



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

Vysílače pro bezvláknové optické difúzní sítě

Transmitters for fiberless optical diffusive networks

DISERTAČNÍ PRÁCE
DISSERTATION THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. Stanislav Hejduk

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.

OSTRAVA, 2017

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá mobilními bezvláknovými optickými komunikacemi. V rámci této rozsáhlé problematiky je práce zaměřena primárně na využití komunikace pomocí nově navrhovaného modelu RGBY. Ten umožňuje komunikaci pomocí 4 různých vlnových délek ve viditelném světelném spektru současně a přitom zachovává na výstupu bílé světlo, které může současně sloužit pro potřeby osvětlování. Přenos dat pomocí bezdrátových technologií v současnosti představuje významnou oblast vědeckého zájmu. Požadavky na mobilitu a objemy přenášených dat se u koncových uživatelů každým dnem zvyšují. Díky velké hustotě zalidnění se ve městech dostává rádiová komunikace na hranici svých přenosových schopností. Velikost buněk mobilních operátorů se neustále zmenšuje, aby obsáhla rostoucí počet mobilních koncových zařízení. Možnosti připojení pomocí bezdrátových rádiových technologií začínají být, především v pásmu 2,4 GHz, výrazným problémem. V pokrývaných oblastech bývá ve většině případů více přístupových bodů než dostupných kanálů. To způsobuje, že se kanály začínají opakovat a vzájemně se tak rušit. Neustále se tak zvyšuje potřeba dalších komunikačních technologií, které by dokázaly eliminovat problémy s rušením a poskytovaly vysoké přenosové rychlosti při zachování mobility.

Jednou z možností řešení se ukazuje právě využití bezvláknových optických sítí, které poskytují transportní nezávislost, pracují v bezlicenčním pásmu a se současným rozvojem LED technologií je lze snadněji implementovat pro potřeby koncových uživatelů.

Aktuálně navrhované možnosti komunikačního systému pomocí bílých LED, nebo kombinace barev RGB se ukázaly jako nedostatečné, takže byla pro komunikaci dodatečně přidána ještě barva žlutá. Výstupem je komunikační model RGBY, který lépe využívá rozsah viditelného spektra a umožňuje vytvářet buňkové systémy pro pokrývání větších prostorů. Teoretická část práce se zabývá základy systémů komunikací ve viditelném spektru (VLC), jejich možnostmi, problémy a využitím. Praktická část pak klade důraz na návrh RGBY komunikačního systému a jeho realizaci pro potřeby ověření použitelnosti v reálných podmínkách.

KLÍČOVÁ SLOVA

Fotodetektory, komunikace ve viditelném spektru, LED, OOK, optické filtry, optické spektrum, RGB, RGBY, VLC, 802.15.7.

ABSTRACT

This work deals with mobile fiberless optical communications. Due to the huge area of this technology, this work is primarily focused on use of the RGBY model. This model can communicate with 4 separate wavelengths in visible spectrum and keep white light at the output, so it can be used also for illumination purposes. Wireless data transmission is a huge area of interest today. The demand of user mobility and amount of transmitted data is increasing every day. Due to the high density of city population are radio technologies on the edge of the usability. The cell sizes of mobile operators are steadily decreasing to obtain the growing numbers of mobile phone users. Connecting via Wi-Fi is nowadays the significant problem, especially in 2,4 GHz band. Number of access points in the areas is usually higher than number of available channels. This leads to problem that channels are starting to repeat and mutually interfere with each other. Need for other technologies, that could eliminate this problems are constantly increasing. One of possible solutions are fiberless optical networks, which offers communication transparency, unlicensed band and thanks to the actual development of LED technologies also easier implementation to users needs. Instead of white LEDs this work uses multiple individual colors and diffuser to create white light. The current system capabilities with use of RGB (red, green and blue) model are insufficient so the system was extended with yellow. As a result we get RGBY system which better utilizes the visible spectrum and it is capable to create huge cellular systems for wide area coverage. Theoretical part of this work deals with the theory of visible light communication systems (VLC), their possibilities, challenges and applications. The practical part is focused on the design of RGBY communication system and its realization. In the final part the system functionality in the real conditions is validated.

KEYWORDS

Fotodetectors, visible light communications, LED, OOK, optical filters, optical spectrum, RGB, RGBY, VLC, 802.15.7.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem svou disertační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího disertační 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 disertační práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této disertační 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

Na tomto místě bych rád poděkoval za podporu všem, díky kterým mohla tato práce vzniknout. Vedoucímu disertační práce panu prof. RNDr. Vladimíru Vašinkovi, CSc., za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále bych chtěl poděkovat rodině, přátelům za podporu a toleranci, zvláště při dokončování této disertační práce. A dále také vědeckým grantům: CZ.1.07/2.3.00/20.0217, SP2011/47, SP2012/160, SP2012/165, SP2013/69, SP2013/88, SP2014/77, SP2014/147, SP2015/130, SP2015/182, SP2016/151, SP2016/149, TA03020439, TA04021263, VG20102015053, VI20172019071, díky kterým mohla tato práce vzniknout.

Ostrava

.....

(podpis autora)

OBSAH

1 Úvod	12
1.1 Cíle disertační práce	13
2 Bezvláknové optické sítě	14
2.1 Základní schéma systému	15
2.1.1 Atmosféra	16
2.1.2 Zdroje světelného záření	17
2.1.3 Fotodetektory	21
2.2 Bezvláknové optické systémy ve viditelném spektru	25
2.2.1 Li-Fi	27
2.2.2 V2x	28
2.2.3 Navigace uvnitř budov	29
2.2.4 IEEE 802.15.7	29
3 Navrhovaný systém RGBY	35
3.1 Současná řešení	35
3.1.1 Bílé LED	36
3.1.2 RGB LED	37
3.2 Podstata RGBY	38
3.2.1 Kompatibilita s ostatními systémy	39
3.2.2 Pokrývání prostoru – buňkový systém	40
3.2.3 Princip konstrukce	41
3.2.4 Výpočet pokrytí prostoru	42
3.3 Bezporuchovost a RGBY	45
3.3.1 Definice veličin	46
3.3.2 Výpočet bezporuchovosti	47
4 Pokrytí prostoru	51
4.1 Způsoby pokrytí prostoru	51
4.2 Vícecestné šíření světla	53
4.3 Měření a simulace v pokrývaném prostoru	55
4.3.1 Temná místnost	55
4.3.2 Porovnání výsledků ze simulací a vztahy mezi jednotkami	60
4.3.3 Výsledky simulací pro složitější konfigurace	61
5 Vytvoření bílé barvy pomocí RGBY	67
5.1 Funkce difuzoru	72
5.2 Konstrukce pomocí samostatných LED	74
5.3 Konstrukce pomocí RGBY LED na společném čipu	77

6	Návrh elektronických obvodů pro testování	79
6.1	Návrh modulátoru	79
6.1.1	Proudový zdroj s bipolárním tranzistorem	79
6.1.2	Chování LED při OOK	82
6.2	Konstrukce vysílací části	84
6.2.1	Obvody pro implementaci kódování Manchester	84
6.2.2	Výsledné zapojení vysílací části	85
6.3	Konstrukce přijímací části systému	86
6.3.1	Obvody fotodetektoru	86
6.3.2	Výsledné zapojení přijímací části	89
7	Testování komunikačních parametrů	90
7.1	Interference komunikačních kanálů na shodné vlnové délce	90
7.2	Komunikace při pohybu přijímače	93
7.3	Filtry	94
7.3.1	Filtry z akrylátového skla	95
7.3.2	Dielektrické filtry	97
7.3.3	Podmínky nerušené komunikace	100
7.4	Komunikační vzdálenosti	100
7.4.1	Napěťové úrovně na fotodetektoru	100
7.4.2	Komunikační vzdálenosti	101
7.4.3	Výkonová bilance	103
8	Závěr	105
	Literatura	107
	Publikační činnost	111

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Blokové schéma ideálního bezvláknového optického komunikačního systému.	15
2.2	Příklad reálného bezvláknového optického komunikačního systému.	16
2.3	Spektrální propustnost atmosféry (%) pro $L=1800\text{m}$	17
2.4	Viditelné spektrum elektromagnetického světelného záření [27].	18
2.5	Závislost materiálového složení LED a napájecího napětí.	18
2.6	VA charakteristiky LED diod (propustný směr) [46].	19
2.7	VA charakteristiky LED (a) - VA charakteristiky LED, b) - náběžná a sestupná hrana, c) - modulace).	20
2.8	Šířka spektrální čáry - FWHM.	20
2.9	Obecné schéma fotodetektoru.	21
2.10	Volt-ampérové charakteristiky křemíkové fotodiody a závislost kapacity PN přechodu na sériovém odporu a závěrném napětí [45].	23
2.11	Spektrální citlivost typických fotodiody a materiálů [45].	24
2.12	Princip Li-Fi - Atto buňky [38].	27
2.13	Příklady V2V komunikace (vlevo) a V2I komunikace (vpravo).	28
2.14	Frekvenční spektrum jednotlivých fyzických vrstev 802.15.7.	29
2.15	Princip kódování Manchester.	30
2.16	Konstelační diagram pro 4CSK [2].	33
3.1	Princip fungování RGBY systému.	35
3.2	Způsob vytváření bílého světla pro Bílou LED (vlevo) a RGB LED (vpravo).	36
3.3	Adaptivní míchání barev s RGB LED.	37
3.4	Barevný diagram podle CIE 1931 vs. záření černého tělesa. [32]	38
3.5	Porovnání spekter (A: denní světlo, B: bílá LED, C: RGB LED, D: RGBY LED).	39
3.6	Rušení v buňkovém systému: Bílá LED (A), RGBY (B), Dynamické přidělování RGBY (C).	41
3.7	Blokové schéma RGBY systému. [65]	42
3.8	Optický bezvláknový kanál.	42
3.9	Výkonové hodnoty na fotodetektoru v závislosti na vzdálenosti a vyzařovacím úhlu vysílače (10° , 60° a 120°).	44
3.10	Blokové schéma RGBY systému pro bezporuchovost.	47
3.11	Grafy průběhu pravděpodobnosti poruchy pro bílé a barevné LED s teplotou.	49
3.12	Blokové schéma paralelního RGBY systému pro bezporuchovost.	49
3.13	Porovnání vlivu sériového zapojení bílých LED na průběh pravděpodobnosti poruchy.	50
4.1	Možnosti pokrytí prostoru v bezvláknových optických sítích.	51
4.2	Způsoby pokrytí při zachování LOS.	52
4.3	Způsoby pokrytí bez zachování LOS.	53

