangen.de/odem/vorlesung/ws1314/geom_optics_vorlesung.pdf.
- [115] WILFERT, O. *Fotonika a optické komunikace*. VUT Brno, 2007. ISBN 978-80-214-3537-7.
- [116] SNYDER, A. W. a J. D. LOVE. *Optical waveguide theory*. London: Chapman, 1983. ISBN 04-122-4250-8.
- [117] ARFKEN, George B a Hans-Jurgen WEBER. *Mathematical methods for physicists*. San Diego: Academic Press, 1995. ISBN 01-205-9815-9.
- [118] VRBOVÁ, M. *Úvod do laserové techniky*. Praha, 1998. ISBN 80-010-1108-9.
- [119] TME 5W HI-POWER LED SPECIFICATION. [online]. Dostupné z: <http://www.tme.eu/cz/Document/cae8f61a20cf993db81583fdf1c872db/HPA8b-43K5GAx.pdf>.
- [120] Statron Gerätetechnik GmbH: *Multi source devices type 2229.1*. [online]. Dostupné z: <http://www.statron.de/details/27>.
- [121] *Uni-Trend: Modern Digital Multi-Purpose Meters, UT70A*. [online]. s. 1–30. Dostupné z: <http://uni-trend.com/UT70A.html>.
- [122] USB4000-VIS-NIR Spectrometer. *Ocean Optics*. [online]. 2015. Dostupné z: <http://oceanoptics.com/product/usb4000-vis-nir/>.
- [123] Ocean Optics. *SpectraSuite-Spectrometer Operating Software: Installation and Operation Manual*. 2006.
- [124] Edmund Optics: *25.0mm Dia. x 25.0mm FL, VIS-NIR Coated, Plano-Convex Lens*. [online]. Dostupné z: <http://www.edmundoptics.com/optics/optical-lenses/achromatic-lenses/vis-nir-coated-achromatic-lenses/49321/>.
- [125] Edmund Optics: *EDMUND OPTICS MgF2 Coated, Achromatic Doublet Lens #45-209*. [online]. Dostupné z: <http://www.edmundoptics.com/optics/optical-lenses/achromatic-lenses/vis-nir-coated-achromatic-lenses/45209/>.
- [126] *G.652: Characteristics of a single-mode optical fibre and cable*. ITU-T Publications. 2009. Dostupné také z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.652/en>.
- [127] *G.653: Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable*. ITU-T Publications, 2010. Dostupné také z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.653/en>.
- [128] *G.654: Characteristics of a cut-off shifted single-mode optical fibre and cable*. ITU-T Publications, 2012. Dostupné také z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.654/en>.

- [129] *G.655: Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable*. ITU-T Publications, 2009. Dostupné také z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.655/en>.
- [130] *G.656: Characteristics of a fibre and cable with non-zero dispersion for wideband optical transport*. ITU-T Publications, 2010. Dostupné také z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.656/en>.
- [131] *G.657: Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable for the access network*. ITU-T Publications, 2012. Dostupné také z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.657/en>.
- [132] *G.651: Characteristics of a 50/125 μm multimode graded index optical fibre cable*. ITU-T Publications, 1988. Dostupné také z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.651/en>.
- [133] *G.651.1: Characteristics of a 50/125 μm multimode graded index optical fibre cable for the optical access network*. ITU-T Publications, 2007. Dostupné také z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.651.1/en>.
- [134] DUBSKÝ, P. M. KUCHARSKI. *Měření přenosových parametrů optických vláken a kabelů*. Mikrokom: Praha 1994.
- [135] ZIEMANN, Olaf. *POF handbook: optical short range transmission systems*. Berlin: Springer, 2008, ISBN 978-3-540-76628-5.
- [136] *Nufern MM-S105/125-22A*. Nufern, 2015, http://www.nufern.com/pam/optical_fibers/920/MM-S105_125-22A/.
- [137] DICKEY, F. M. a S. C. HOLSWADE. *Laser beam shaping: theory and techniques*. New York: Marcel Dekker, 2000. ISBN 08-247-0398-7.
- [138] DICKEY, F. M., L. S. WEICHMAN a R. N. SHAGAM. *Laser Beam Shaping Techniques* [online]. Sandia National Laboratories, Albuquerque, (MS 0328). Dostupné z: <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/752659-XCT0TP/webviewable/752659.pdf>.
- [139] DORDOVÁ, L. *Metoda stanovení charakteristik atmosférického přenosového prostředí v optické oblasti spektra*. Brno, 2009. Disertační práce. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc.
- [140] NAM-HYONG, K. a A. WERSAL. *How to Design a Gaussian to Top-Hat Beam Shaper*. In: Zemax.com [online]. 2015. Dostupné z: <http://www.zemax.com/os/resources/learn/knowledgebase/how-to-design-a-gaussian-to-top-hat-beam-shaper>.
- [141] SCHEJBALOVÁ, H., I. STIBOR, I. PROKOPOVÁ a D. LUKÁŠ. *Polymerizace cyklických sloučenin (monomerů)*. VIII.6.2.4.

- [142] ŠTEGBAUER, R. *Silikony v elektrotechnice*. Plzeň, 2015. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce: doc. Ing. Eva Kučerová, CSc.
- [143] Down Corning, *Sylgard 184*. Dostupné z:<http://www.dowcorning.com/applications/search/default.aspx?R=131EN>.
- [144] SCHNEIDER, F., J. DRAHEIM, R. KAMBERGER a U. WALLRABE. Process and material properties of polydimethylsiloxane (PDMS) for Optical MEMS. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2009, roč. 151, č. 2, s. 95-99. ISSN 09244247. DOI: 10.1016/j.sna.2009.01.026.
- [145] Kern&Sohn GmbH, *KB2400-2N, 2410g/0.01g*. Dostupné z:<http://www.kern-sohn.com/data/downloads/sl-kb-gb.pdf>.
- [146] IKA, *Vortex Genius 3*. Dostupné z:http://www.ika.com/owa/ika/catalog/product_detail?iProduct=3340000&iProductgroup=&iSubgroup=&iCS=1.
- [147] Thorlabs, Inc., *MBT616D/M - 3-Axis MicroBlock Compact Flexure Stage, Differential Micrometers, Metric Taps*. Dostupné z:https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1041.
- [148] Bresser, *Bresser Biorit ICD CS Stereo Microscope*. Dostupné z:<http://www.bresser.de/en/Microscopes-Magnifiers/Microscopes/Bresser-Biorit-ICD-CS-Stereo-Microscope.html>.
- [149] ARSENAL, *MODEL LPT 3113iA-T*. Dostupné z:http://www.mikroskopy-mikroskop.cz/filemanager/userfiles/PROSPEKTY/prumyslovymikroskop_LPT_3113iA-T_2012_05_01.pdf.
- [150] ARSENAL, *Digitální kamera CMOS 550*. Dostupné z:http://www.mikroskopy-mikroskop.cz/filemanager/userfiles/PROSPEKTY/digitalnikamera_CMOS_530_a_CMOS_550_2012_05_01.pdf.
- [151] KUMAR, S. a M. DEEN. *Fiber optic communications: fundamentals and applications*. England: Wiley, 2014. ISBN 978-1-118-68343-9.
- [152] *Optical fibres - Part 1-43: Measurement methods and test procedures - Numerical aperture measurement*. IEC Publications, 2015. Dostupné také z: <https://webstore.iec.ch/publication/22008>.
- [153] TST101 - T-Cube Stepper Motor Controller (Power Supply Not Included). *Thorlabs* [online]. 2015. Dostupné z: <http://www.thorlabs.de/thorproduct.cfm?partnumber=TST101>.
- [154] S120C - Standard Photodiode Power Sensor, Si, 400 - 1100 nm, 50 mW. *Thorlabs* [online]. 2015. Dostupné z: <http://www.thorlabs.de/thorproduct.cfm?partnumber=S120C>.

- [155] PM100DUSB: Console for the Digital Optical Power Meter. *Thorlabs* [online]. 2015. Dostupné z: http://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=4037&pn=PM100USB.
- [156] S122VC - Standard Photodiode Power Sensor, Si, 200 - 1100 nm, 50 mW. *Thorlabs* [online]. 2015. Dostupné z: <http://www.thorlabs.de/thorproduct.cfm?partnumber=S122VC>.
- [157] BOTTGER, G. *Functionalized optical fiber tips in fused silica and mid-infrared MIR-fibers for spectroscopy and medical application* [online]. 2014. Dostupné z: http://www.micro-photonics.de/media/lob/lob_media/lob_pdf/presentationen_cps_kongress/44_Boettger.pdf.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

- A* - označení pro optickou intenzitu Top-Hat svazku [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
A_r - definice pro povrch očí
A_w - amplituda rovinné vlny
a - definice části svazku z konstanty A
b - definice části svazku z konstanty B
c - rychlost šíření světla ve vakuu [$3\cdot 10^8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
d - určení vzdálenosti
e - je subatomární částice se záporným elektrickým nábojem [$1,602\cdot 10^{-19}\text{J}$]
d_l - definice tloušťky obecné čočky [m]
E osvětlení (intenzita osvětlení) - světelný tok dopadající na plochu [lx]
E_p fyzikální pojem vyjadřující odolnost materiálů vůči elektrickému poli [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]
E_e intenzita ozáření - výkon dopadající na plochu [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
E_{eff} určení míry vazby
E_f elektrické pole ve směru roviny vlákna
E_{fund} elektrické pole základního vidu
E_{in} vstupní elektrické pole na čočce
E_m hodnota udržované osvětlenosti, definující průměrná hodnota osvětlenosti, pod kterou nesmí osvětlenost poklesnout v okamžiku provedení naplánované údržby
f_r ohnisková vzdálenost obecné čočky
f_s ohniskové vzdálenost optické soustavy či vzdálenost optické soustavy od stínítka
 \bar{E} střední hodnota osvětlení [ls]
 \bar{E}_e střední hodnota intenzity [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
f - je fyzikální veličina, která udává počet opakování periodického děje za daný časový úsek [Hz]
g - definován jako jedna tisícina kilogramu
h - Planckova konstanta, konstanta vyzařovacího zákona černého tělesa [$6,626\cdot 10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$]
H expozice (osvit) - výkon vyzářený plochou do celého poloprostoru [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
H_e expozice (dávka ozáření) - je časový souhrn ozařování vztažený na jednotku plochy [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
I_e zářivost - zářivost je podíl zářivého toku Φ_e a velikosti prostorového úhlu Ω [$\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$]
I_{γc} svítivost - je světelný tok Φ vyzařovaný bodovým zdrojem do jednotkového prostorového úhlu [cd]
I_p foton proud na definované fotodiodě [A]
K_m maximální viditelnost - bylo stanoveno při fotopickém vidění (ve dne) při vlnové délce $\lambda=555,155\text{ nm}$ a jeho hodnota je 683 lm/W .
k₀ definice pro určení velikosti vlnového vektoru
k_T definice pro určení rychlosti změny *u_r* a poklesu v jádře
l azimutální index

- L jas - světelný tok do jednotkového prostorového úhlu na "promítnutou" jednotkovou plochu zdroje [$\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$]
- L_e zář, plošná zářivost (jas) - výkon do jednotkového prostorového úhlu na "promítnutou" jednotkovou plochu zdroje [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$]
- n_0 index lomu vzduchu (odpovídá 1)
- NA numerická apertura - určuje rozsah úhlů vstupních paprsků, které se budou moci beze ztrát šířit optickým vláknem [-]
- mpix. - označení pro počet pixelů [1 milion pixelů]
- M světlení (intenzita světlení) - světelný tok emitovaný plochou zdroje [$\text{lm}\cdot\text{m}^{-2}$]
- M_e intenzita vyzařování - Energie vyzařovaná do volného poloprostoru jednotkou povrchu plošného zdroje za jednotku času [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
- n index lomu prostředí [-]
- O - definice vazebních podmínek pro pro překryvný integrál
- O_{min} - definice minimálních vazebních podmínek pro pro překryvný integrál
- P_1 - definice části výkonu z Gaussova svazku [W]
- P_2 - definice části výkonu z Top-Hat svazku [W]
- P_{celk} - definice celkového výkonu Gaussova svazku [W]
- P_{eye} - maximální přijatý výkon dopadající na lidské oko
- P_T - celkový vysílací výkon
- r - poloměr koule [m]
- r_0 - pološířka vstupujícího svazku [m]
- r_Δ - mimo-osové vychýlení svazku dané čočkou
- r_{eff} - efektivní střed zachyceného svazku
- r_{in} - bočním posunutím optického svazku do čočky
- $r_{jádra}$ - poloměr jádra vlákna [m]
- r_{max} - maximální přípustný posuv mezi čočkou a polem vláken
- R - maximální šířka Top-Hat svazku [m]
- $R_{\frac{A}{W}}$ - proudová citlivost fotodetektoru [$\text{A}\cdot\text{W}^{-1}$]
- $R_{\frac{V}{W}}$ - citlivost fotodetektoru [$\text{V}\cdot\text{W}^{-1}$]
- R_l - poloměr zakřivení povrchu čočky [m]
- R_r - poloměr lidského oka pro výpočet maximálního přijatého výkonu dopadajícího na lidské oko
- R_f - poloměr svazku za obecnou čočkou [m]
- S - představuje šířku svazku, která nabývá hodnot z intervalu $\langle 0; R \rangle$
- SiO_2 - chemická značka oxidu křemičitého
- t - čas [s]
- t_1 - těžnice pro osminu koule
- t_2 - těžnice pro osminu koule
- t_3 - těžnice pro osminu koule
- t_p - teplota [$^\circ\text{C}$]