4.4	Popis vzniku paprskové disperze vlivem vícecestného šíření signálu [19].	54
4.5	Měření v temné místnosti.	56
4.6	Konfigurace osvětlení pro měření v temné místnosti.	56
4.7	Výsledky měření pro výkonovou LED (SPL-NPW5-273).	58
4.8	Výsledky měření pro LED pásek (30ks G-M5050RGB-0).	58
4.9	Výsledky simulací pro výkonovou LED (SPL-NPW5-273).	59
4.10	Výsledky simulací pro osvětlení LED páskem (30ks G-M5050RGB-0).	59
4.11	Porovnání měřených a simulovaných hodnot pro výkonovou LED (SPL-NPW5-273).	60
4.12	Porovnání měřených a simulovaných hodnot pro LED pásek (30ks G-M5050RGB-0).	60
4.13	Konfigurace s použitím výkonových LED diod.	62
4.14	Výsledky pro konfiguraci 4.13a.	62
4.15	Výsledky pro konfiguraci 4.13b.	63
4.16	Výsledky pro konfiguraci 4.13c.	63
4.17	Konfigurace s použitím LED pásků.	64
4.18	Výsledky pro konfiguraci 4.17a.	64
4.19	Výsledky pro konfiguraci 4.17b.	65
4.20	Výsledky pro konfiguraci 4.17c.	65
4.21	Výsledky simulací pro výpadek jednoho vysílače/svítidla.	66
5.1	Samostatná spektra RGBY LED vysílače (LED dioda WL-BRYG2A140-001)	67
5.2	Porovnání součtu RGBY spektra (WL-BRYG2A140-001) s denním světlem.	68
5.3	Úrovně RGBY pro různé barevné teploty (WL-BRYG2A140-001).	69
5.4	Úrovně RGB pro různé barevné teploty (WL-BRYG2A140-001).	69
5.5	Výsledky ze spektrometru pro RGBY při 3000 K.	70
5.6	Výsledky ze spektrometru pro RGBY při 5500 K.	71
5.7	Výsledky ze spektrometru pro RGBY při 5952 K (stejně velké budící proudy).	71
5.8	Ladění teploty barvy pouze pomocí Y (žluté složky).	72
5.9	Princip vzniku barevných stínů při míchání barev.	72
5.10	Princip vzniku barevných stínů při smíchání RGBY barev.	73
5.11	Princip míchání barev za pomoci difuzoru.	73
5.12	Konstrukce RGBY svítidla - přestavba stávajícího zdroje osvětlení výměnou LED.	74
5.13	Samostatné LED bez difuzoru.	75
5.14	Samostatné LED s difuzorem.	75
5.15	Samostatné LED s kolimátorem.	76
5.16	Samostatné LED s kolimátorem a difuzorem.	76
5.17	Graf pro srovnání intenzit osvětlení pro konfigurace samostatných LED.	77
5.18	RGBY výkonová LED (WL-BRYG2A140-001).	77
5.19	Samostatný RGBY LED čip.	78

5.20	RGBY LED čip s difuzorem.	78
6.1	Schéma zapojení jednoduchého proudového modulátoru.	80
6.2	Průběhy napětí a výstupního signálu při spínání LED diody.	80
6.3	Porovnání vlivu kompenzačního kondenzátoru.	81
6.4	Vliv nastavení pracovního bodu na frekvenční charakteristiky.	81
6.5	Průběhy amplitudy signálu a intenzity osvětlení pro RGB LED pásek. . . .	83
6.6	LED zdroje světla s výkonovými LED. (svítidlo VO - THORN s výkonem 80W a COB LED reflektor 20W).	83
6.7	Průběhy amplitudy signálu a intenzity osvětlení pro svítidlo VO (výkonové LED).	84
6.8	Průběhy amplitudy signálu a intenzity osvětlení pro COB LED 20W. . . .	84
6.9	Princip kódování diferenciální Manchester.	84
6.10	Struktura datové sekvence vysílaná obvodem CTR124 [52].	85
6.11	Schéma zapojení vysílací části s kódováním Manchester.	86
6.12	Možnosti zapojení obvodů fotodetektorů.	86
6.13	Průběh detekce signálu.	87
6.14	Obvody navrženého fotodetektoru.	88
6.15	Zapojení přijímací části navrhovaného systému.	89
7.1	Příklad komunikace s překryvem pokrývaných oblastí.	90
7.2	Příklad komunikace bez překryvu pokrývaných oblastí.	91
7.3	Detekovaný signál pro 50 a 150 cm. (Kanál1,2 = LED1,2; K.3 = Fotodetektor).	92
7.4	Detekovaný signál pro 80 a 120 cm. (Kanál1,2 = LED1,2; K.3 = Fotodetektor).	92
7.5	Detekovaný signál pro 90 a 100 cm. (Kanál1,2 = LED1,2; K.3 = Fotodetektor).	92
7.6	Vypočtené a naměřené hodnoty pro pokrývanou oblast.	94
7.7	Filtry z akrylátového skla.	96
7.8	Spektrální charakteristiky filtrů z akrylátového skla.	96
7.9	Filtrační vlastnosti akrylátového skla pro RGBY model.	97
7.10	Dielektrické filtry Thorlabs. (FB590-10, FL532-10, FB650-40 a FB450-40). . . .	97
7.11	Spektrální charakteristiky filtrů Thorlabs.	98
7.12	Filtrační vlastnosti filtrů THORLABS pro model RGBY.	98
7.13	Spektra LED diod měřených pro možnost použití v RGBY modelu.	99
7.14	Vyhodnocení komunikačních vzdáleností pro jednotlivé filtry Thorlabs. . .	102
7.15	Geometrie komunikační vzdálenosti a pokrytého prostoru.	102
7.16	Poloměry pokrývaných oblastí pro RGBY LED.	103
7.17	Porovnání intenzit osvětlení pro RGBY a bílou LED (W).	104

SEZNAM TABULEK

2.1	Kódovací tabulka 4B6B.	31
2.2	Operační rychlosti 802.15.7 - PHY I.	32
2.3	Operační rychlosti 802.15.7 - PHY II.	32
2.4	Operační rychlosti 802.15.7 - PHY III.	33
3.1	Uvažované hodnoty MTBF.	48
3.2	Dosažené hodnoty MTBF.	50
7.1	Naměřené hodnoty z fotodetektoru PDA36A-EC.	101
7.2	Naměřené hodnoty z fotodiody BPW21.	101

1 ÚVOD

Tato práce se zabývá mobilními bezvláknovými optickými komunikacemi. V rámci této rozsáhlé problematiky je práce zaměřena primárně na využití komunikace pomocí nově navrhovaného modelu RGBY. Ten umožňuje komunikaci pomocí 4 různých vlnových délek ve viditelném světelném spektru současně a přitom zachovává na výstupu bílé světlo pro potřeby osvětlování.

Technologie bezvláknové optické komunikace se v poslední době těší stále většímu zájmu, především pak v oblasti výzkumu a vývoje. I přes současnou zdrcující komerční převahu rádiových sítí, má technologie optického bezvláknového přenosu potenciál zaplnit prázdná místa v možnostech konektivity. Díky neustálému nárůstu poptávky po vyšších rychlostech, lepším pokrytí a objemu přenášených dat, představují bezvláknové optické sítě obrovskou příležitost pro zkvalitnění pokrytí rozmanitých prostor. Rádiové sítě se v současnosti potýkají s problémem nedostatku tolik potřebných bezlicenčních pásem a jejich omezenou šířkou [1], protože možnost využití licencovaných pásem v zařízeních pro koncové uživatele by mohla být neúměrně finančně nákladná. Navíc neustálé opakování identických frekvencí v jedné malé oblasti způsobuje jejich vzájemné rušení. A právě díky tomu, že světlo je v současnosti vnímáno jako bezlicenční pásmo a jeho šíření lze snadno omezit, je jeho využití pro rozšíření stávajících rádiových sítí v hustě obydlených oblastech vhodnou volbou. V neposlední řadě pak nesmíme zapomenout na aplikace, kde je použití rádiového přenosu dokonce považováno za nebezpečné a přítomnost optické komunikace by tak mohla tato omezení snadno eliminovat.