- t_0 - časový úsek [s]
 U - souřadnice pro složky polí
 $U(x_0, y_0)$ - komplexní vyjádření tvarovaného svazku na stínítku ve vzdálenosti z
 $U(x_1, y_1)$ - komplexní vyjádření vstupního svazku
 V - normalizovaná frekvence
 w_{eff} - definice pro velikost části příchozího svazku
 w_L - velikost příchozího svazku a jeho určení rozměru
 w_s - šířka svazku zachyceného čočkou
 w_0 - pološířka vystupujícího svazku
 x - rozložení elektrického pole svazku ve směru x
 x' - rozložení elektrického pole svazku ve směru x'
 z - definice vzdálenosti [m]
 z_c - osa šíření optického svazku
 β - konstanta šíření
 β_s - ukazatel kvality metody pro změnu tvaru svazku
 ϵ_0 - fyzikální veličina popisující vztah mezi vektory intenzity elektrického pole a elektrické indukce v materiálu nebo vakuu [$8.854 \cdot \pi \cdot 10^{-12}$ F·m⁻¹]
 η určuje kvantovou účinnost
 γ - definice pro určení rychlosti změny u_r a poklesu v plášti
 λ - vlnová délka [m]
 λ_0 - vlnová délka optické vlny ve vakuu [m]
 ω - průměr vidového pole jednovidového vlákna
 Ω - prostorový úhel [sr]
 π - Ludolfovo číslo, 3,14
 Φ - světelný tok - schopnost zářivého toku vyvolat zrakový vjem za určitou dobu [lm]
 Φ_e zářivý tok - odpovídá zářivé energii, kterou vyzáří zdroj za jednotku času [W]
 ϕ - výstupní vychýlený optický svazek ze zdroje záření měřený v radiánech
 Ψ - fázová kvadratická odchylka pro tvarování svazků
 τ - fyzikální veličina, udávající poměr mezi tečným napětím a změnou rychlosti v závislosti na vzdálenosti mezi sousedními vrstvami při proudění skutečné kapaliny [mPas]
 $\Psi(x_1, y_1)$ - fázová funkce, která vyjadřuje prvek bezeztrátového tvarování svazku
 ρ - radiální vzdálenost
 Θ_a - polovina vrcholového úhlu kužele paprsků vstupujících do optického vlákna
 θ_{in} - úhlové vychýlení
 Υ - tepelná vodivost schopnost daného kusu látky, konstrukce (např. zdi), vést teplo [W·m·K]
 φ - definice úhlu
 ζ - Rezistivita (též měrný elektrický odpor) fyzikální veličina charakterizující lokální (diferenciální) vodivostní či odporové vlastnosti látek vedoucích

- elektrický proud [$\Omega \cdot \text{cm}$]
- μ_0 - permeabilita vakua [$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$]
- ξ - fázový posun
- 3GPP (3rd Generation Partnership Project) - partnerský projekt třetí generace mobilních sítí
- ADR (Angular Diversity Receivers) - přijímače s výběrově úhlovým příjmem
- AES (Advanced Encryption Standard) - symetrická bloková šifra
- AEL (Accessible Emission Limit) - přístupný emisní limit působící na lidský zrak ve vnitřních prostorech
- AGWN (Additive White Gaussian Noise) - adaptivní bílý Gaussovský šum
- AGRIN (Axial GRAdient INdex) - čočky s proměnným indexem lomu ve směru osy z_c
- APD (Avalanche Photo Diode) - lavinová fotodioda
- APR (Automatic Power Reduction) - snížení výkonové hustoty v případě překážky v dráze paprsku
- ASK (Amplitude Shift Keying) - modulace založená na amplitudovém klíčování
- ATM (Asynchronous Transfer Mode) - asynchronní transportní mód
- ATPC (Automatic Transmit Power Control) - automatické řízení vysílaného výkonu
- BER (Bit Error Rate) - bitová chybovost
- BERT (Bit Error Rate Tester) - měřicí zařízení pro měření hodnoty bitové chybovosti
- BFL (Back Focal Length) - zadní ohnisková vzdálenost čočky
- BiCMOS (Bi Complementary Metal Oxide Semiconductor) - technologie Bi CMOS
- BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) - funkci odrazivosti povrchu danou metodou BRDF, určující kolik paprsků se dostane na kameru respektive na snímací element
- CDS (Conventional-Diffuse-System) - konvenční difúzní systém
- CEPT (European Conference of Postal and Telecommunications Administrations) - konference evropských správ pošt a telekomunikací
- CGH (Computer-Generated Holography) - počítačem generovaný hologram
- CM (Ceiling Module) - stropní vysílače
- CS (Code Scheme) - kódovací schéma pro mobilní síť EDGE
- CSD (Circuit Switched Data) - datové přenosy založené na přepojování okruhů v mobilních sítích 2G
- CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) - protokol pro přístup k přenosovému médiu v počítačových sítích, tedy metoda s vícenásobným kolizním přístupem a nasloucháním nosné
- ČTÚ Český telekomunikační úřad
- DBIR (Directed Beam Infrared) - přímý infračervený paprsek
- DFB (Distributed Feedback Laser) - laser s distribuovanou zpětnou vazbou
- DMD (Diamond Multispot Diffusion) - diamantový vícesvazkový vysílač

- DPPM (Differential Pulse-Position Modulation) - modulace založená na diferenciálně pulzní polohové modulace
- DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) - hustý vlnový multiplex
- ECG (Equal-Gain Combining) - je technika v přijímači, kdy signály všech cest jsou sečteny a váhovací koeficienty jsou pro všechny signály stejné
- EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution) - vývojový stupeň v technologii GSM po zavedení datových přenosů pomocí GPRS
- EDFA (Erbium Doped Fibre Amplifier) - erbium dopovaný vláknový zesilovač pro telekomunikační síť
- EDR (Enhanced Data Rate) - specifikace technologie Bluetooth, jenž zavádí novou modulační techniku $\pi/4$ -DQPSK a zvyšuje tak datovou propustnost
- EFL (Effective Focal Length) - efektivní ohnisková vzdálenost čočky
- EHF (Extremely High Frequency) - extrémně krátké vlny rádiové vlny
- EIRP (Equivalent Isotropically Radiated Power) - ekvivalentní izotropně vyzářený výkon, je celkový výkon, který by bylo nutné vyzářit izotropní anténou
- ELF (Extremely Low Frequency) - extrémně dlouhé rádiové vlny
- EMI (Electromagnetic Interference) - elektromagnetické rušení
- EPON (Ethernet Passive Optical Network) - verze PON sítě s využitím Ethernet protokolu
- ETSI (European Telecommunications Standards Institute) - evropský ústav pro telekomunikační normy
- FDD (Frequency Division Duplex) - kmitočtový duplex
- FDDI (Fiber Distributed Data Interface) - síť s kruhovou topologií
- FOV (Field Of View) - zorné pole
- FSO (Free-Space Optical communication) - definice pro atmosférické optické komunikace
- FTTx (Fiber To The x) - obecný pojem pro všechny druhy širokopásmové síťové architektury, která využívá optické vlákno
- FSK (Frequency Shift Keying) - modulace založená na frekvenčním klíčování
- FWHM (Full Width at Half Maximum) - plná šířka na polovině maxima
- GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) - modulace založená na klíčování Gaussovým minimálním posuvem
- GSM (Global System for Mobile Communications) - globální systém pro mobilní komunikaci
- GPRS (General Packet Radio Service) - mobilní datová služba přístupná pro uživatele GSM mobilních telefonů, je označována jako "2.5G"
- GRIN (Gradient-index) - typ speciálních čoček s gradientním profilem indexu lomu
- HSCSD (High-Speed Circuit-Switched Data) - služba komutovaných digitálních okruhů v mobilních sítích GPRS
- HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) - protokol mobilní telefonie označovaný

také jako technologie 3,5G, pomocí něj došlo ke zvýšení přenosové rychlosti ve směru k uživateli

HSDPA-MC (High-Speed Downlink Packet Access-Multi-Cell) - protokol mobilní telefonie podporující vícenásobné využití MIMO anténních systémů pro zvýšení přenosové rychlosti

HSPA+DC (HSPA+Dual-Cell, Dual Carrier) - je protokol, který oproti "základní" variantě HSPA+, která využívá jeden frekvenční kanál o šířce 5 MHz, tato druhá varianta používá dva takové frekvenční kanály, jestliže u základní varianty HSPA+ je rychlost až 21,6 Mbit/s, nyní již operují s rychlostí dvojnásobnou, tedy až 43,2 Mbit/s.

HSUPA (High Speed Uplink Packet Access) - nástavba protokolu 3G mobilních telefonů v rodině HSPA s vyšší přenosovou rychlostí pro směr od uživatele

ICSA (Infrared Communication Systems Association) - asociace, která se zabývá optickou bezvláknovou komunikací v infračerveném spektru

IEC (International Electrotechnical Commission) - mezinárodní elektrotechnická komise, zaměřuje se na elektrotechnická a elektronická zařízení

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) - Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství, mezinárodní nezisková profesní organizace usilující o vzestup technologie související s elektrotechnikou

IR (Infrared) - je elektromagnetické záření s vlnovou délkou větší než viditelné světlo, ale menší než mikrovlnné záření

IrDA (Infrared Data Association) - konsorciem, které popisuje bezdrátovou komunikaci pomocí infračerveného světla

IP (Internet Protocol) - protokol IP poskytuje datagramovou službu celé rodině protokolů TCP/IP

IS (Image Sensor) - obrazový senzor jako detektor pro vnitřní bezvláknové systémy

ISI (Intersymbol Interference) - mezisymbolová interference vznikající v důsledku časové disperze (rozptylu) signálu při jeho průchodu kanálem

ISM (Industrial, Scientific and Medical band) - bezlicenční pásma pro rádiové vysílání v oborech průmyslovém, vědeckém a zdravotnickém

ITU (International Telecommunications Union) - mezinárodní telekomunikační unie

LD (Laser Diode) - laserový zdroj záření

LED (Light-Emitting Diode) - polovodičový zdroj záření

LF (Low Frequency) - nízké frekvence

LOS (Line Of Sight) - typ konfigurace pro přímou viditelnost

LSMS (Line-Strip-Multibeam-Transmitter) - jednopásový vícesvazkový vysílač

LTE (Long Term Evolution) - technologie určená pro vysokorychlostní Internet v mobilních sítích

MM (Multimode) - mnohovidové optické vlákno používané ve fotonických komunikacích

- MAC (Media Access Control) - řízení přístupu k médiu
- MCVD (Modified Chemical Vapor Deposition) - výroba preformy s vnitřním uložením páry
- MBWA (Mobile Broadband Wireless Access) - je zkratka standartu IEEE 802.20 definující mobilní internet skrze bezdrátové modemy
- MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) - technologie využívající především pohybové senzory
- M-FSOL (Mobile Free-Space Optical Link) - mobilní bezvláknové optické spojení
- MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) - multi-anténní komunikační systémy
- MLC (Maximum Likelihood Combining) - sdružování s maximální pravděpodobností
- MPE (Maximum Permissible Exposure) - úroveň laserového záření, jemuž může být za normálních okolností vystaven člověk, aniž by ozáření na něm zanechalo nepříznivé následky ($W \cdot m^{-2}$ a nebo $J \cdot m^{-2}$)
- MRC (Maximum Ratio Combining) - princip, který zaručuje maximální možný poměr signál k šumu, známe-li SNR a fázové posuvy signálu z jednotlivých cest
- MSC (Modulation and Coding Schemes) - modulační a kódovací schéma pro mobilní síť EDGE
- MW (Medium Wave) - střední rádiové vlny
- NA (Numerical Aperture) - je definice pro numerickou aperturu optického vlákna
- NLOS (Non Line Of Sight) - typ konfigurace pro nepřímou viditelnost
- NHZ (Nominal Hazard Zone) - jmenovitá nebezpečná zóna
- NRZ (Non Return to the Zero) - typ kódu bez návratu k nule
- MZM-LN (Mach-Zehnder Modulator-Lithium Niobate) - Mach-Zehnderův modulátor s využitím Lithium Niobatu pro intenzitní modulace ve fotonických komunikacích
- OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) - ortogonální multiplex s kmitočtovým dělením
- OLT (Optical Line Termination) - optické ukončovací zařízení pro FTTx síť
- OOK (On Off Keying) - digitální modulace využívající amplitudového klíčování (ASK)
- OOK NRZ (On Off Keying Non Return to Zero) - digitální modulace využívající amplitudového klíčování (ASK) v kombinaci s kódem Non Return to the Zero
- OCS (Optical Control Station) - optická řídicí jednotka pro komunikaci s mobilními zařízeními
- ONU (Optical Network Terminals) - optické síťové jednotky, zajišťuje funkcionalitu rozhraní mezi optickou a metalickou částí přístupové sítě s možným použitím bezdrátových sítí
- ONT (Optical Network Terminals) - optické síťové zakončení, zprostředkovává funkcionalitu účastnického rozhraní mezi koncovými zařízeními účastníků a přístupovou sítí
- P2MP (Point To Multipoint) - bod-více-bodové spojení
- P2P (Point To Point) - bod-bod spojení

- $\Phi/4$ -DQPSK (Differential Quadrature (Quadrature) Shift Keying) - digitální modulace využívající $\Phi/4$ - diferenční kvadrurního fázového klíčování
- PF-GI-POF (Pyrofluid Optical Fiber-Graded Index) - polymerové optické vlákno s gradientním profilem indexem lomu
- PMMA (Poly-Methyl Methacrylate) - běžně známý jako plexisklo nebo akrylátové sklo je průhledný syntetický polymer s vlastnostmi termoplastu
- PIN (p-i-n photodiode) - dioda s intrinzickou oblastí mezi oblastmi P a N
- PLED (Power Light Emitting Diode) - výkonová polovodičová dioda
- POF (Plastic Optical Fiber) - polymerové optické vlákno
- PPL (Phase Locked Loop) - fázový závěs
- PRBS (Pseudorandom Binary Sequence) - pseudonáhodná binární sekvence
- PSK (Phase Shift Keying) - modulace založená na fázovém klíčování
- QAM (Quadrature Amplitude Modulation) - modulace založená na kvadrurní amplitudové modulaci
- QoS (Quality Of Service) - termín používaný pro rezervaci a řízení datových toků v telekomunikačních a počítačových sítích s přepínáním paketů
- QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) - modulace založená na kvadrurním fázovém klíčování
- QPM (Quasi-Phase-Matching) - prvek provádějící konverzi infračerveného světla na viditelné
- QPM-LN (Quasi-Phase-Matching-Lithium Niobate) - prvek provádějící konverzi infračerveného světla na viditelné na bázi LiNbO_3
- RF (Radio Frequency) - rádiová frekvence
- RPR (Resilient Packet Ring) - standart definující optimalizaci přepravy datového provozu po optických kruhových sítích
- SC-FDMA (Single Carrier- Frequency Division Multiple Access) - frekvenčně dělený vícenásobný přístup na jedné nosné
- SD (Selection Diversity) - je anténní technika pro výběr antény s nejsilnějším příjmem výkonu signálu
- SHF (Super High Frequency) - super krátké rádiové vlny
- SHG (Second-Harmonic Generations) - základní vlna s frekvencí ω_1 , která interaguje s optickou druhou harmonickou nelineární vlnou pro zhotovení polarizační vlny na druhé harmonické $\omega_2 = 2 \cdot \omega_1$
- Si-APD (Silicon-APD) - je velice citlivá polovodičová fotodioda na bázi křemíku pro viditelnou a blízkou neviditelnou oblast
- SM (Single Mode) - jednovidové optické vlákno používané ve fotonických komunikacích
- SMC (Spot-Diffusing Multi-Line-Of-Sight) - vícepásový vícesvazkový optický vysílač
- SNR (Signal Noise to Ratio) - odstup signálu od šumu
- SONET (Synchronous Optical Networking)/SDH(Synchronous Digital Hierarchy) - standard pro digitální komunikaci

- SW (Short Wave) - krátké rádiové vlny
- TD-CDMA (Time Division Code Division Multiple Access) - specifikace pro mobilní síť 3G
- TDD (Time Division Duplex) - uplink i downlink na stejné frekvenci, střídání na základě různých časových slotů u mobilních sítí 3G, tzv. "Ping-Pong"
- TS (Time Slot) - časový slot pro mobilní síť
- UHF (Ultra High Frequency) - ultra krátké rádiové vlny
- UGR_L (Unified Glare Rating) - jednotné omezení oslnění ve vnitřním prostoru, hodnotí oslnění je založen na výpočtu indexu oslnění z různě modifikovaného empirického vzorce [-]
- UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) - je 3G systém standardu mobilních telefonů
- UWB (Ultra Wideband) - bezdrátová technologie, která může být použita při nízké úrovni energie pro širokopásmovou komunikaci krátkého dosahu při využití velké části rádiového spektra
- VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser) - je laserová dioda generující optické záření ve vertikální rezonanční dutině kolmo k povrchu aktivního prostředí
- VHF (Very High Frequency) - velmi krátké rádiové vlny
- VLCC (Visible Light Communication Consortium) - uskupení, které bylo založeno v Japonsku na podporu využití viditelného optického záření ke komunikaci
- VLF (Very Low Frequency) - velmi dlouhé rádiové vlny
- VoIP (Voice over IP) - technologie, umožňující přenos digitalizovaného hlasu v těle paketů
- VPAN (Visible Light Communication Personal Area Network) - optická bezdrátová datová síť založená na standardu IEEE 802.15.7
- WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) - evropsko-japonský standard pro mobilní síť 3G
- WiFi (Wireless Fidelity) - označení pro několik standardů IEEE 802.11 popisujících bezdrátovou komunikaci v počítačových sítích
- WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) - jde o bezdrátovou technologii, která je definována v řadě norem pod označením IEEE 802.16
- WLAN (Wireless Local Area Network) - standard pro lokální bezdrátové síť
- xWDM (xWavelength Division Multiplex) - vlnový multiplex
- WRAN (Wireless Regional Area Network) - je definice nového standardu IEEE 802.22, který umožňuje lepší využití televizního pásma
- YAG (Yttrium, Aluminium, Garnet) - složení pro výrobu luminoforu u polovodičových zdrojů záření

PUBLIKAČNÍ ČINNOST

Publikace vztažené k práci - časopisy indexované na Web of Science nebo Scopus

1. LATAL, J., P. KOUDELKA a V., DOSTÁL, F., SOKANSKÝ. K. VASINEK. Possible use of power LEDs for lighting and communication. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2011, roč. 87, č. 4, s. 25–28. ISSN 0033-2097. Odpovídá [34]
2. VITÁSEK, J., P. KOUDELKA, J. LÁTAL, F. DOSTÁL a K. SOKANSKÝ. Indoor optical free space networks - reflectivity of light on building materials. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2011, roč. 87, č. 4, s. 41–44. ISSN 0033-2097. Odpovídá [110]

Publikace vztažené k práci - článek ve sborníku indexovaný na Web of Science nebo Scopus

3. LATAL, J., J. VITASEK, P. KOUDELKA, P. SISKÁ, A. LINER, L. HAJEK, A. VANDERKA, V. VASINEK a M. LUCKI. Software design of segment optical transmitter for indoor free-space optical networks. In: *Proceedings of SPIE: Vol. 9387, Broadband Access Communication Technologies IX*. Bellingham: SPIE, 2015, s. 93870Y-1–93870Y-11. ISBN 978-162841477-6. DOI: 10.1117/12.2087118. Odpovídá [108]
4. LATAL, J., P. KOUDELKA, J. VITASEK, L. HAJEK, S. HEJDUK, A. LINER, P. SISKÁ a V. VASINEK. New approach to design of optical transmitter for indoor free space optical network. In: *Proceedings of SPIE: Vol. 9450, Photonics, Devices, and Systems VI*. Bellingham: SPIE, 2015, s. 94501D-1–94501D-09. ISBN 978-162841477-6. DOI: 10.1117/12.2073495. Odpovídá [109]

Publikace vztažené k práci - článek ve sborníku neindexovaný na Web of Science nebo Scopus

5. LÁTAL, J., P. KOUDELKA, V. VAŠINEK, F. DOSTÁL a K. SOKANSKÝ. Possible use of power LEDs for lighting and communication. In: *sborník, Lumen V4*, Ostrava: 2010, s. 115–118, ISBN 978-80-248-2247-1. Odpovídá [35]
6. VITÁSEK, J., P. KOUDELKA, J. LÁTAL, F. DOSTÁL a K. SOKANSKÝ. Indoor optical free space networks – reflectivity of light on building materials. In: *sborník, Lumen V4*, Ostrava: 2010, s. 244–247, ISBN 978-80-248-2247-1. Odpovídá [111]
7. LÁTAL, J., P. KOUDELKA a V. VAŠINEK. Communication among the cars by the optical fibreless network. In: *48th FITCE Congress 2009*, Praha. 2009, pp. 82–85. Odpovídá [112]

Publikace se širší vazbou k práci

8. HANACEK, F., J. LATAL a P. KOUDELKA. Nový způsob měření pomocí vláknově optických senzorů s frekvenční změnou na výstupu. *Elektrorevue*. 2009, roč. 19., 2009, s. 19-1–19-8. ISSN 1213-1539.
9. HANACEK, F., J. LATAL a P. KOUDELKA. Measuring system with fiber optic sensor with frequency output. In: *International Conference on Research in Telecommunication Technologies 2009*. SRBY: ČVUT v Praze, 2009, ISBN 978-80-01-04410-0.
10. LÁTAL, J., P. KOUDELKA, F. HÁNAČEK, P. ŠIŠKA a J. SKAPA. Nasazení DTS systému v oblasti obnovitelných zdrojů. In: *sborníku 11. CELOSLOVENSKÝ SEMINÁR ELEKTROTECHNIKOV*, Trenčín: MARKAB, 2009, s. 23–27, ISBN 978-80-89072-51-4.
11. LÁTAL, J., P. KOUDELKA, F., P. ŠIŠKA a J. SKAPA. Vláknově optický senzor se změnou frekvence na výstupu. In: *sborníku 11. CELOSLOVENSKÝ SEMINÁR ELEKTROTECHNIKOV*, Trenčín: MARKAB, 2009, s. 28–34, ISBN 978-80-89072-51-4.
12. LÁTAL, J., P. KOUDELKA, F. HANÁČEK, J. VITÁSEK a F. BURIÁNEK. Utilization of DTS Systems for Thermal Wells Measurement. In: *Proceeding of the 8th annual workshop WOFEX 2010*, Ostrava: Fakulta elektrotechniky a informatiky, VŠB–Technická univerzita Ostrava, 2010, s. 332–339. ISBN 978-80-248-2276-1.
13. SKAPA, J., J. VITÁSEK, J. LÁTAL, P. KOUDELKA a A. GANIYEV. ActiveX Controls in ThorLabs Actuator Control Using MATLAB. In: *12th International Conference on Research in Telecommunication Technologies 2010*. Ostrava: Katedra telekomunikační techniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, VŠB–Technická univerzita Ostrava, 2010. s. 111–114. ISBN 978-80-248-2261-7.
14. VITÁSEK, J., O. WILFERT a J. LÁTAL. Měření rozložení optické intenzity ve vzdálené zóně. *Elektrorevue*. 2010, roč. 20, č. 60, s. 60-1–60-6. ISSN 1213-1539. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/komunikacni-technologie/0/mereni-rozlozeni-opticke-intenzity-ve-vzdalene-zone/>.
15. VITÁSEK, J., A. GANIYEV a J. LÁTAL. Fog model for Free Space Optics Link. In: *Knowledge in Telecommunication Technologies and Optics 2010*. Ostrava: VSB–Technical University of Ostrava, 2010, s. 33–35. ISBN 978-80-248-2330-0.
16. LÁTAL, J., P. KOUDELKA a J. VITÁSEK. Měření vlivu velikosti překážek na přenos optickým pojítkem. *Elektrorevue*. 2010, roč. 20, č. 31, s. 39-1–39-8. ISSN 1213-1539.
17. VAŠINEK, V., J. LÁTAL, P. KOUDELKA, P. SISKÁ, J. VITÁSEK a J. SKAPA. Mach-Zehnder fiber interferometer for people monitoring. In: *Proceedings of SPIE 7833: Unmanned/Unattended Sensors and Sensor Networks VII*. Bellingham: SPIE, 2010, s. 1–6. ISBN 978-0-8194-8351-5. DOI: 10.1117/12.864870.
18. HÁNAČEK, F., J. LÁTAL, P. ŠIŠKA, P. KOUDELKA, J. SKAPA, J. HURTA a V.