Způsobů komunikace pomocí světelného záření ve viditelné oblasti je hned několik a jejich využití i princip fungování se liší. Hlavním tématem této práce jsou bezvláknové optické difúzní sítě, což znamená, že světlo pokrývá značnou část oblasti a uživatelům je tak umožněna mobilita v daném prostoru. Nejblíže této definici je technologie VLC (Visible Light Communication), neboli komunikace ve viditelném spektru. Ta byla pro budoucí využití tak zajímavá, že už v úvodu samotných výzkumů byla přidána do standardu WPAN (Wireless Personal Area Network) v podobě IEEE 802.15.7, který se touto problematikou začal blíže zabývat a definuje základní požadavky a parametry [2]. Základní myšlenkou VLC je využití LED osvětlovacích zdrojů pro současnou funkci osvětlování a komunikace [3], [4]. LED diody jsou totiž, na rozdíl od žárovek a fluorescenčních zářivek, schopny velmi rychle reagovat na změny procházejícího proudu. Použitelná šířka pásma pro drtivou většinu dnešních LED diod většinou bez problému přesahuje 1 MHz. Při použití klasického modulačního schématu OOK (On-Off Keying) budou přenosové rychlosti omezeny na hodnoty v jednotkách Mbit/s. Nicméně v posledních letech se ukázalo, že s použitím optických filtrů [5], ekvalizace [6], nebo pokročilých modulačních schémat [7], [8], [9] lze toto základní konstrukční omezení překročit a překonat hranice 100 Mbit/s. Kombinacemi jednotlivých úprav pak lze dosáhnout i k hranici 1,6 Gbit/s [10] a v budoucnu se bude pravděpodobně tato hranice přenosových rychlostí dále posouvat. Je ale

potřeba rozlišovat laboratorní a reálně použitelné konfigurace, protože v případě praktických aplikací, kdy se bude přijímač a vysílač vzájemně pohybovat a úroveň signálu bude výrazně kolísat, případně bude systém vystaven rušení atd., bude pravděpodobně přenosová rychlost omezena na hodnoty v řádech desítek Mbit/s.

První část této práce se zabývá popisem jednotlivých technologií spojených s VLC systémy, především z důvodu značného množství pojmů, které je třeba před vstupem do samotné problematiky komunikace pomocí viditelného světelného záření definovat. Poté následuje kapitola návrhu optoelektronické části systému, která má za cíl zefektivnit současné využívání optického spektra pomocí rozšíření stávajícího modelu RGB (Red-Green-Blue), kdy se pomocí míchání 3 základních barev vytváří výsledná bílá barva, na model RGBY. Přidáním žluté barvy do spektra můžeme zjednodušit použití systému v rozsáhlejších oblastech. Systém RGBY umožní podporovat větší počet uživatelů, nebo i lépe aplikovat některé typy modulačních technik. To vše při zachování hlavní podmínky, kdy lidský zrak musí vnímat světlo z optické soustavy jako bílé a nesmí pozorovat jakékoliv kolísání jasu, nebo barev při komunikaci.

1.1 Cíle disertační práce

Cíle disertační práce byly definovány do následujících bodů:

- Návrh způsobů pokrytí prostoru pomocí SW simulací a měření v temné místnosti.
- Nalezení vhodného způsobu pro plynulé spojení RGBY barev do výsledné bílé.
- Sestrojení vysílače a základní řídicí elektroniky pro komunikaci na principu OOK.
- Ověření možností nerušené komunikace na více vlnových délkách současně.

2 BEZVLÁKNOVÉ OPTICKÉ SÍTĚ

Bezvláknové optické sítě (BOS) lze obecně definovat jako optické sítě, které pro přenos dat využívají světelného záření a jako přenosové médium pro přenos signálu je využíván volný prostor, což je většinou atmosféra. Nicméně není problém se setkat i s bezvláknovou optickou komunikací mezi družicemi, která probíhá na orbitu, nebo například komunikací pod vodou [11], kde jsou však dosahy komunikace a přenosové možnosti značně omezeny.

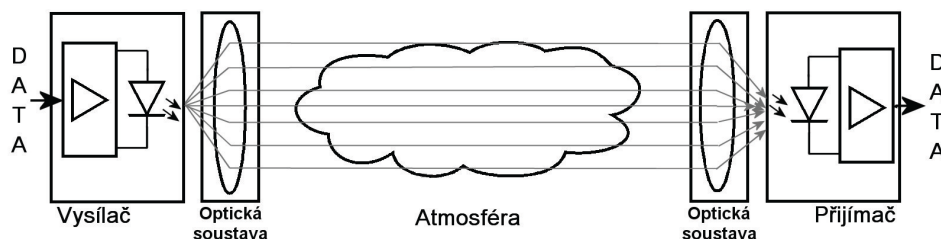
Pokud pomineme využití světelného záření k signalizaci a komunikaci pomocí Morseovy abecedy, tak z historického hlediska se dá za počátek výzkumu moderních optických komunikací označit rok 1880, kdy Alexander Graham Bell a Charles Sumner Tainter představili zařízení známé jako Fotofon. Princip fungování byl založen na přímé modulaci slunečních paprsků a jejich nasměrování k přijímači v podobě selenového článku, který převáděl optický signál na elektrický. Tento vynález dokonce předstihl první přenos řeči pomocí rádia o 27 let. Nevýhodou systému ale byla závislost na slunečních paprscích, což v praxi znamenalo, že komunikace tímto způsobem byla značně omezena. Princip ale přetrval, a s příchodem silnějších umělých zdrojů světla a lepších materiálů pro výrobu fotodetektoru (MoS_2 – Molybden Disulfid), našel uplatnění v námořnictvu pro mezilodní komunikaci. Dosah této komunikace se přitom pohyboval kolem úctyhodných 11 kilometrů. V roce 1935 byl systém společností Carl Zeiss dále upraven, fungování bylo přesunuto do infračervené oblasti a systém byl použit pro komunikaci mezi tanky a za optimálních podmínek byl schopen komunikovat až na vzdálenost 14 km [28].

Pro bezvláknový přenos dat pak bylo světlo využito až v roce 1979, kdy F.R Gfeller a U. Bapstem [12] představili model optické difúzní sítě pro rychlosti 1 Mb/s v blízké infračervené oblasti. Po mnoho let pak komunikace v blízké infračervené oblasti zůstala, protože okolní světelné parazitní rušení je v této oblasti velmi malé a fotodetektory jsou v této oblasti mnohem citlivější.

Bezvláknové optické komunikace, pracující mimo infračervenou oblast, se začaly objevovat až kolem roku 1999, kdy se začala zkoumat možnost využití vysoce svítivých LED diod používaných v signalizačních zařízeních [29]. S nástupem bílých LED pak začala tato spektrální oblast doslova ožívat. Díky vývoji bílých LED diod pro osvětlování byl k dispozici zdroj světelného záření, který se těší rostoucí oblibě u spotřebitelů a oproti klasickým žárovkám, či zářivkám, je schopen přenosu dat na vysokých frekvencích. Od prosince roku 2011 pak byly základní parametry VLC definovány pomocí IEEE 802.15.7 [2]. Dnes lze i toto doporučení považovat za zastaralé, protože v poslední době se VLC ubírá, od původně definovaných modulací OOK, PPM a CSK, směrem k vícestavovým modulacím. To má své opodstatnění, protože zvyšování pracovních frekvencí ke stále vyšším a vyšším hodnotám je obtížné a vícestavové modulace nabízejí vyšší přenosové rychlosti i při nižších a lépe zpracovatelných frekvencích.

2.1 Základní schéma systému

Systém fungování bezvláknového optického systému si je, ve své podstatě, podobný s ostatními bezdrátovými systémy. Pro komunikaci je potřeba vysílač, přijímač a zároveň ještě přenosové médium.

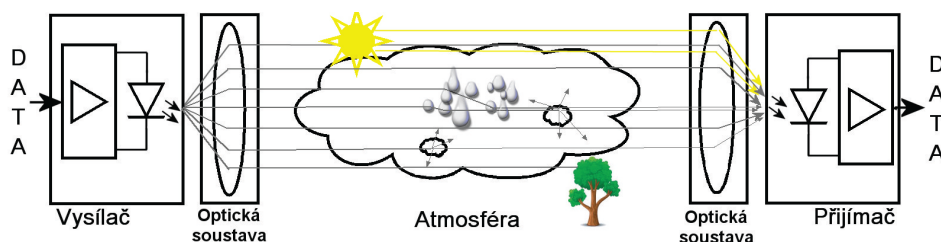


Obr. 2.1: Blokové schéma ideálního bezvláknového optického komunikačního systému.

Obrázek 2.1 znázorňuje základní způsob fungování optických bezvláknových sítí. V první řadě máme vysílač, který vezme příchozí elektrický signál a po vhodné úpravě jej, pomocí vhodného zdroje světla (většinou LED, nebo Laser), vyzáří směrem k přijímači. Ten potom pomocí fotodetektoru převede optický signál zpět na elektrický a po několika dalších úpravách v podobě zesílení a případné demodulace jej převede na původní data.