- VAŠINEK. FOS for high temperatures - spectral characteristics. In: *The 12th International Conference on Research in Telecommunication Technologies 2010: Conference Proceedings*. VŠB-TUO: Velké Losiny. 2010, s. 108–110. ISBN 978-80-248-2261-7.
19. SKAPA, J., J. VITASEK, J. LATAL, P. KOUDELKA a A. GANIYEV. ActiveX Controls in ThorLabs Actuator Control Using MATLAB. In: *The 12th International Conference on Research in Telecommunication Technologies 2010: Conference Proceedings*. VŠB-TUO: Velké Losiny. 2010, s. 111–114. ISBN 978-80-248-2261-7.
 20. HANACEK, F., J. LATAL, P. SISKA, V. VASINEK, P. KOUDELKA, J. SKAPA a J. HURTA. Fiber optic sensor for high temperatures. In: *International Conference on Applied Electronics (AE 2010)*. Plzeň: IEEE, 2010, s. 1–4. ISBN 978-80-7043-865-7.
 21. HANÁČEK, F., J. LÁTAL, P. KOUDELKA, J. SKAPA, P. ŠIŠKA, V. VAŠINEK a J. HURTA. Vlákno optický senzor pro vysoké teploty. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*. 2010, roč. 8, č. 2, s. 6–9. ISSN 1804-3119.
 22. LATAL, J., P. KOUDELKA a F. HANACEK. Využití distribuovaných optovláknových systémů při detekci průvanů v jeskynních systémech. *Elektrorevue*. 2010, roč. 20, s. 5-1–5-7. ISSN 1213-1539.
 23. KOUDELKA, P., J. LÁTAL, P. ŠIŠKA, J. HURTA a L. ŽÍDEK. Application of DTS for Monitoring of Processes in Civil Engineering: Problematics of Use of Raman-DTS for Research on Concrete Mixtures Properties. In: *The 12th International Conference on Research in Telecommunication Technologies 2010: Conference Proceedings*. VŠB-TUO: Velké Losiny. 2010, s. 102–107. ISBN 978-80-248-2261-7.
 24. KOUDELKA, P., J. LÁTAL, P. ŠIŠKA, F. HANÁČEK, J. SKAPA a V. VAŠINEK. Studium senzorických vlastností kvazijednodivových optických vláken. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*. 2010, roč. 8, č. 1, s. 1–5. ISSN 1804-3119.
 25. VASINEK, V., J. LATAL, P. KOUDELKA, P. SISKA, F. HANACEK a J. SKAPA. Changes in optical spectrum of photonic fiber with two counter propagating laser beams. In: *Proceedings of SPIE Vol. 7781: Photonic Fiber and Crystal Devices: Advances in Materials and Innovations in Device Applications IV*. Bellingham: SPIE, 2010, s. 1–7. ISBN 978-081948277-8. DOI: 10.1117/12.860219.
 26. KOUDELKA, P., B. PETRUJOVA, J. LATAL, F. HANÁČEK, P. ŠIŠKA, J. SKAPA a V. VAŠINEK. Optical Fiber Distributed Sensing System Applied In Cement Concrete Commixture Research. *Radioengineering*, 2010, roč. 19, č. 1, s. 172–177. ISSN 1210- 2512.
 27. SKAPA, J., J. LATAL, M. PENHAKER, P. KOUDELKA, F. HANACEK a V. VASINEK. Optical fiber distributed temperature sensor in cardiological surgeries. In: *Proceedings of SPIE Vol. 7726: Optical Sensing and Detection*. Bellingham: SPIE, 2010, s. 77261V-1–77261V-7. ISBN 978-081948199-3.
 28. KOUDELKA, P., J. LÁTAL, V. VAŠINEK, F. DOSTÁL a K. SOKANSKÝ. Research of power LEDs for mobile communication, In: *sborník, Lumen V4*, Ostrava: 2010,

- s. 104–107, ISBN 978-80-248-2247-1.
29. LÁTAL, J., P. KOUDELKA, P. ŠIŠKA, F. HANÁČEK, J. SKAPA a V. VAŠINEK. Passive fiber rings as a basic part of fiber optic sensors. In: *Proceedings of SPIE Vol. 7597: Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XVIII*, SPIE: Bellingham, 2010, s. 75971W–75971W-5. ISBN 978-081947993-8. DOI: 10.1117/12.837815.
 30. VASINEK, V., J. BOCHEZA, S. HEJDUK, J. LATAL a P. KOUDELKA. Poly-anilin Nanofilms For Fiber Optic Smart Network Structures. In: *20th IMEKO TC2 Symposium on Photonics in Measurement*, Linz: ArsElectronica Center, 2011.
 31. VITÁSEK, J., J. LÁTAL, J. SKAPA, P. KOUDELKA, F. HANÁČEK, P. ŠIŠKA a V. VASINEK. The optical intensity distribution in the far field. In: *Proceedings of SPIE 7923: Free-Space Laser Communication Technologies XXIII*. Bellingham: SPIE, 2011, s. 1–7. ISBN 978-0-8194-8460-4. DOI: 10.1117/12.877768.
 32. LÁTAL, J., P. KOUDELKA, P. ŠIŠKA, J. SKAPA, F. HANÁČEK, V. VAŠINEK, J. VITÁSEK, S. HEJDUK a J. BOCHEZA. Fiber-optic DTS system application in the research of accumulation possibilities of thermal energy in the rock mass. In: *Proceedings of SPIE 8073: Optical Sensors 2011; and Photonic Crystal Fibers V*. Bellingham: SPIE, 2011, s. 1–8. ISBN 978-0-81948-663-9. DOI: 10.1117/12.887082.
 33. HANÁČEK, F., J. LÁTAL, P. KOUDELKA, P. ŠIŠKA, J. SKAPA, J. VITÁSEK, V. VASINEK, a J. HURTA. Measurement of the spectral characteristics of telecommunication fiber emitted at high temperatures. In: *Proceedings of SPIE 8073: Optical Sensors 2011; and Photonic Crystal Fibers V*. Bellingham: SPIE, 2011, s. 9–15. ISBN 978-0-81948-663-9. DOI: 10.1117/12.887093.
 34. KOUDELKA, P., J. LATAL, F., SOKANSKÝ. K. a V. VASINEK. Research of power LEDs for mobile communication. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2011, roč. 87, č. 4, s. 1–4. ISSN 0033-2097.
 35. LÁTAL, J., P. KOUDELKA, P. ŠIŠKA, J. SKAPA, F. HANÁČEK, J. VITÁSEK a V. VAŠINEK. Using DTS systems for borehole heat measurement in area VŠB-TU OSTRAVA. In: *12th International Conference Electric Power Engineering - EPE 2011*. Ostrava: VŠB–Technická univerzita Ostrava, 2011. s. 1–4. ISBN 978-80-248-2393-5.
 36. DAVID, T., J. LÁTAL, F. HANÁČEK, P. KOUDELKA, J. VITÁSEK, P. ŠIŠKA, J. SKAPA a V. VAŠINEK. Cross-Sectional Measuring of Optical Beam. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*. 2011, roč. 9, č. 4, s. 179–186. ISSN 1336-1376. DOI: 10.15598/aeer.v9i4.538.
 37. VITÁSEK, J., J. LÁTAL, S. HEJDUK, J. BOCHEZA, P. KOUDELKA, P. ŠIŠKA, J. SKAPA a V. VAŠINEK. Fog attenuation influence on Bit Error Ratio of Free Space Optics link. In: *Knowledge in Telecommunication Technologies and Optics 2011*. Ostrava: VŠB–Technická Univerzita Ostrava, 2011. s. 95–100. ISBN 978-80-248-2399-7.
 38. SKAPA, J., M. PENHAKER, J. LÁTAL, P. KOUDELKA a J. VITÁSEK. Fourier

- and Wavelet Analysis – an engineers approach. In: *Knowledge in Telecommunication Technologies and Optics 2011*. Ostrava: VŠB–Technická Univerzita Ostrava, 2011. s. 64–67. ISBN 978-80-248-2399-7.
39. HEJDUK, S., V. VAŠINEK, J. BOCHEZA, J. VITÁSEK, J. LÁTAL a A. GANIYEV. Noise analysis of dark rooms and their evaluation. In: *Knowledge in Telecommunication Technologies and Optics 2011*. Ostrava: VŠB–Technická Univerzita Ostrava, 2011. s. 79–83. ISBN 978-80-248-2399-7.
 40. VITÁSEK, J., J. LÁTAL, J. SKAPA, P. KOUDELKA, F. HANÁČEK, P. ŠIŠKA a V. VAŠINEK. The optical intensity distribution in the far field. In: *34th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), 2011*. Budapešť: IEEE, 2011, s. 108–110. ISBN 978-1-4577-1410-8. DOI: 10.1109/TSP.2011.6043762.
 41. VITÁSEK, J., J. LÁTAL, S. HEJDUK, J. BOCHEZA, P. KOUDELKA, J. SKAPA, P. ŠIŠKA a V. VAŠINEK. Atmospheric turbulences in Free Space Optics channel. In: *34th Telecommunications and Signal Processing (TSP), 2011*. Budapešť: IEEE, 2011, s. 104–107. ISBN 978-1-4577-1410-8. DOI: 10.1109/TSP.2011.6043763.
 42. VITÁSEK, J. OptiSystem in E-learning Presentation. In: *Proceeding of the 9th annual workshop WOFEX 2011*, Ostrava: Fakulta elektrotechniky a informatiky, VŠB–Technická univerzita Ostrava, 2011. s. 110–116. ISBN 978-80-248-2449-9.
 43. LÁTAL, J., T. DAVID, J. VITÁSEK a P. KOUDELKA. Měření optického výkonu pro optický svazek u bezvláknového optického pojítka. *Electroscope: online časopis pro elektrotechniku*. 2011, roč. 2011, č. 3, s. 1–5. ISSN 1802-4564.
 44. VAŠINEK, V., J. BOCHEZA, S. HEJDUK, J. LÁTAL, P. KOUDELKA a J. VITÁSEK. Polyaniline nanofilms as a base for novel optical sensor structures. In: *Proceedings of SPIE 8102: Nanoengineering: Fabrication, Optics, and Devices VIII*. Bellingham: SPIE, 2011, s. 1–6. ISBN 978-081948712-4. DOI: 10.1117/12.893085.
 45. LÁTAL, J., P. KOUDELKA, P. ŠIŠKA, J. VITÁSEK, J. SKAPA a V. VAŠINEK. Measurement of triple play services in the GEAPON optical access network. In: *13th International Conference on Research in Telecommunication Technologies 2011*. Těchov: Vysoké učení technické v Brně, 2011. s. 165–169. ISBN 978-80-214-4283-2.
 46. LÁTAL, J., P. KOUDELKA, P. ŠIŠKA, J. VITÁSEK, J. SKAPA a V. VAŠINEK. Advanced testing of multimedia services in GEAPON networks. In: *23rd Conference and Exhibition on Optical Communications 2011: Scientific Section Proceedings*. Prague: Agentura Action M, 2011. s. 37–41. ISBN 978-80-86742-32-8.
 47. POBOŘIL, R., J. LÁTAL, P. KOUDELKA, J. VITÁSEK, P. ŠIŠKA, J. SKAPA a V. VAŠINEK. A Concept of a Hybrid WDM / TDM Topology using the Fabry - Perot Laser in the Optiwave Simulation Environment. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*. 2011, roč. 9, č. 4, s. 167–178. ISSN 1336-1376. DOI: 10.15598/aeec.v9i4.537.
 48. VAŠINEK, V., J. VITÁSEK, S. HEJDUK, J. BOCHEZA, J. LÁTAL a P. KOUDELKA. Interference fiber ring perimeter with FFT analysis. In: *Proceedings of SPIE*

- 8186: *Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies, and Applications V*. Bellingham: SPIE, 2011, s. 1–5. ISBN 978-081948814-5. DOI: 10.1117/12.898076.
49. VASINEK, V., J. LÁTAL, P. KOUDELKA a P. SISKÁ. Passive fiber ring as a device for effective refractive index measurement. In: *Proceedings of SPIE Vol. 7934: Optical Components and Materials VIII*, Bellingham: SPIE, 2011, s. 79341J-79341J-6. ISBN 978-081948471-0. DOI: 10.1117/12.875316.
50. LÁTAL, J., A. VANDERKA, P. JENÍČEK a M. DVORSKÝ. Simulace a plánování vnitřního pokrytí budov dle standardu IEEE 802.11 v prostředí softwarové aplikace I-Prop – 1 část, *Elektrorevue*. 2011, roč. 21., s. 44-1–44-13. ISSN 1213-1539.
51. LÁTAL, J., A. VANDERKA, P. JENÍČEK a M. DVORSKÝ. Simulace a plánování vnitřního pokrytí budov dle standardu 802.11 v prostředí softwarové aplikace I-Prop – 2 část, *Elektrorevue*. 2011, roč. 21., s. 45-1–45-10. ISSN 1213-1539.
52. VASINEK, V., CUBIK, J., KEPÁK, S., DORICAK, J., LÁTAL, J., KOUDELKA, P. Mach-Zehnder interferometer for movement monitoring. In: *Proceedings of SPIE Vol. 8370: Fiber Optic Sensors and Applications IX*. Bellingham: SPIE, 2012, s. 83700R–83700R-7. ISBN 978-081949048-3. DOI: 10.1117/12.887082.
53. KOUDELKA, P., LINER, A., PÁPES, M., LÁTAL, J., VASINEK, V., HURTA, J., VINKLER, T., SISKÁ, P. New Sophisticated Analysis Method of Crystallizer Temperature Profile Utilizing Optical Fiber DTS Based on the Stimulated Raman Scattering. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*. roč. 10, č. 2, 2012, s. 106–114. ISSN 1804-3119. DOI: 10.15598/aeee.v10i2.637.
54. LÁTAL, J., T. DAVID, O. WILFERT, Z. KOLKA, P. KOUDELKA, F. HANÁČEK, J. VITÁSEK, P. ŠIŠKA, J. SKAPA a V. VAŠINEK. The design of equipment for optical power measurement in FSO link beam cross-section. In: *Proceedings of SPIE 8436: Optics, Photonics, and Digital Technologies for Multimedia Applications II*. Bellingham: SPIE, 2012, s. 1–10. ISBN 978-081949128-2. DOI: 10.1117/12.921701.
55. VAŠINEK, V., J. LÁTAL, P. KOUDELKA, P. ŠIŠKA, J. VITÁSEK a K. WITAS. Interaction between laser beams FP and DFB laser diodes. In: *Proceedings of SPIE 8432: Semiconductor Lasers and Laser Dynamics V*. Bellingham: SPIE, 2012, s. 1–6. ISBN 978-081949124-4. DOI: 10.1117/12.922136.
56. LÁTAL, J., P. KOUDELKA, J. VITÁSEK, P. ŠIŠKA, J. SKAPA, A. LÍNER, M. PÁPEŠ a V. VAŠINEK. Simulation of the influence of atmospheric conditions on low-cost optical free space link. In: *Proceedings of SPIE 8433: Laser Sources and App.*. Bellingham: SPIE, 2012, s. 1–8. ISBN 978-081949125-1. DOI: 10.1117/12.921700.
57. VITÁSEK, J., J. LÁTAL, P. KOUDELKA, V. VAŠINEK, J. BOCHEZA a S. HEJDUK. Spectral characteristics of fiber couplers for FTTx network. In: *Proceedings of SPIE 8436: Optics, Photonics, and Digital Technologies for Multimedia Applications II*. Bellingham: SPIE, 2012, s. 21–30. ISBN 978-081949128-2. DOI: 10.1117/12.922003.
58. KOUDELKA, P., J. LÁTAL, J. VITÁSEK, J. HURTA, P. ŠIŠKA, A. LÍNER a M. PÁPEŠ. Implementation of Optical Meanders of the Optical-Fiber DTS System

- Based on Raman Stimulated Scattering into the Building Processes. *Advanced in Electrical and Electronic Engineering*. 2012, roč. 10, č. 3, s. 187–194. ISSN 1804-3119.
59. VITÁSEK, J., S. HEJDUK, A. GANIYEV, J. LÁTAL a J. BOCHEZA. The Radiation Pattern Shaping of Power LED Diode. In: *Proceeding of the 10th annual workshop WOFEX 2012*, Ostrava: Fakulta elektrotechniky a informatiky, VŠB–Technická univerzita Ostrava, 2012, s. 518–525. ISBN 978-80-248-2769-8.
 60. LÍNER, A., M. PÁPEŠ, J. VITÁSEK, P. KOUDELKA, J. LÁTAL, J. ČUBÍK a V. VAŠINEK. The optical power distribution in a dark room. In: *Proceedings of SPIE 8697: 18th Czech-Polish-Slovak Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics*. Bellingham: SPIE, 2012, s. 0K-1–0K-9. ISBN 978-081949481-8. DOI: 10.1117/12.2003929.
 61. PÁPEŠ, M., P. ŠIŠKA, A. LÍNER, J. LÁTAL, P. KOUDELKA, J. VITÁSEK, M. FAJKUS a V. VAŠINEK. Measurement of attenuation changes of PON elements with temperature. In: *Proceedings of SPIE 8697: 18th Czech-Polish-Slovak Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics*. Bellingham: SPIE, 2012, s. 1R-1–1R-9. ISBN 978-081949481-8. DOI: 10.1117/12.2006394.
 62. ŠIŠKA, P., M. BROŽOVIČ, J. ČUBÍK, S. KEPÁK, J. VITÁSEK, P. KOUDELKA, J. LÁTAL a V. VAŠINEK. Fiber Bragg Grating vibration sensor with DFB laser diode. In: *Proceedings of SPIE 8697: 18th Czech-Polish-Slovak Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics*. Bellingham: SPIE, 2012, s. 1P-1–1P-9. ISBN 978-081949481-8. DOI: 10.1117/12.2010467.
 63. LÁTAL, J., J. VOGL, P. KOUDELKA, J. VITÁSEK, P. ŠIŠKA, A. LÍNER, M. PÁPEŠ a V. VAŠINEK. Simulation and measurement of optical access network with different types of optical-fiber amplifiers. In: *Proceedings of SPIE 8697: 18th Czech-Polish-Slovak Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics*. Bellingham: SPIE, 2012, s. 1U-1–1U-10. ISBN 978-081949481-8. DOI: 10.1117/12.2001263.
 64. VITÁSEK, J., J. LÁTAL, V. VAŠINEK, S. HEJDUK, A. LÍNER, M. PÁPEŠ, P. KOUDELKA a A. GANIYEV. The fog influence on bit error ratio. In: *Proceedings of SPIE 8697: 18th Czech-Polish-Slovak Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics*. Bellingham: SPIE, 2012, s. 0L-1–0L-6. ISBN 978-081949481-8. DOI: 10.1117/12.2001748.
 65. VASINEK, V., LATAL, J., P. KOUDELKA, M. PAPES, A. LINER a V. RASNE-ROVA. Usage of Raman DTS for wooden material analysis. In: *Proceedings of SPIE: 8774: Optical Sensors*. Bellingham: SPIE, 2013, s. 877418–877418-7. ISBN 978-081949576-1. DOI: 10.1117/12.2017964.
 66. LÁTAL, J., J. VITÁSEK, P. KOUDELKA, P. ŠIŠKA, A. LÍNER, M. PÁPEŠ, K. WITAS, S. HEJDUK a V. VAŠINEK. Rock massif temperature changes measurement with regard to thermal responses generated by a thermal response test device.

- Proceedings of SPIE 8774: Optical Sensors*. Bellingham: SPIE, 2013, s. 0L-1–0L-6. ISBN 978-081949576-1. DOI: 10.1117/12.2017241.
67. WITAS, K., S. HEJDUK, V. VAŠINEK, J. VITÁSEK a J. LÁTAL. Low noise omnidirectional optical receiver for the mobile FSO network. *Proceedings of SPIE 8774: Optical Sensors*. Bellingham: SPIE, 2013, s. 0L-1–0L-6. ISBN 978-081949576-1. DOI: 10.1117/12.2017086.
68. ŠIŠKA, P., J. LÁTAL, P. KOUDELKA, J. VITÁSEK, I. KAŠÍK a V. VAŠINEK. Coupling conditions for quasi-single mode optical fibers with different refractive index profile. *Proceedings of SPIE 8774: Optical Sensors*. Bellingham: SPIE, 2013, s. 0L-1–0L-6. ISBN 978-081949576-1. DOI: 10.1117/12.2017259.
69. VITÁSEK, J., J. LÁTAL, P. ŠIŠKA, P. KOUDELKA a V. VAŠINEK. Restoration of optical spectrum. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*. 2013, roč. 11, č. 3, s. 227–234. ISSN 1804-3119.
70. LÁTAL, J., M. BOJKO, J. VITÁSEK, P. KOUDELKA, P. ŠIŠKA, A. LÍNER, M. PÁPEŠ a V. VAŠINEK. Influence of Thermal Turbulences on the Optical Beam of Atmospheric Optical Link. In: *36th International Conference on Telecommunications and Signal Processing*. Řím: IEEE, 2013, s. 138–143. ISBN 978-1-4799-0404-4.
71. VITÁSEK, J., P. ŠIŠKA, J. LÁTAL, S. HEJDUK, A. LÍNER a V. VAŠINEK. The Transmitter for Indoor Free Space Optic Networks. In: *36th International Conference on Telecommunications and Signal Processing*. Řím: IEEE, 2013, s. 290–293. ISBN 978-1-4799-0404-4.
72. VITÁSEK, J., J. LÁTAL, P. ŠIŠKA, J. SKAPA, M. PÁPEŠ a V. VAŠINEK. Recovery of LED Diode Optical Spectrum. In: *Proceedings of SPIE 8874: Laser Communication and Propagation through the Atmosphere and Oceans II*. Bellingham: SPIE, 2013, s. 88740M-1–88740M-6. ISBN 978-081949724-6. DOI: 10.1117/12.2023862.
73. LATAL, J., J. VITASEK, P. KOUDELKA, P. SISKÁ, A. LINER, M. PÁPES, K. WITAS, S. HEJDUK a V. VASINEK. Rock massif temperature changes measurement with regard to thermal responses generated by a thermal response test device. In: *Proceedings of SPIE: 8774: Optical Sensors*. Bellingham: SPIE, 2013, s. 1–15. ISBN 978-081949576-1. DOI: 10.1117/12.2017241.
74. HEJDUK, S., WITAS, K., LATAL, J., VITASEK, J., BOCHEZA, J. a VASINEK, V. Simple and Universal Current Modulator Circuit for Indoor Mobile Free-Space-Optical Communications Testing. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*. roč. 12, č. 1, 2014, s. 66–74. ISSN 1804-3119. DOI: 10.15598/aeee.v12i1.845.
75. VITASEK, J., SISKÁ, P., KEPÁK, S., CUBIK, J., POBORIL, R. a LATAL, J. VLC Transmitter with Plastic Optical Fibers for Indoor Free Space Optic Networks. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*. roč. 12, č. 6, 2014, s. 617–621. ISSN 1804-3119. DOI: 10.15598/aeee.v12i6.1273.
76. POBORIL, R., SISKÁ, P., LATAL, J., SMRZ, M., CUBIK, J., KEPÁK, S. a VAŠINEK, V. Measuring Optimal Length of the Amplifying Fiber in Different Wor-

- king Conditions of the Amplifier. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, roč. 12, č. 6, 2014, s. 557–566. ISSN 1804-3119. DOI: 10.15598/aeec.v12i6.939.
77. LINER A., F. PERECAR, J. JAROS, M. PAPES, P. KOUDELKA, J. LATAL, J. CUBIK a V. VASINEK. Features and range of the FSO by, use of the OFDM and QAM modulation in different atmospheric conditions. In: *Proceedings of SPIE: 9103, Wireless Sensing, Localization, and Processing IX*. Bellingham: SPIE, 2014, s. 1–10. ISBN 978-162841040-2. DOI: 10.1117/12.2050279.
78. KOUDELKA; P., J. LATAL, P. SISKÁ, J. VITASEK, A. LINER, R. MARTINEK a V. VAŠINEK. Indoor visible light communication: modeling and analysis of multi-state modulation. In: *Proceedings of SPIE: 9224, Laser Communication and Propagation through the Atmosphere and Oceans III*. Bellingham: SPIE, 2014, s. 92241I–92241I-8. ISBN 978-162841251-2. DOI: 10.1117/12.2063090.
79. VANDERKA, A., HAJEK, L., LATAL, J., VITASEK, J. a KOUDELKA, P. Design, Simulation and Testing of the OOK NRZ Modulation Format for Free Space Optic Communication in a Simulation Box. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*. roč. 12, č. 6, 2014, s. 604–616. ISSN 1804-3119. DOI: 10.15598/aeec.v12i6.1255.
80. LINER, A., PAPES, M., JAROS, J., PERECAR, F., HAJEK, L., LATAL, J., KOUDELKA, P. a VASINEK, V. Software Design of SMD LEDs for Homogeneous Distribution of Irradiation in the Model of Dark Room. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*. roč. 12, č. 6, 2014, s. 622–630. ISSN 1804-3119. DOI: 10.15598/aeec.v12i6.1297.
81. HEJDUK, S., WITAS, K., LATAL, J., VITASEK, J. a BOCHEZA, J. Use of the RGBY model for indoor mobile visible light communication. In: *Transparent Optical Networks (ICTON), 2014 16th International Conference on*. Graz: IEEE, 2014, s. 1–4. ISBN 978-147995600-5. DOI: 10.1109/ICTON.2014.6876490.
82. LATAL, J., VITASEK, J., KOUDELKA, P., SISKÁ, P., POBORIL, R., HAJEK, L., VANDERKA, A. a VASINEK, V. Simulation of modulation formats for optical access network based on WDM-PON. In: *Transparent Optical Networks (ICTON), 2014 16th International Conference on*. Graz: IEEE, 2014, s. 1–5. ISBN 978-147995600-5. DOI: 10.1109/ICTON.2014.6876473.
83. VITASEK, J., LEITGEB, E., DAVID, T., LATAL, J. a HEJDUK, S. Misalignment loss of free space optic link. In: *Transparent Optical Networks (ICTON), 2014 16th International Conference on*. Graz: IEEE, 2014, s. 1–5. ISBN 978-147995600-5. DOI: 10.1109/ICTON.2014.6876494.
84. KOUDELKA, P., SOLTYS, P., MARTINEK, R., LATAL, J., SISKÁ, P., KEPÁK, S. a VASINEK, V. Utilization of M-QAM modulation during optical wireless Car to Car communication. In: *OptoElectronics and Communication Conference, OECC 2014 and Australian Conference on Optical Fibre Technology, ACOFT 2014*. Melbourne: IEEE, 2014, s. 452–454. ISBN 978-192210721-3.
85. SISKÁ, P., KOUDELKA, P., LATAL, J., HURTA, J., KEPÁK, S. a VASINEK,