Na obrázku 2.1 je také vidět, že kromě vysílače a přijímače je zde přidána také dodatečná vazební optická soustava, která má za úkol upravit vysílaný optický svazek tak, aby převážná část vysílaného výkonu dopadla na fotodetektor přijímací strany. Úprava optického svazku na vysílací, přijímací, nebo obou stranách, je ve většině případů nutná, protože jinak světelné záření optického svazku ztrácí rychle svou energii. Se ztrátou energie pak přichází mnoho problémů v podobě nižšího odstupu signálu od šumu, nebo v horším případě úplná ztráta komunikace, protože na přijímací straně jsme vždy omezeni minimální prahovou hodnotou, kterou je schopen přijímač detekovat. Hlavní vinu na ztrátě optického výkonu má, kromě nevhodného tvaru optického svazku, právě samotná atmosféra, která slouží jako přenosové médium. V porovnání s optickými vlákny je totiž plná rušení, šumů z okolních zdrojů světla a v případě, že se objeví atmosférické jevy jako mlha, tak se její útlum pro světelné paprsky zvýší natolik, že komunikace je téměř nemožná. [13], [14], [15].

Příklad takovéto reálnější podoby bezvláknového optického systému je na obrázku 2.2. Zde se projevuje hned několik negativních vlivů, které znesnadňují detekci optického signálu na přijímací straně. Dochází zde například k rozptylu světla na kapkách vody (např. mlha), nebo odrazu/pohlcení světla na překážkách. Problémem může být také slunce, protože může saturovat obvody fotodetektoru. I když je z obrázku 2.2 vidět, že na fotodetektor dopadá jen část vysílaného signálu, tak není pravidlem, že tento stav znamená přerušení komunikace. Podstatou je dostatečný vysílací výkon, který je schopen přijímač detekovat i přes nepříznivé okolní podmínky. Vliv atmosférických turbulencí, mlhy a dalších vlivů na BOS je v současnosti zkoumán [57], [67].



Obr. 2.2: Příklad reálného bezvláknového optického komunikačního systému.

2.1.1 Atmosféra

Zemská atmosféra jako přenosové médium optického signálu není dokonalá. Její parametry jsou určeny především jejím složením a aktuálními meteorologickými podmínkami. Útlum atmosféry se může pohybovat v rozmezí od 0–3 dB/km pro jasno až 300–400 dB/km při nepříznivých podmínkách (mlha atd...) [44]. Ve venkovních prostorách je vliv atmosféry velmi citelný, nicméně pro zaměření této práce, nás bude zajímat spíše komunikace na kratší vzdálenosti. I když použití ve venkovních prostorách nic nebrání, je hlavním zaměřením této práce pokrývání vnitřních prostor. Hlavní otázkou ohledně atmosféry je její chování ve viditelném spektru.

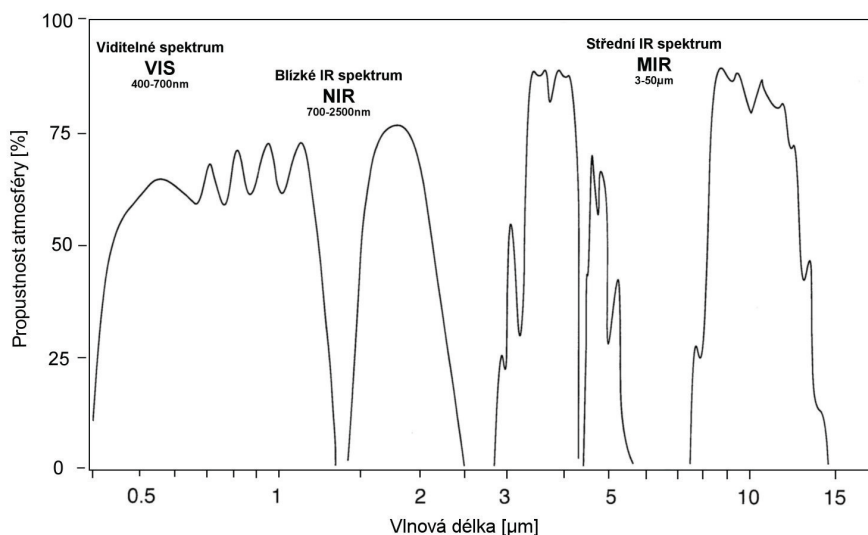
Atmosféra má několik přenosových oken s dobrou transparentností na středních vzdálenostech (okolo 100–1000 m). Jak ukazuje obrázek 2.3, nejlepší parametry pro přenos má atmosféra ve viditelném a infračerveném spektru optického záření [45]. Na obrázku 2.3 je příklad spektrální propustnosti atmosféry pro vzdálenost 1800 m na úrovni zemského povrchu. Pro přenos dat se dnes většinou používá blízkého infračerveného spektra (NIR) a jedná se především o technologii Free-Space Optic (FOS). Vlnové délky ve středním IR spektru (MIR) pak odpovídají spíše jen tepelnému záření a pro komunikaci jsou tak nevhodné. Hlavní ale je, že ve viditelném spektru má atmosféra taktéž k dispozici přenosové okno s dobrou transparentností, takže přenosu dat by z principu atmosféra výrazně vadit neměla.

Na Obr. 2.3 můžeme pozorovat několik absorpčních maxim, které jsou způsobeny složením atmosféry (voda, kyslík, oxid uhličitý). V ultra-fialovém (UV) spektru spektrální propustnost atmosféry silně klesají. V extrémních případech je propustnost atmosféry tak malá, že umožní komunikaci pouze na vzdálenost několika centimetrů (vzdálená UV oblast - VUV).

Útlumový koeficient a je v atmosféře vypočten jako:

$$\sum a = \alpha_{OZ} + s_R + s_a, \quad (2.1)$$

tedy příspěvku ozónové vrstvy α_{OZ} (důležitý pro $\lambda < 290$ nm), Rayleighova rozptylu s_R (důležitý pro $\lambda < 400$ nm) a aerosolového rozptylu s_a . Dávající hodnotu $\alpha = 0,18$ dB/km pro $\lambda = 550$ nm. Term s_a je dominantní pro $\lambda > 400$ nm a lze jej vyjádřit jako $a/a_0 = (\lambda/\lambda_0)^{1/2}$ pro aproximaci mezi 500 nm a 5000 nm.



Obr. 2.3: Spektrální propustnost atmosféry (%) pro $L=1800\text{m}$.

Viditelný dosah skrze atmosféru a další rozptylová média lze popsat jako $L_{vis} = 3,919/a$, kdy dochází k redukci přenosu na 2%.

Typické hodnoty v dB/km jsou:

- 0,02–0,1 pro výjimečně čistou atmosféru,
- 0,2 pro čistou atmosféru,
- 0,5–1 pro lehký opar,
- 2–5 pro lehkou mlhu (výjimečně až 300).

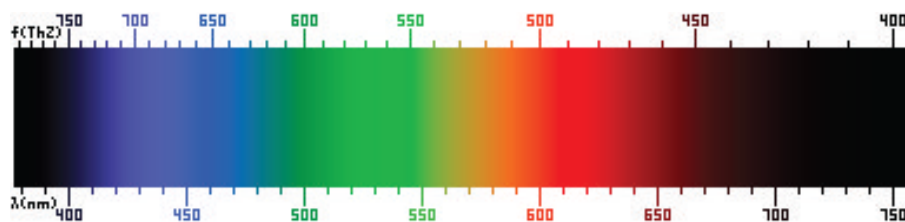
2.1.2 Zdroje světelného záření

Ačkoli princip přenosu dat pomocí světla je ve své podstatě jednoduchý, tak při bližším pohledu zjistíme, že i jednotlivé barvy se svými přenosovými parametry budou ve finále výrazně lišit. Viditelné spektrum světelného záření (elektromagnetického spektra) představuje pro lidský zrak rozsah frekvencí přibližně od 770 až 400 THz, nebo jednodušeji vyjádřeno pomocí vlnové délky 390 až 750 nm [46], kdy pro přepočet platí vztah:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (2.2)$$

kde λ je vlnová délka [m], c je rychlost světla [m/s] a f je frekvence [Hz]. Jednotlivé vlnové délky pak odpovídají určitým barvám (od fialové – 390 nm, až po červenou – 650 nm) za těmito hranicemi pak schopnost vnímání barev pro lidské oko začíná prudce klesat, takže ultrafialovou část ($\lambda < 390$ nm) a infračervenou ($\lambda > 750$ nm) můžeme vidět pouze za pomoci přístrojů, nebo v podobě vedlejších detekovatelných projevů (např. fotoluminiscence UV aktivních materiálů, nebo teplo).

Výběr vhodného světelného zdroje pro potřeby BOS ve viditelném spektru je jednoduchý. Máme zde na výběr pouze mezi LED diodami, nebo laserem. Možnost použití



Obr. 2.4: Viditelné spektrum elektromagnetického světelného záření [27].

laserového zdroje světelného záření odpadá, a to jak z hlediska bezpečnosti pro lidský zrak, tak z hlediska jeho vlastností (šířce spektra, koherentním vlastnostem záření, atd.). Zbývá nám tak pouze polovodičová světlo-emitující dioda (LED).

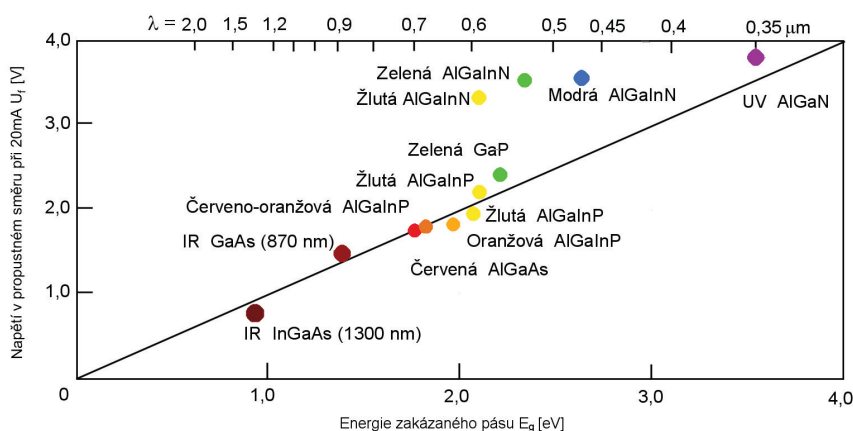
LED (Light-Emitting Diode) je polovodičová součástka, která při průchodu proudem emituje fotony o určité energii – vlnové délce. Vlnová délka odpovídá složení PN přechodu a v současné době pokrývá široké spektrum vlnových délek od ultrafialové (UV), až po infračervenou (IR) oblast elektromagnetického spektra.

U LED diody dochází z hlediska emise fotonů pouze ke spontánní emisi, dodaná energie pouze posune elektron na vyšší energetickou hladinu a ten pak spontánně přejde zpět a při tom, za optimálních podmínek (zářivé rekombinaci), vyzáří foton. Jednotlivé fotony tak nejsou uvolňovány řízeně a vzniká tím nekoherentní záření, tedy stav, kdy jednotlivé fotony nejsou vzájemně fázově synchronizovány.

Energie, která je pro fungování LED potřebná je přímo závislá na vlnové délce a tedy i šířce zakázaného pásu (E_g) a platí zde vztah

$$E_g = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad [eV], \quad (2.3)$$

kde h je Planckova konstanta ($6,6262 \cdot 10^{-34}$), c je rychlost světla ($2,998 \cdot 10^8$ m/s) a λ představuje vlnovou délku (m). Výsledná hodnota E_g pak pro mezipásmové přechody rovněž odpovídá energii emitovaného fotonu.



Obr. 2.5: Závislost materiálového složení LED a napájecího napětí.

Různě "barevné" LED diody tak potřebují nejen specifické složení, ale i odpovídající napájecí napětí, které přibližně odpovídá energií emitovaných fotonů. Na obrázku 2.5 můžeme vidět příklady LED diod s různým materiálovým složením přechodu a odpovídajícím napětím v propustném směru [46].

Se změnou potřebné hladiny energie se budou u jednotlivých vlnových délek lišit i Volt-Ampérové (VA) charakteristiky. Pro VA charakteristiky v propustném směru platí následující Shockleyho rovnice [46].

$$I = eA \left(\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p} \frac{n_i^2}{N_D}} + \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n} \frac{n_i^2}{N_A}} \right) (e^{eV/kT} - 1), \quad (2.4)$$

kde e je elementární náboj ($1,60219 \cdot 10^{-19}$), A představuje plochu aktivní oblasti, $D_{n,p}$ jsou konstanty pro difúzi elektron-díra, $\tau_{n,p}$ jsou doby životnosti nosičů, $N_{A,D}$ jsou koncentrace akceptorů a donorů, n_i je koncentrace nosičů v polovodiči, V je napětí a T je teplota přechodu.

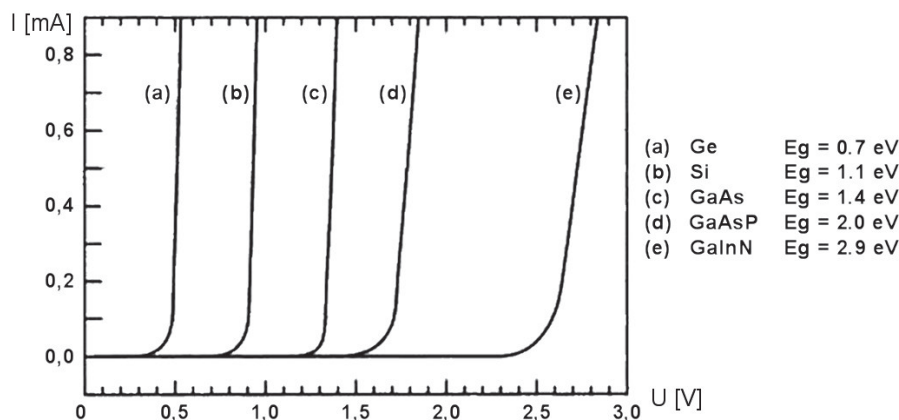
Pro VA charakteristiky v typickém propustném režimu můžeme rovnici upravit následovně:

$$I = eA \left(\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p} N_A} + \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n} N_D} \right) e^{\epsilon(V-V_D)/kT}, \quad (2.5)$$

kde exponenciální část představuje silnou závislost proudu při přiblížení napájecího a difúzního napětí, kdy při ($V \approx V_D$) začne proud silně narůstat. Napětí, při kterém začne proud prudce narůstat se nazývá prahové napětí a jeho velikost je dána jako $V_{th} \approx V_D$. V_{th} pak lze díky složení LED diod zjednodušeně popsat jako podíl energie zakázaného pásu a elementárního náboje:

$$V_{th} \approx V_D \approx \frac{E_g}{e}. \quad (2.6)$$

Průběhy pro jednotlivá V_{th} jsou na obrázku 2.6.



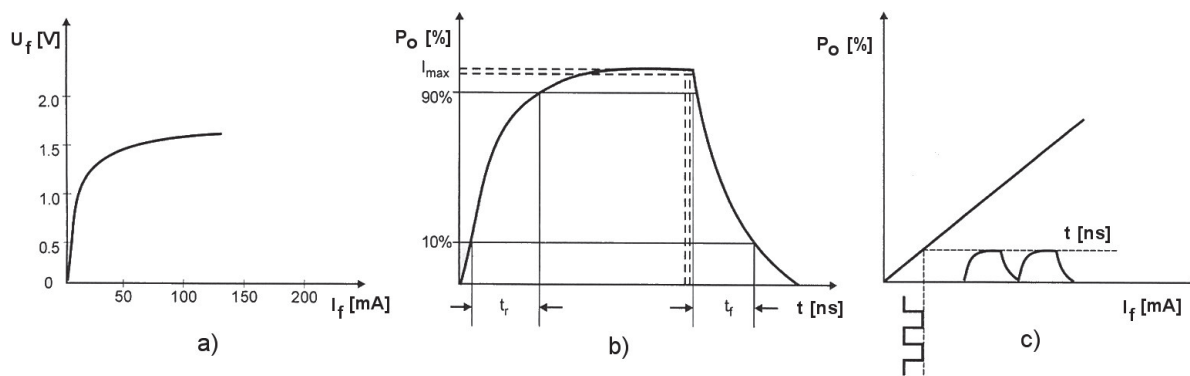
Obr. 2.6: VA charakteristiky LED diod (propustný směr) [46].

Jedním z hlavních omezujících faktorů je u LED diod kapacita jejich PN přechodu, protože díky kapacitnímu charakteru není LED dioda schopna přesně kopírovat signál zdroje.

Obrázek 2.7 ukazuje vliv kapacity přechodu LED diody na průběh výstupního výkonu. Výstupní výkon tedy bude oproti budícímu proudu mírně zkreslený. Šířka pásma systému pak odpovídá frekvenci, kdy průběh vysílaného výkonu poklesne na polovinu. Potom platí, že

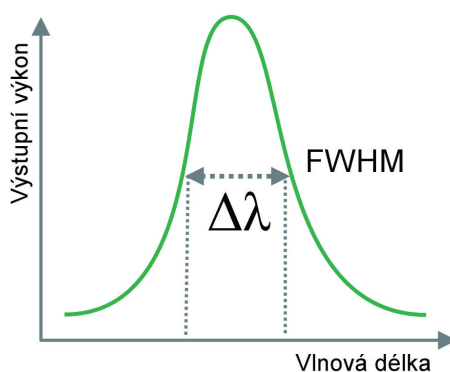
$$\Delta f = f_{3dB} = \frac{1}{2\pi t} = \frac{\ln 9}{\pi(t_r + t_f)} \approx \frac{0,7}{t_r + t_f}, \quad (2.7)$$

kde t_r a t_f představují doby náběžných a sestupných hran[46].



Obr. 2.7: VA charakteristiky LED (a) - VA charakteristiky LED, b) - náběžná a sestupná hrana, c) - modulace).

Poslední charakteristikou, kterou je nyní vhodné pro LED diody zmínit, je šířka spektrální čáry FWHM (Full-Width at Half Maximum). Hodnota FWHM představuje šířku spektra, které použitý zdroj světelného záření zabírá ve spektru při polovině svého výkonu, což je vidět názorně na obrázku 2.8. Hodnoty FWHM pro LED diody jsou dost široké a většinou představují několik desítek nm, což je v porovnání s několika nm pro lasery velký rozdíl. Z důvodu velkého FWHM jsou LED diody méně vhodné pro vytváření velkých vlnových multiplexů, protože velmi rychle obsáhnou komunikační okno. Pro zamýšlené využití pro osvětlování a komunikaci jsou ale ideální, protože lépe pokryjí celou šířku viditelného spektra.