- V. Localization method of illegal service connection into the sewer system using fiberoptic distributed temperature sensing. In: *OptoElectronics and Communication Conference, OECC 2014 and Australian Conference on Optical Fibre Technology, ACOFT 2014*. Melbourne: IEEE, 2014, s. 805–807. ISBN 978-192210721-3.
86. LATAL, J., VANDERKA, A., VITASEK, J., KOUDELKA, P., SISKÁ, P., LINER, A. a VASINEK, V. Experimental measurement of thermal turbulence effects on modulated optical beam in the laboratory. In: *OptoElectronics and Communication Conference, OECC 2014 and Australian Conference on Optical Fibre Technology, ACOFT 2014*. Melbourne: IEEE, 2014, s. 455–457. ISBN 978-192210721-3.
87. HAJEK, L., LATAL, J., BOJKO, M., POBORIL, R., KOUDELKA, P., VITASEK, J., SISKÁ, P. a VASINEK, V. Modelling of airflow in a closed simulation box with regard to atmospheric optical link. In: *8th International Conference on Experimental Fluid Mechanics, EFM 2013*, Kutná Hora: EPJ Web of Conferences, 2014, s. 02032-p.1–02032-p.7. ISBN 978-802605375-0. DOI: 10.1051/epjconf/20146702032.
88. LATAL, J., Petr KOUDELKA, Petr SISKÁ, Jan VITASEK a Vladimír VASINEK. WDM-PON network simulation with different implementation of optical amplifier in the line. In: *Proceedings of SPIE: Vol. 9193, Novel Optical Systems Design and Optimization XVII*. Bellingham: SPIE, 2014, s. 919318-1–919318-14. ISBN 978-162841220-8. DOI: 10.1117/12.2060112.
89. SISKÁ, P., Petr KOUDELKA, Jan LATAL, Jan VITASEK, Stanislav KEPÁK a Vladimír VAŠINEK. Simulation of integrated optical network (IPON) properties. In: *Proceedings of SPIE: Vol. 9193, Novel Optical Systems Design and Optimization XVII*. Bellingham: SPIE, 2014, s. 91931J-1–91931J-10. ISBN 978-162841220-8. DOI: 10.1117/12.2063015.
90. KOUDELKA, P., Petr SISKÁ, Jan LATAL, Radek POBORIL, Lukas HAJEK, Stanislav KEPÁK a Vladimír VASINEK. Security risk assessment of the primary layer of wavelength division multiplexing passive optical network. In: *Proceedings of SPIE: Vol. 9450, Photonics, Devices, and Systems VI*. Bellingham: SPIE, 2015, s. 1–7. ISBN 978-162841566-7. DOI: 10.1117/12.2070468.
91. HRUBY, D., Tomas KAJNAR, Petr KOUDELKA, Jan LATAL, Jan HURTA, Stanislav KEPÁK, Jakub JAROS a Vladimír VASINEK. Measurement of insulation layers using DTS system. In: *Proceedings of SPIE: Vol. 9450, Photonics and Systems VI*. Bellingham: SPIE, 2015, s. 1–9. ISBN 978-162841478-3. DOI: 10.1117/12.2073555.
92. SISKÁ, P., Tomas HLAVINKA, Petr KOUDELKA, Jan LATAL, Jan VITASEK, Lukas HAJEK a Radek POBORIL. RFoG deployment into the next-generation networks. In: *Proceedings of SPIE: Vol. 9388, Optical Metro and Short-Haul VII*. Bellingham: SPIE, 2015, s. 1–10. ISBN: 978-162841478-3. DOI: 10.1117/12.2087121.
93. VASINEK, V., Petr SISKÁ, Lukas BEDNAREK, Jan LATAL, Petr KOUDELKA a Ondřej MARCINKA. Ageing of fiber optical devices. In: *Proceedings of SPIE: Vol. 9389, Next-Generation: Components, Sub-Systems, and Systems IV*. Bellingham:

- SPIE, 2015, s. 1–5. ISBN 978-162841479-0. DOI: 10.1117/12.2087165.
94. KAJNAR, T., Jan LATAL, Marcel FAJKUS, David HRUBY, Stanislav KEPAK a Vladimír VASINEK. Study of the effect of temperature on the optical connectors. In: *Proceedings of SPIE: Vol. 9450, Photonics, Devices, and Systems VI*. Bellingham: SPIE, 2015, s. 1–9. ISBN 978-162841566-7. DOI: 10.1117/12.2070326.

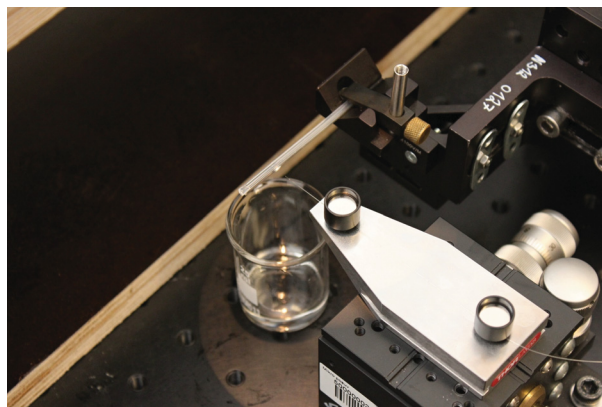
SEZNAM PŘÍLOH

A Fotografie z měření	179
B Simulace dalších typů optických segmentových vysílačů	185

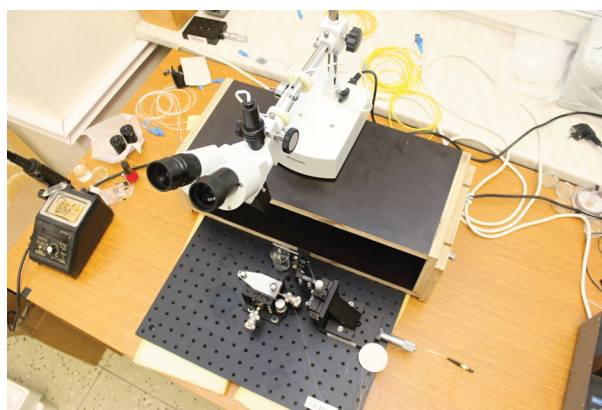
A FOTOGRAFIE Z MĚŘENÍ



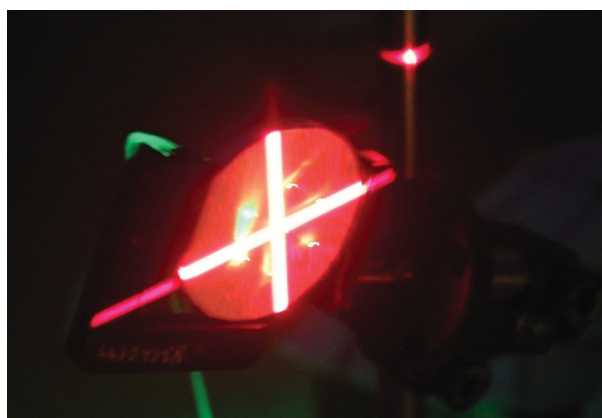
Obr. A.1: Pracoviště pro vrtání otvorů do výřezu z polystyrénu pro uchycení optických vláken v rámci segmentu



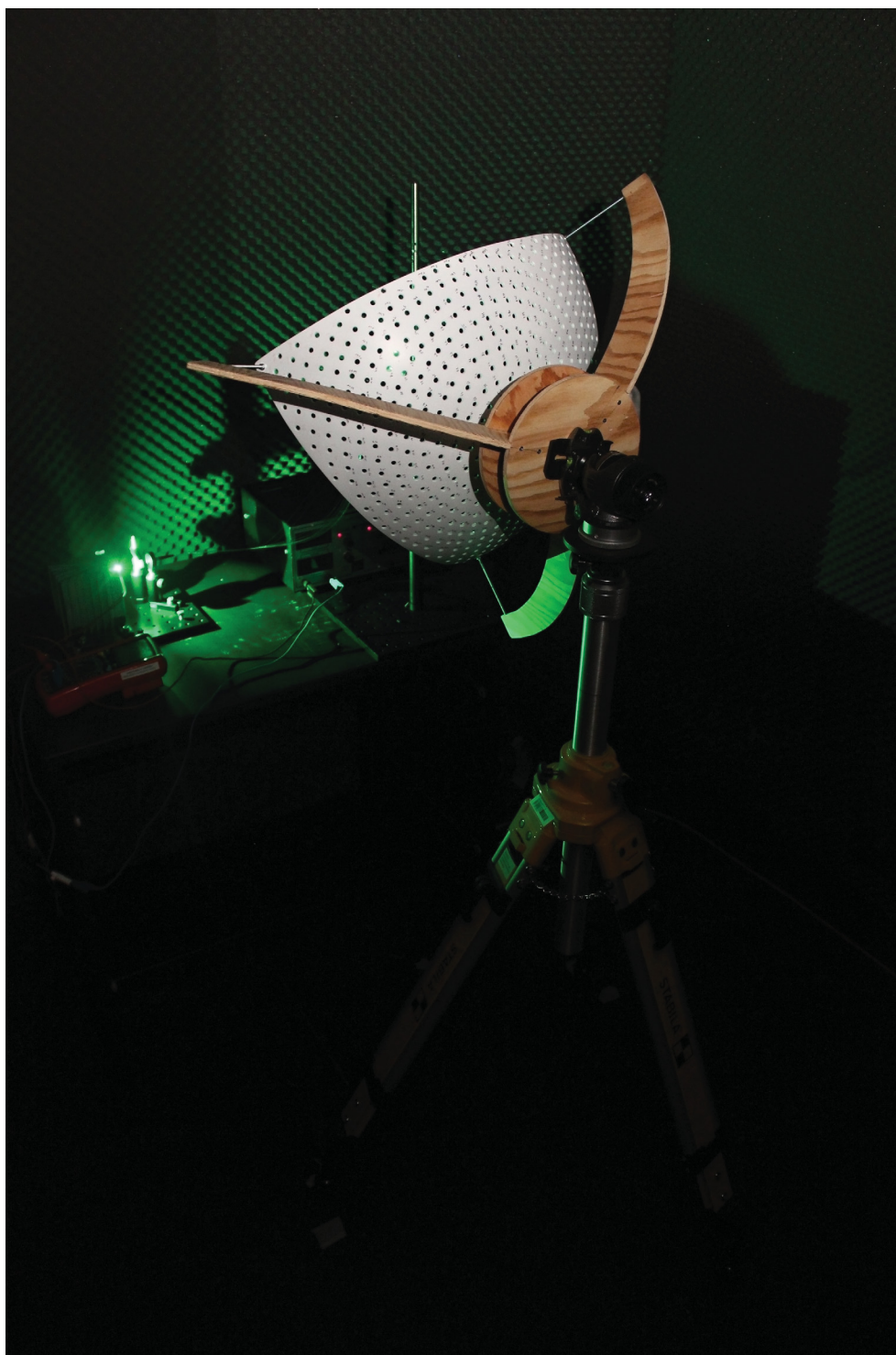
Obr. A.2: Detail na pracoviště pro nanášení PDMS na rovinné konce optických vláken



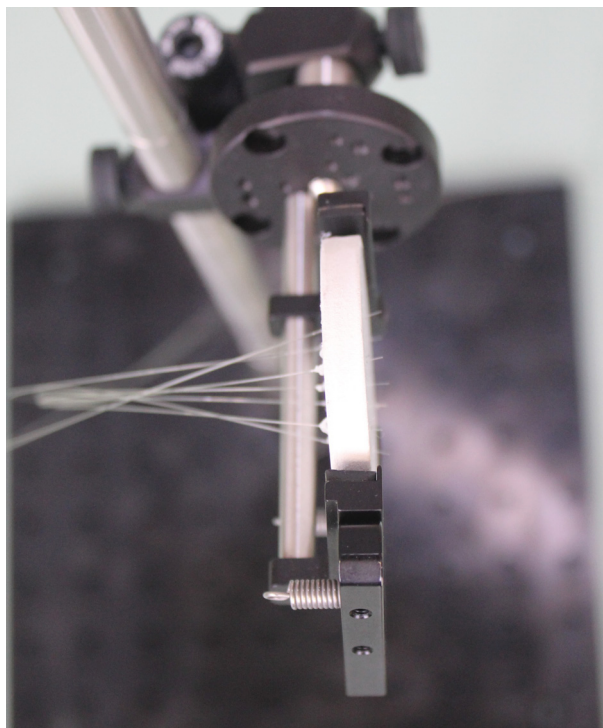
Obr. A.3: Celkový pohled na pracoviště pro nanášení PDMS na rovinné konce optických vláken



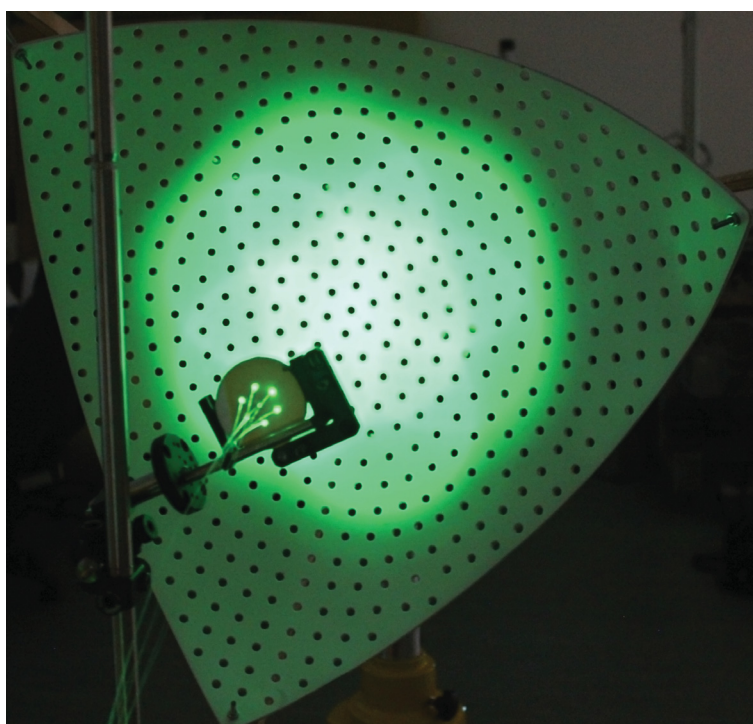
Obr. A.4: Vystředování prototypu segmentu optického vysílače se 7 vlákny vůči středu osminy koule pomocí laseru