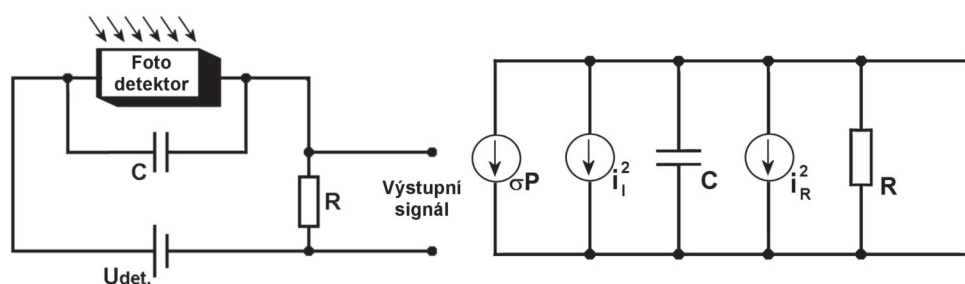


Obr. 2.8: Šířka spektrální čáry - FWHM.

2.1.3 Fotodetektory

Poslední část základního schématu je přijímač. Ten je tvořen fotodetektozem, který převádí dopadající optický výkon zpět na elektrický signál (data). V současnosti se jedná o nejproblematictější část VLC systémů, protože fotodetektory musí být schopny pracovat i ve velmi silně zarušeném prostředí a přitom detekovat užitečný signál, který představuje pouze zlomek skutečně dopadajícího optického výkonu. A to vše při vysokých přenosových rychlostech.

Obecné schéma fotodetektoru je znázorněno na obrázku 2.9. Základem je detektor, který mění dopadající světelné záření na použitelnou elektrickou veličinu. Pro vyšší rychlosti se většinou jedná o změnu protékajícího proudu (v některých případech můžeme využít i režim, kdy detektor reaguje změnou výstupního napětí) [45].



Obr. 2.9: Obecné schéma fotodetektoru.

Z obrázku 2.9 je patrné, že kromě volby fotodetektoru můžeme ovlivnit i hodnoty napětí a zatěžovacího rezistoru R . Všechny tyto hodnoty jsou většinou udržovány v rovnováze, aby bylo zajištěno co nejlepších parametrů systému. Vhodné napětí se většinou volí tak, že se fotodioda uvede do tzv. fotovodivostního režimu. Na rozdíl od fotovoltaického režimu (fotodioda v propustném směru) se na diodu přivede napětí v závěrném směru a to při hodnotách těsně před průrazným napětím (nebo alespoň nejvyšší, jaké nám dovolí napájecí obvody používaného zařízení). Prvním důvodem je, že při vysokých hodnotách závěrného napětí dochází k výraznému poklesu kapacity PN přechodu a tudíž i k vyšší rychlosti odezvy (viz. Obrázek 2.10). Druhým důvodem je, že při přivedení záporného napětí dojde k oddálení vázaných nábojů. Tím vznikne širší oblast s malou vodivostí, na které se soustředí téměř veškeré přivedené napětí. Toto pole pak urychluje vzniklé nosiče až na saturovanou rychlost, tím dojde k nahrazení difúzního pohybu nosičů za pohyb driftový a odezva fotodiody se tak urychlí.

Detektorů máme na výběr hned několik, avšak pro komunikační účely jsou nejčastěji využívány polovodičové fotodetektory. Polovodičové materiály jsou ideální díky vnitřnímu fotoelektrickému efektu, který má za následek vysokou mobilitu nabitých nosičů (a tedy i rychlost odezvy), nízké hodnoty temného proudu a vysokou účinnost přeměny dopadajících fotonů na páry elektron-díra [45]. Z polovodičových fotodetektorů máme na výběr dvě možnosti, fototranzistor a fotodiodu. Fototranzistory sice poskytují vyšší zesílení v

rámci své vnitřní struktury, nicméně rychlost odezvy je většinou příliš nízká a s rostoucími frekvencemi navíc klesá vnitřní zesílení. Fotodiody pak nabízí především rychlost, ale pro zpracování signálu je potřeba zesilovač. V současné době se tak pro komunikační účely používají nejčastěji fotodiody, protože hlavním požadavkem na systémy přenášející data je vysoká rychlost.

Fotodiody

Fotodiody lze rozdělit podle způsobů konfigurace PN přechodů:

- PN fotodiody – klasický přechod PN, který je otevřen pro příjem fotonů, které v depletiční vrstvě generují páry elektron/díra – fotoproud.
- PIN fotodiody – konstrukce PN se zde mění tak, že mezi dvě tenké, silně dotované vrstvy P+ N+ se umístí *Intrinsic* vrstva. Výsledkem je, že šířka depletiční vrstvy je dána geometrií přechodu a téměř nezávislá na přivedeném napětí, stejně tak jako spektrální odezva, závěrný proud a rychlost odezvy.
- Shottkyho přechody – přechod kov/polovodič, kdy fotony dopadají na tenkou kovovou vrstvu (cca 10–20 nm). Kvantová účinnost je sice jen kolem 5 %, ale díky své struktuře jsou stále zajímavé pro vysokorychlostní přenosy v MIR a FIR oblasti.
- Heterostrukturální přechody – oproti předchozím homogenním přechodům, které jsou tvořeny jedním polovodičem, jsou heterogenní přechody tvořeny různými polovodiči. Toto řešení zajišťuje mnohem větší flexibilitu v designu a výrazné zlepšení parametrů, avšak za cenu složitější výroby.

Proud protékající fotodiodou je součtem fotoproudu a klidového (temného) proudu. Požadovaný fotoproud (I_{ph}), je vytvářen dopadajícím světelným zářením a platí pro něj vztah

$$I_{ph} = \sigma P, \quad (2.8)$$

kde σ je odpovídající spektrální citlivost (viz. obr. 2.11) a P je optický výkon. Druhým je proud fotodiody, který prochází PN přechodem v klidovém stavu, neboli temný proud (I_0) a je popsán pomocí Shockleyho zákona pro PN přechod [45].

Celkový proud protékající fotodiodou pak lze popsat jako:

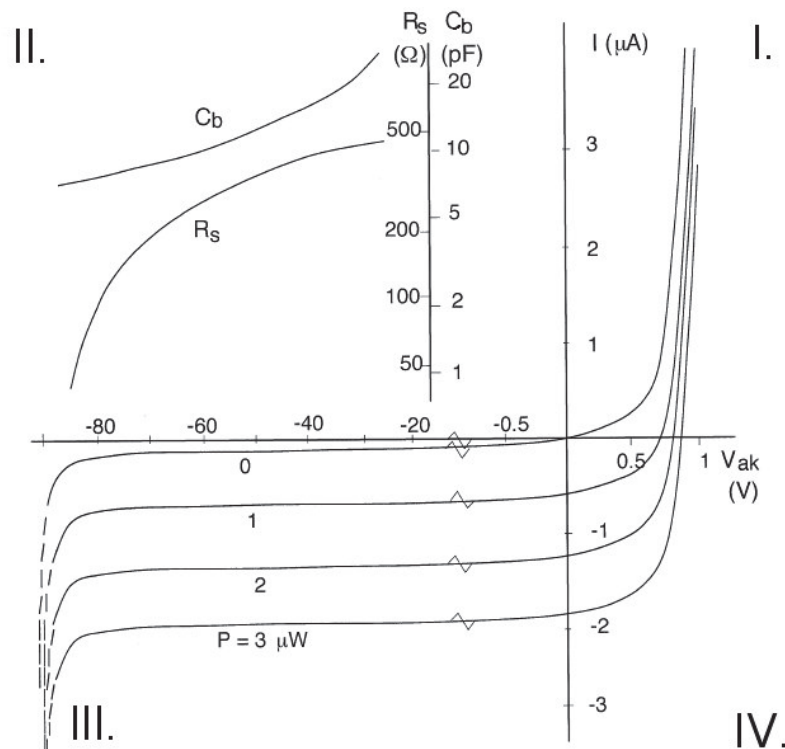
$$I = I_0 \left[e^{(eV/nkT)} - 1 \right] - I_{ph}, \quad (2.9)$$

kde I_0 je temný proud a n je faktor ideality přechodu. V je napětí na fotodiodě a příspěvek e/kT představuje závislost na teplotě (ekvivalentně pro vyjádření napěťové závislosti je známější tvar $kT/e = 26$ meV (při $T=300$ K)). Protože pro vyšší rychlosti se předpokládá práce ve III. kvadrantu VA charakteristik (obr. 2.10), bude hodnota závěrného napětí mnohem vyšší než příspěvek teplotní závislosti, lze tedy dojít ke zjednodušení:

$$I = -I_0 - I_{ph}, \quad (2.10)$$

kdy proud I procházející diodou bude složen z fotoproudu vytvořeného dopadajícím signálem I_{ph} , superponovaným malou hodnotou závěrného (temného) proudu I_0 .

Na obrázku 2.10 je zobrazen příklad VA charakteristik polovodičové fotodiody, spolu se závislostí kapacity PN přechodu C_b na velikosti závěrného napětí a také odpovídající závislost hodnot R_s . Hodnoty R_s představují odpor depletiční vrstvy, která je sériově vázána na PN přechod. Pro obě hodnoty platí, že čím jsou menší, tím lépe.



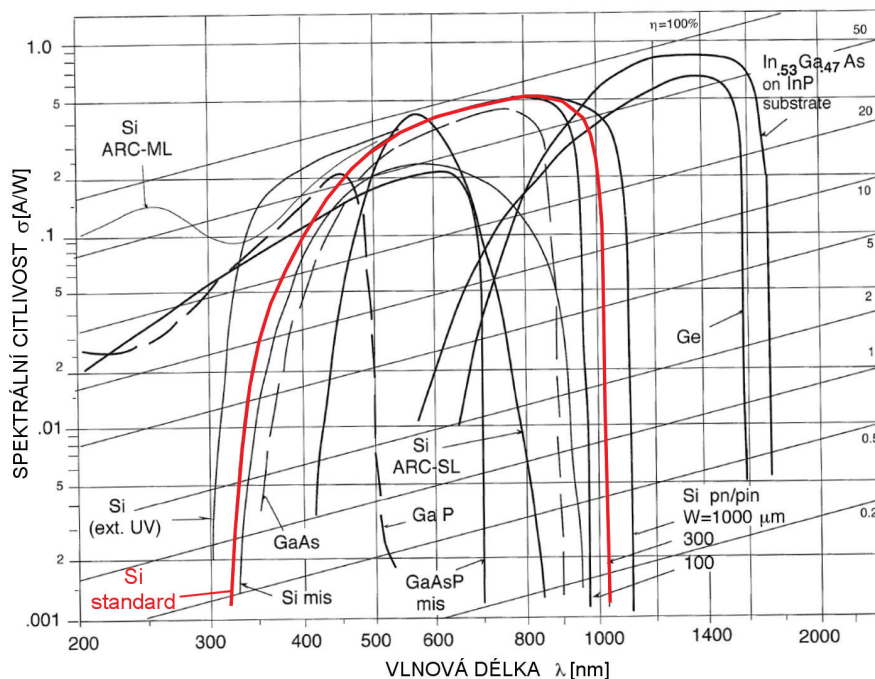
Obr. 2.10: Volt-ampérové charakteristiky křemíkové fotodiody a závislost kapacity PN přechodu na sériovém odporu a závěrném napětí [45].

Spektrální charakteristiky fotodiody se opět liší podle materiálů, ze kterých je PN přechod vyroben. Z pohledu VLC mohou být tyto charakteristiky velmi omezující, protože blíže k modré části spektra klesá většinou citlivost fotodiody, což můžeme vidět na obrázku 2.11.

Z hodnot na obrázku 2.11 je patrné, že pro viditelné spektrum můžeme využívat i běžné křemíkové fotodiody, které bezpečně pokrývají viditelnou část spektra a zvládají i začátek infračerveného spektra do cca. 1000 nm. Lze je tak využít na obou stranách systému, tedy pro příjem viditelného spektra z vysílače, i příjem IR spektra od mobilní stanice.

Zatěžovací odpor a šumy

Pokud se na chvíli vrátíme k obrázku 2.9, tak v ekvivalentním schématu stále zbývá dořešit zatěžovací odpor R a dva zdroje šumu. Problém vhodné volby zatěžovacího odporu, a tím kompromisu mezi šumem a šířkou pásma, je společný pro všechny detektory reagující na dopadající fotony (CCD, fotoodpory, fotodiody...).



Obr. 2.11: Spektrální citlivost typických fotodiód a materiálů [45].

Uvažujme ekvivalentní obvod kvantového fotodetektoru zakončeného zatěžovacím rezistorem R a zhodnotme jeho šířku pásma a šum.

Výstupní signál, ať už ve voltech $U = \sigma \cdot P \cdot R$, nebo jako proud $I = \sigma \cdot P$ má 3 dB hranici danou vztahem [45]

$$B = \frac{1}{2\pi RC}, \quad (2.11)$$

kde B představuje dosaženou šířku pásma, R je hodnota zatěžovacího odporu a C je kapacita PN přechodu fotodiody.

K signálu jsou také přidány dva zdroje šumu. Jedním je Johnsonův (teplotní) šum rezistoru R .

$$i_R^2 = \frac{4kTB}{R}, \quad (2.12)$$

kde k je Boltzmannova konstanta a T je absolutní teplota.

Druhým zdrojem šumu je kvantový (výstřelový) šum, který závisí na velikosti procházejícího proudu.

$$i_I^2 = 2e(I_{ph} + I_0)B, \quad (2.13)$$

kde $I_{ph} + I_0$ je součet fotoproudu a temného proudu, e je náboj elektronu a B je šířka pásma.

Protože jsou tyto šумы nezávislé, celková hodnota šumu bude:

$$i_n^2 = 2e(I_{ph} + I_0)B + \frac{4kTB}{R}. \quad (2.14)$$

Z rovnic 2.11 a 2.14 tak můžeme vidět, jak se jednotlivé složky navzájem ovlivňují. Pro zajištění správných pracovních podmínek záleží na každé jednotlivé hodnotě a protože se mnohdy vzájemně vylučují, především pak B a R , je vždy nutné nalézt vhodný kompromis. Pro vyšší frekvence potřebujeme malé R , tím ale vzroste šum a současně se sníží hodnoty výstupního napětí. Pokud tedy nemáme k dispozici dostatečný optický výkon, tak bude detekce velmi obtížná. Na druhé straně pak máme případ, kdy potřebujeme velkou citlivost fotodetektoru, hodnotu R musíme zvýšit, což zmírní šum a současně zvýší hodnoty výstupního signálu, bohužel ale současně dojde k omezení použitelné šířky pásma. Na obvodové úrovni pak máme ještě následující možnosti, nebo spíše požadavky:

- Dokonalá filtrace napájecího napětí, aby se do signálu nepřidával další šum.
- Zesilovače řešit pomocí více stupňů s menším zesílením, aby se zachovala potřebná šířka pásma v zesilovacím řetězci.
- V případě potřeby umístit obvody fotodetektoru do stíněného krytu, protože výstupní hodnoty z fotodiody jsou tak malé, že i okolní elektromagnetické rušení může být zdrojem významného zdroje šumu.

2.2 Bezvláknové optické systémy ve viditelném spektru

Nyní se od popisu základního schématu bezvláknového optického systému (BOS) dostáváme k popisu jednotlivých BOS, které komunikují ve viditelném spektru. Podobně jako u rádiových sítí, kdy mají jednotlivé technologie různá využití, např. EDGE [23], LTE [24], Wi-Fi [25], Bluetooth [26] a liší se komunikačními dosahy a frekvencemi. Tak i v případě BOS dochází k dělení na jednotlivé typy, především pak z důvodu různých způsobů využití. V praxi jsou tyto systémy označovány jako VLC (Visible Light Communication)

Komunikace Viditelným Spektrem je nejnovějším rozšířením rodiny bezvláknových optických sítí. Dle asociace IEEE spadá do rodiny WPAN (802.15) [42], přesněji pak 802.15.7. Jedná se o technologii, která při komunikaci není omezena na blízkou IR část spektra [13], ale komunikuje ve viditelném spektru. Může tak využívat například stávající LED osvětlovacích prvků a jejich prostřednictvím vysílat data k uživatelům [33], [34]. Osvětlení v místnosti tak může sloužit pro osvětlení i komunikaci současně a zároveň je docíleno pokrytí širokého prostoru (na rozdíl od IrDA, kde je počítáno pouze s úhlem 15-30°). Jedná se tedy o první technologii pro bezvláknové optické komunikace, která nemusí fungovat jako směrový spoj typu bod-bod. Při použití „běžné“ bílé LED pro osvětlování můžeme počítat s úhlem pokrytí kolem 120° a v případě doplnění o vhodnou vazební optickou soustavu pak i více, nebo dle potřeby méně.

Pokrytí prostoru u VLC se jednoduše odvíjí od toho, jakou oblast chceme pokrýt signálem. Můžeme jednoduše pokrýt signálem pouze plochu pracovního stolu, nebo třeba celý pokoj a přitom nijak nerušit komunikaci ve vedlejší místnosti. Ani existence LOS není pro fungování VLC podmínkou, při použití dostatečně citlivého fotodetektoru může komunikace fungovat i díky pouhému odrazu světla od stěn (N-LOS). Taková komunikace

bude mít ale výrazně omezující vliv na přenosové rychlosti. Pokrytí prostoru je v případě VLC mnohem preciznější, než v případě rádiových sítí, protože interferenční zóna končí s místem, kam už světlo nesvítí, nebo kde narazí na neprostupnou překážku.

S viditelným spektrem přichází i několik požadavků.

- Komunikace nesmí být za žádných okolností pozorovatelná lidským zrakem. Modulační a případné kódování musí být schopno udržovat stálou střední hodnotu proudu do vysílací LED diody.
- Komunikace nesmí rušit elektronická zařízení, jako například fotoaparáty, kamery, stávající dálková ovládání atd. – Závěrky fotoaparátů reagují mnohem rychleji než lidské oko, takže ani změny v desítkách milisekund nejsou žádoucí, natož pak případ, kdy v pokrývané místnosti přestanou fungovat všechna IR dálková ovládání.
- Vysílaný optický výkon nesmí představovat riziko pro lidský zrak – což platí zejména pro mobilní zařízení, která pravděpodobně budou pracovat v blízkém IR spektru. Blízké IR spektrum totiž není tolik zatíženo rušením ze slunečního záření a může proto pracovat na nižších výkonech a výrazně tak šetřit například baterie.
- Systém musí pracovat za různých povětrnostních podmínek – VLC ve vnitřních prostorech nebude zatíženo mlhou, nebo sněžením, nicméně dopadající přímé sluneční světlo může snadno způsobit saturaci obvodů fotodetektoru, a tím narušit komunikaci. Navíc VLC není omezeno jen na vnitřní prostory, takže ve venkovních aplikacích bude třeba počítat téměř se všemi s tím přicházejícími problémy.