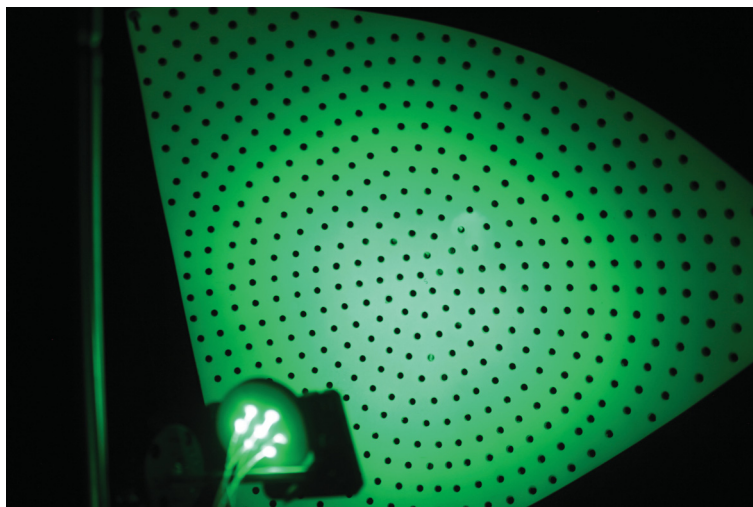
Obr. A.5: Sestrojené pracoviště s 1/8 koule připevněnou na stativ STABILA 18194 pro měření optického výkonu



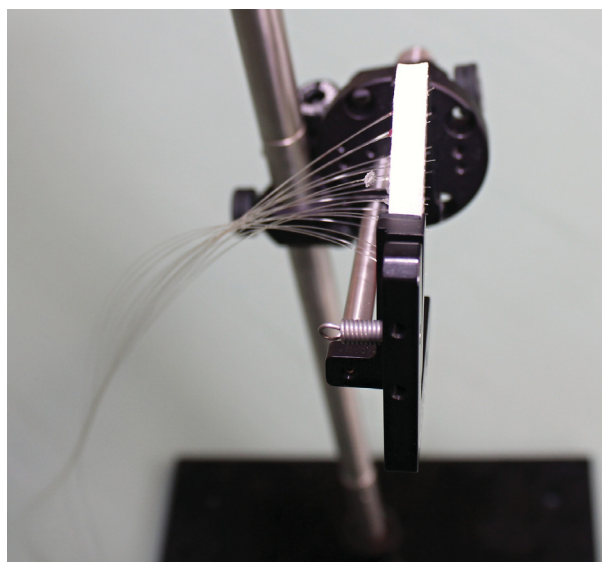
Obr. A.6: Boční pohled na prototyp optického vysílače tvořeného 7 optickými vlákny



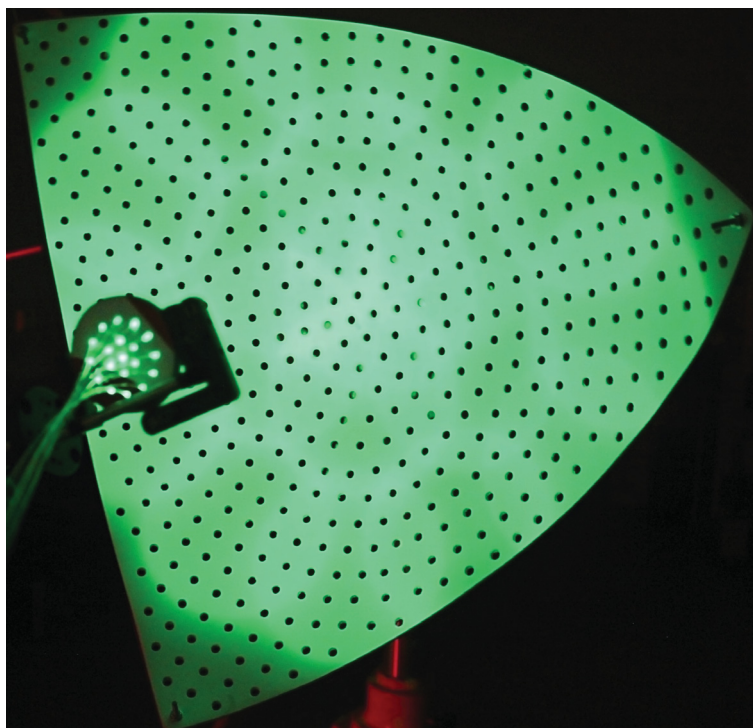
Obr. A.7: Fotografie z měření rozložení optického výkonu na osmině koule pro optický vysílač tvořený 7 optickými vlákny bez čoček



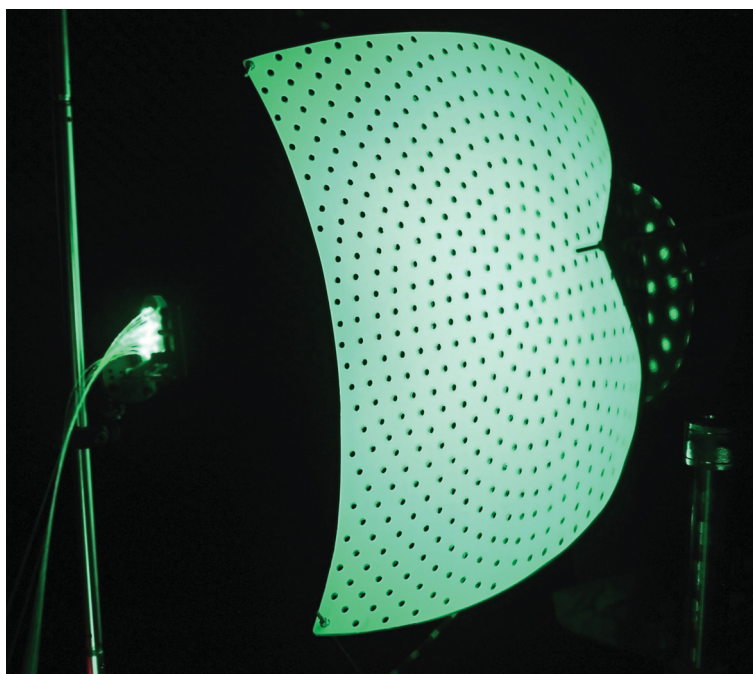
Obr. A.8: Fotografie z měření rozložení optického výkonu na osmině koule pro optický vysílač tvořený 7 optickými vlákny s čočkami



Obr. A.9: Boční pohled na prototyp optického vysílače tvořeného 19 optickými vlákny



Obr. A.10: Fotografie z měření rozložení optického výkonu na osmině koule pro optický vysílač tvořený 19 optickými vlákny bez čoček

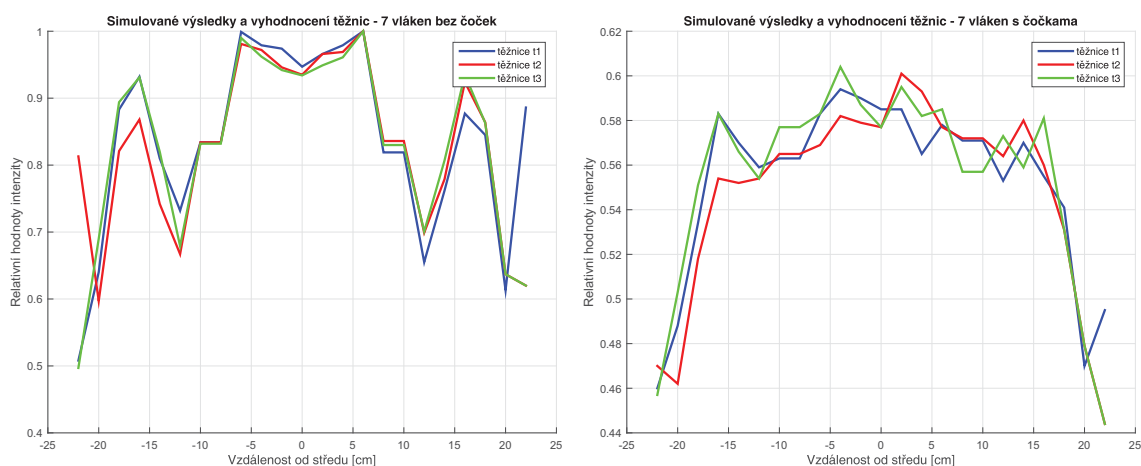


Obr. A.11: Fotografie z měření rozložení optického výkonu na osmině koule pro optický vysílač tvořený 19 optickými vlákny s čočkami

B SIMULACE DALŠÍCH TYPŮ OPTICKÝCH SEGMENTOVÝCH VYSÍLAČŮ

V rámci práce jsou uvedeny ještě dvě varianty návrhu optických segmentových vysílačů, které se liší od sebe nastavení podmínek pro vychýlení vláken v segmentu. Cílem návrhu těchto typů optických vysílačů je pak poukázat na jiné přístupy při řešení problematiky dosažení rovnoměrné distribuce optické intenzity na ploše osminy koule se splněním kritéria, kdy míra kolísání hustoty optického výkonu nepřesáhne 3 dB. Jak již bylo uvedeno v práci, tak byla zvolena kulová plocha pro vyhodnocení a měření, což má své důsledky vůči měření. Vlivem již uvedených informací se nepodařilo technologickým zázemím vyrobit prototypy optických segmentových vysílačů s tím, že by měli stejně jako měřená plocha kulové zarovnání vláken v segmentu. To by pak zaručovala jednotné podmínky pro měření a vyhodnocení. Nicméně, jelikož byl k dispozici silný výkonný softwarový nástroj v podobě aplikace LightTools, byla provedena simulace návrhu prototypu optických vysílačů zarovnaných do oblouku při umístění vláken do segmentu tvořeného 7 či 19 optickými vlákny. Rozdíl mezi simulacemi pak spočívá v úhlu vychýlení optických vláken, ať už v vnitřním či vnějším kruhu.

Pro první variantu simulace optického vysílače tvořeného 7 optickými vlákny bez čoček bylo zjištěno za pomoci optimalizace v softwaru, že vnitřní kruh tvořený 6 optickými vlákny je vychýlen vůči středovému vláknu o hodnotu $29,8^\circ$ a s umístěním čoček pak je úhel vychýlení optických vláken $30,5^\circ$, kdy délka simulovaných vláken je nastavena na 5 mm. Na obrázku B.1 níže pak můžeme pozorovat řezy přes těžnice v rámci osminy koule pro optický segmentový vysílače tvořený 7 optickými vlákny bez B.1(a) a s umístěním

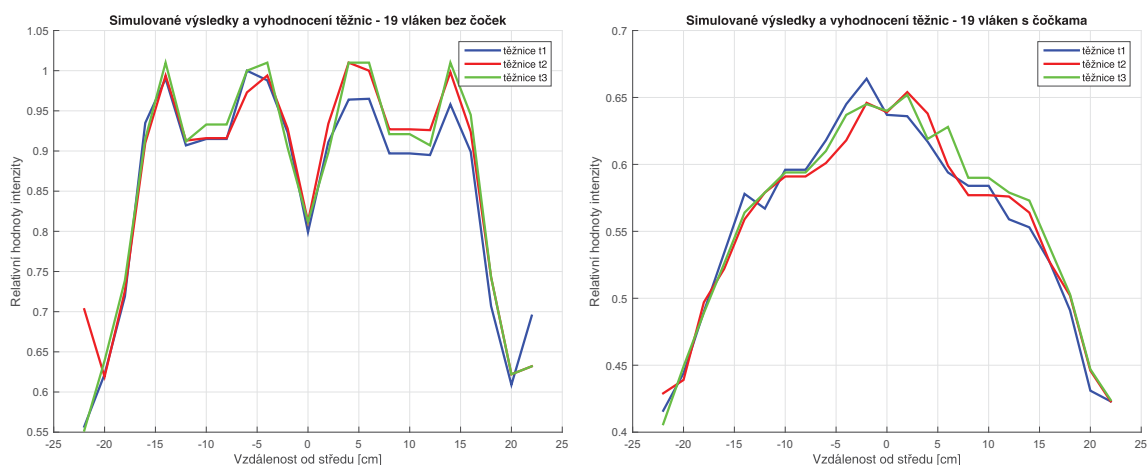


(a) Výsledky optické intenzity pro těžnice t_1 , t_2 a t_3 bez umístěných čoček (b) Výsledky optické intenzity pro těžnice t_1 , t_2 a t_3 s umístěnými čočkami

Obr. B.1: Výsledky ze simulací rozložení optické intenzity pro těžnice (t_1 , t_2 a t_3) pro 7 vláken bez a s čočkami při zarovnání do oblouku

čoček B.1(b) při zarovnání do oblouku vůči kulové ploše osminy koule. Hodnoty optické intenzity jsou převedeny na relativní hodnoty. Z obrázku B.1(a) můžeme pozorovat značné změny rozložení optické intenzity na osmině koule pro měřené body vzdalující se o středu osminy koule v řezech po těžnicích (t_1 , t_2 a t_3) pro rovné zakončení optických vláken. Pro situaci, kdy jsou umístěny čočky B.1(b) na konce optických vláken pro segment tvořený 7 optickými vlákny došlo ke zlepšení kolísání intenzity u řezů křivek po těžnicích pro osminu koule. Jak můžeme pozorovat je splněna podmínka dosažení rovnoměrné distribuce optické intenzity na ploše osminy koule, kdy míra kolísání hustoty optického výkonu nepřesáhne 3 dB pro segment tvořený 7 optickými vlákny bez a s umístěním čoček na konce optických vláken pro zarovnání do oblouku.

Druhá varianta simulace optického vysílače byla tvořena 19 optickými vlákny bez čoček a s čočkami. Při simulacích bylo zjištěno, že pro rovné zakončení optických vláken má vnitřní kruh tvořený 6 optickými vlákny úhel vychýlení vůči středovému vláknu o hodnotu $16,6^\circ$ a vnější kruh tvořený 12 optickými vlákny $32,4^\circ$. Pro segment tvořený 19 optickými vlákny s umístěním čoček na konce optických vláken pak byly úhly pro vychýlená vlákna vůči středovému ve vnitřním kruhu o hodnotu $14,8^\circ$ a vnější kruh tvořený 12 optickými vlákny $33,5^\circ$. Délka simulovaných vláken je nastavena na 5 mm. Na obrázku B.2 níže pak můžeme pozorovat řezy přes těžnice v rámci osminy koule pro optický segmentový vysílače tvořený 19 optickými vlákny bez B.2(a) a s umístěním čoček B.2(b) při zarovnání do oblouku vůči kulové ploše osminy koule. Hodnoty optické intenzity jsou převedeny na relativní hodnoty. Z obrázku B.2(a) můžeme pozorovat kolísání rozložení optické intenzity na osmině koule pro měřené body vzdalující se o středu osminy koule, ale i ve středu. Stejně jako v případě návrhu modelů při zarovnání vláken do roviny dochází k poklesu



(a) Výsledky optické intenzity pro těžnice t_1 , t_2 a t_3 bez umístěných čoček (b) Výsledky optické intenzity pro těžnice t_1 , t_2 a t_3 s umístěnými čočkami

Obr. B.2: Výsledky ze simulací rozložení optické intenzity pro těžnice (t_1 , t_2 a t_3) pro 19 vláken bez a s čočkami při zarovnání do oblouku

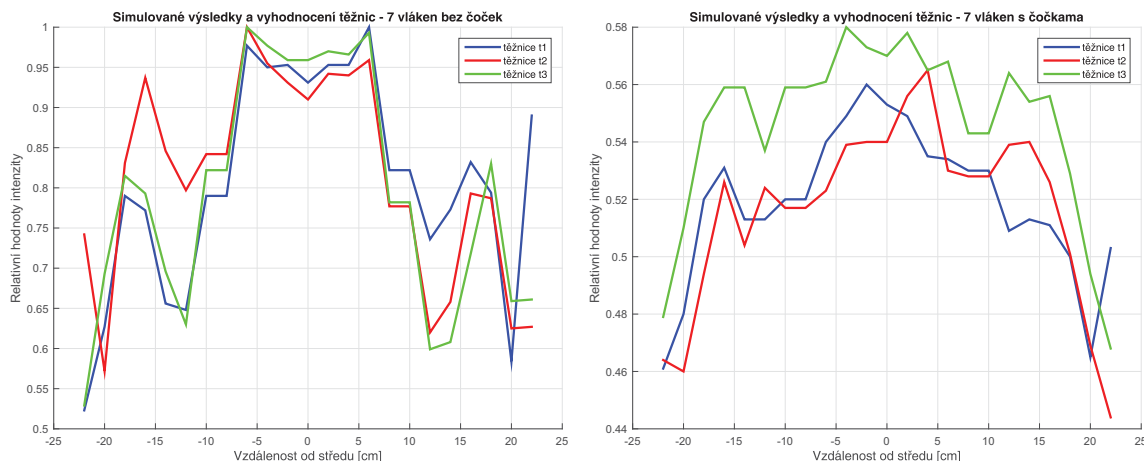
Tab. B.1: Úhly vychýlení pro optická vlákna pro segment tvořený 7 optickými vlákny

Označení uspořádání vlákna	Úhly vychýlení pro vlákna (°)	
	Bez čoček	S čočkami
01	27,0	32,1
02	30,4	32,3
03	32,4	34,0
04	30,2	32,5
05	31,6	30,5
06	33,1	31,9

ve středu osminy koule v měřeném bodě po řezech těžnic t_1 , t_2 a t_3 . Pro situaci, kdy jsou umístěny čočky na konce optických vláken pro segment tvořený 19 optickými vlákny došlo ke zlepšení kolísání intenzity u řezů křivek po těžnicích pro osminu koule nicméně dominantní maximum uprostřed osminy koule zcela potlačeno nebylo. Ze simulací pak lze konstatovat, že je splněna podmínka dosažení rovnoměrné distribuce optické intenzity na ploše osminy koule, kdy míra kolísání hustoty optického výkonu nepřesáhne 3 dB.

Předcházející simulační varianty návrhu optických segmentových vysílačů uvažovali stejné úhly vychýlených optických vláken ve vnitřním či vnějším kruhu podle počtu použitých vláken v segmentu optického vysílače tvořeného tedy 7 či 19 vlákny při zarovnání konců optických vláken do oblouku vůči osmině koule. Cílem dalších návrhů optických segmentových vysílačů pak je optimalizovat úhly vychýlení pro všechna optická vlákna v rámci použitého segmentu tvořeného 7 či 19 optickými vlákny pro dosažení rovnoměrné distribuce optické intenzity na ploše osminy koule, kdy míra kolísání hustoty optického výkonu nepřesáhne 3 dB. Délka simulovaných vláken je nastavena na 5 mm. Po optimalizaci v softwarové aplikaci LightTools byly vypočteny úhly pro jednotlivá optická vlákna pro segment optického vysílače tvořený 7 optickými vlákny bez a s umístěním čoček. Uspořádání a označení jednotlivých vláken můžeme vidět na obrázku 13.1. Jednotlivé úhly vychýlení jednotlivých optických vláken vůči středovému vláknu pro segment optického vysílače tvořený 7 optickými vlákny bez a s umístěním čoček je shrnuto v tabulce B.1

Na obrázku B.3 níže pak můžeme pozorovat řezy přes těžnice v rámci osminy koule pro optický segmentový vysílače tvořený 7 optickými vlákny při různých stupních vychýlení optických vláken ke středovému bez B.3(a) a s umístěním čoček B.3(b) při zarovnání do oblouku vůči kulové ploše osminy koule. Hodnoty optické intenzity jsou převedeny na relativní hodnoty. Z obrázku B.3(a) můžeme pozorovat značné změny rozložení optické intenzity na osmině koule pro měřené body vzdalující se o středu osminy koule v řezech po těžnicích (t_1 , t_2 a t_3) pro rovné zakončení optických vláken. Pro situaci, kdy jsou umístěny čočky B.3(b) na konce optických vláken pro segment tvořený 7 optickými vlákny došlo k částečnému zlepšení kolísání intenzity u řezů křivek po těžnicích pro osminu koule. Těžnice t_3 , která je středovou těžnicí půlí osminu koule pozorujeme odchylku relativních hodnot



(a) Výsledky optické intenzity pro těžnice t_1 , t_2 a t_3 bez umístěných čoček (b) Výsledky optické intenzity pro těžnice t_1 , t_2 a t_3 s umístěnými čočkami

Obr. B.3: Výsledky ze simulací rozložení optické intenzity pro těžnice (t_1 , t_2 a t_3) pro 7 vláken bez a s čočkami při zarovnání do oblouku

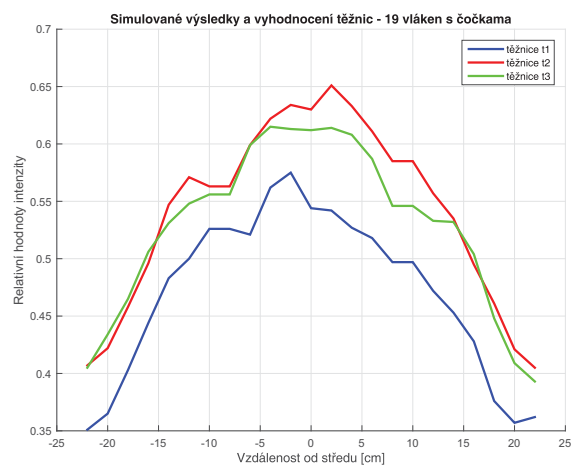
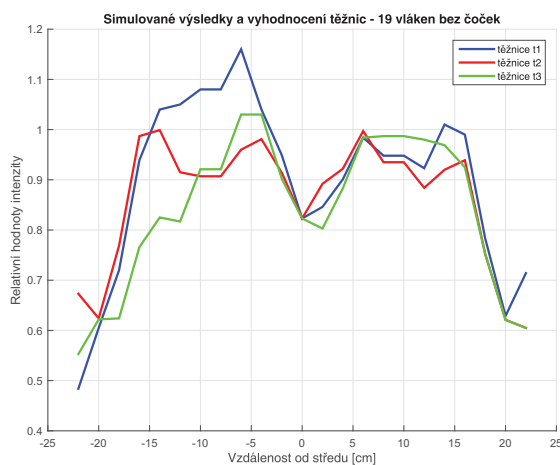
optické intenzity po řezu těžnicí. Nicméně můžeme pozorovat, že je splněna podmínka dosažení rovnoměrné distribuce optické intenzity na ploše osminy koule, kdy míra kolísání hustoty optického výkonu nepřesáhne 3 dB pro segment tvořený 7 optickými vlákny bez a s umístěním čoček na konce optických vláken pro zarovnání do oblouku.

Poslední varianta simulace a optimalizace v softwarové aplikaci LightTools byla zaměřena na výpočet úhlů pro jednotlivá optická vlákna pro segment optického vysílače tvořený 19 optickými vlákny bez a s umístěním čoček. Uspořádání a označení jednotlivých vláken můžeme vidět na obrázku 13.1. Jednotlivé úhly vychýlení jednotlivých optických vláken vůči středovému vláknu pro segment optického vysílače tvořený 19 optickými vlákny bez a s umístěním čoček je shrnuto v tabulce B.2

Na obrázku B.4 níže pak můžeme pozorovat řezy přes těžnice v rámci osminy koule pro optický segmentový vysílače tvořený 19 optickými vlákny bez B.4(a) a s umístěním čoček B.4(b) při zarovnání do oblouku vůči kulové ploše osminy koule pro různě vychýlená optická vlákna v segmentu. Hodnoty optické intenzity jsou převedeny na relativní hodnoty. Z obrázku B.4(a) můžeme pozorovat kolísání rozložení optické intenzity na osmině koule pro měřené body na osmině koule. Zajímavé je pak chování středového vlákna, které vykazuje nižší relativní hodnotu optické intenzity. Při umístění čoček na konce optických vláken pro segment tvořený 19 optickými vlákny došlo ke zlepšení kolísání hustoty optického výkonu u řezů křivek po těžnicích pro osminu koule nicméně dominantní maximum uprostřed osminy koule zcela potlačeno nebylo. Ze simulací pak lze konstatovat, že je splněna podmínka dosažení rovnoměrné distribuce optické intenzity na ploše osminy koule, kdy míra kolísání hustoty optického výkonu nepřesáhne 3 dB.

Tab. B.2: Úhly vychýlení pro optická vlákna pro segment tvořený 19 optickými vlákny

Označení uspořádání vlákna	Úhly vychýlení pro vlákna (°)	
	Bez čoček	S čočkami
01	16,7	16,3
02	16,1	16,2
03	17,8	16,9
04	14,3	14,5
05	20,0	14,0
06	19,5	14,4
001	27,8	39,8
002	31,8	41,0
003	34,8	36,4
004	29,5	28,4
005	35,7	36,3
006	34,5	36,5
012	34,3	25,3
016	33,4	47,7
023	44,3	36,3
045	35,8	46,4
034	22,5	27,2
065	29,1	34,6



(a) Výsledky optické intenzity pro těžnice t_1 , t_2 a t_3 bez umístěných čoček (b) Výsledky optické intenzity pro těžnice t_1 , t_2 a t_3 s umístěnými čočkami

Obr. B.4: Výsledky ze simulací rozložení optické intenzity pro těžnice (t_1 , t_2 a t_3) pro 19 vláken bez a s čočkami při zarovnání do obluku