Výhody systémů VLC jsou zejména:

- Široké možnosti pokrytí prostoru signálem.
- Bezlicenční pásmo.
- Alternativa v oblastech, kde je příliš mnoho rušení z rádiových sítí (např. Wi-Fi).
- Možnost využití tam, kde je rádiová komunikace z důvodu přítomnosti citlivých přístrojů omezena, nebo zakázána – například v letadlech a nemocnicích.
- Bezpečnost – VLC systém nelze snadno odposlouchávat, nebo rušit. Možné to samozřejmě je, nicméně zdroj rušení ve viditelném spektru lze snadno odhalit a pro odposlech by musela být splněna podmínka LOS, takže by se odposlouchávací zařízení muselo nacházet v bezprostřední blízkosti.
- Jednoduchá lokalizace zařízení – výhoda VLC je v tom, že lze snadno určit polohu uživatele s přesností na několik metrů i v budově. Každé světlo může snadno přenášet do zařízení údaj, který bude na mapě odpovídat jeho umístění.
- Možnost využívat osvětlení současně s komunikací.

Nevýhody:

- Potřeba LOS – i když systém dokáže teoreticky pracovat s odrazy od stěn, tak u mobilních zařízení, která jsou například ukryta v kapse, nebo tašce, je signál nedostupný.
- Možnost využívat osvětlení současně s komunikací – tento bod může být sice z jedné strany výhodou, zejména ve večerních hodinách. Na druhou stranu pak ale budou

světla zapnutá i přes den, takže v takových případech je zapotřebí modulační schéma, které umožní snížit nepotřebnou část energie na minimum.

V současnosti je zde hned několik možností využití VLC o které je v oblasti vývoje zájem.

2.2.1 Li-Fi

Light-Fidelity představuje VLC alternativu k Wi-Fi sítím a má sloužit jako rozšíření a případně i náhrada stávajících rádiových systémů. Hlavním průkopníkem této technologie je prof. Harald Haas, v jehož laboratoři na univerzitě v Edinburghu bylo v laboratorních podmínkách dosaženo přenosové rychlosti 224 Gb/s. Hodnoty v reálním prostředí by se sice měly pohybovat mnohem níže, nicméně již na trh vstupují první firmy, které se snaží přijít s komerčním využitím. A právě příchod komerčního řešení může tuto technologii přenést do reálného života.

Pro takové využití se začala řešit i možnost handoveru (přepínání) mezi Wi-Fi a Li-Fi, což by umožnilo potřebnou mobilitu uživatelů [36]. A samozřejmě i přístupová metoda k médiu musí být schopna pracovat s více uživateli při velkém počtu malých buněk [37].

Příklad takového systému je na následujícím obrázku (2.12). S příchodem bezdrátových technologií byl vytvořen také princip buňkového systému. V každé buňce přitom může vždy být pouze omezený počet uživatelů. S přibývajícím uživateli se s postupem času se buňky pro bezdrátové komunikace zmenšily z velikosti desítek kilometrů (makro buňky), přes piko buňky (do 200 metrů) až k dnešním femto buňkám (do 10 metrů). V případě Li-Fi se pak jedná o další miniaturizaci velikosti buněk na Atto buňky. Výhodou postupného zmenšování buněk je úspora energie a možnost podpory většího počtu uživatelů v malém prostoru.



Obr. 2.12: Princip Li-Fi - Atto buňky [38].

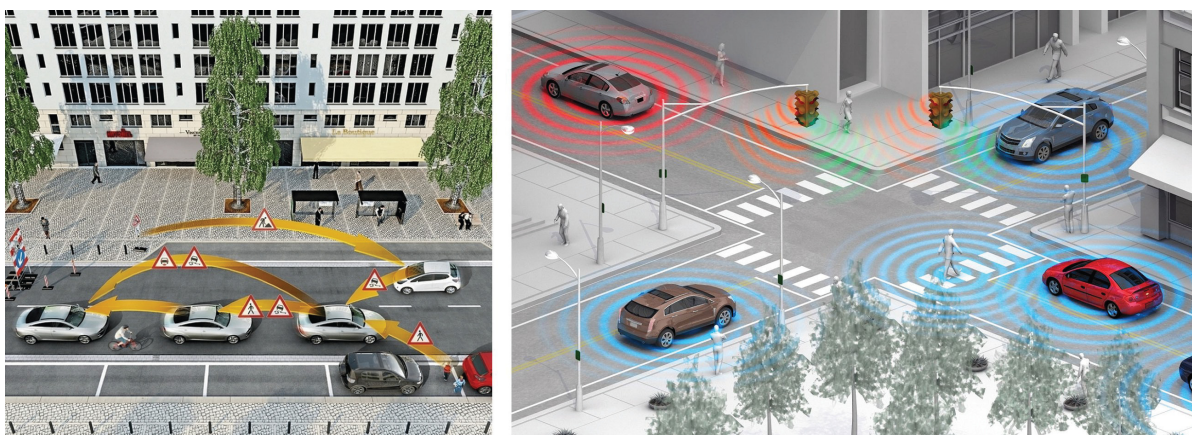
2.2.2 V2x

Dalším využitím VLC jsou komunikace mezi vozidly V2V (Vehicle-2-Vehicle) a komunikace vozidla s okolím V2I (Vehicle-2-Infrastructure) [39], [40]. Díky dnešnímu využívání LED diod ve světlometech aut, veřejným osvětlením a dopravním značení je možné tyto zdroje záření používat k přenosu informací mezi vozidly, nebo prvky infrastruktury. Taková síť je potom schopná rychle předávat data o nebezpečných situacích a umožní tak rychlejší reakce v nepředvídaných situacích. Dále může předávat například informace o nehodách, objíždkách, nebo jiných problémech a přispívat tak k plynulosti a bezpečnosti silničního provozu. To platí obzvláště v letních měsících, kdy online řešení navigací nestihá reagovat na všudy přítomné práce na silnicích a s tím spojené uzavírky. Navíc může pomoci této komunikace řidič například požádat o pomoc kolemjedoucí řidiče.

Výhodou je možnost předávání informace z V2V postupně, takže není potřeba vysílat nijak vysokým výkonem, protože auto nejbližší k vysílači zprávu přijme a automaticky jí může přeposlat k autu za sebou a tak dále dle potřeby (obr. 2.13). Přenos informací mezi rychle se pohybujícími automobily totiž bude mít problémy v podobě zorného pole používaných fotodetektorů. Pokud budou automobily v nevýhodné pozici, tak se nemusí signál dostat k fotodetektoru. Toto chování je pozorovatelné i při použití zmenšených modelů [55].

Stejně tak lze do systému zahrnout například i cyklisty, kteří by mohli s jednoduchou a cenově nenáročnou úpravou osvětlení vysílat údaje o své přítomnosti na silnici za snížené viditelnosti atd.

S rostoucím počtem aut na silnicích se tento, nebo jemu podobný, systém stane doslova nutností, což dokazuje i rostoucí zájem o tyto technologie ze strany správců komunikací i výrobců aut.



Obr. 2.13: Příklady V2V komunikace (vlevo) a V2I komunikace (vpravo).

2.2.3 Navigace uvnitř budov

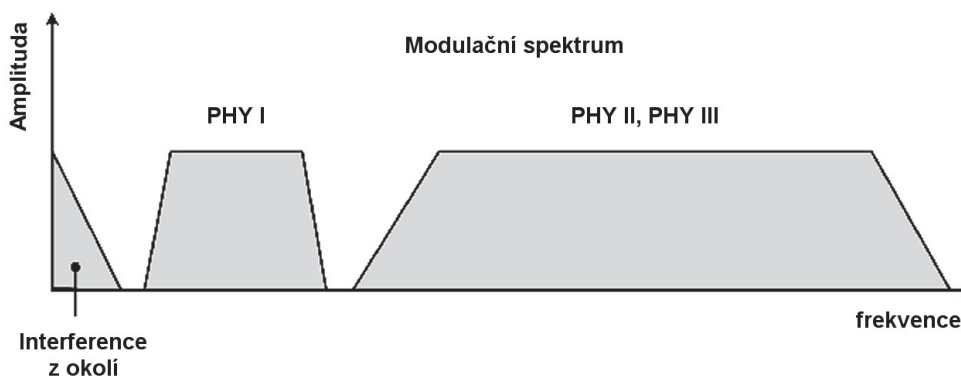
Tato aplikace využívá potřeby bezprostřední blízkosti vysílače a přijímače, kterou jsou VLC systémy omezeny. Díky tomu lze jednoduše a spolehlivě určit místo, kde se aktuálně mobilní zařízení nachází. Navíc funguje i uvnitř budov, kam signál GPS nedosáhne a ani ostatní rádiové technologie neposkytnou dostatečně přesnou polohu. Využití si tato technologie může najít například v podobě navigace uvnitř velkých budov, nebo obchodních centrech, ale může se rovněž použít na jakýchkoliv místech s odpovídajícím LED osvětlením [41].

Přenos informace o poloze navíc není nijak datově náročný, protože v podstatě jde pouze o přenos několika souřadnic, případně pouze fyzické MAC adresy zařízení. Takže může probíhat i na nižších frekvencích odděleně od datové komunikace. Teoreticky by se tak pro tuto aplikaci daly využít například i stávající mobilní telefony s fotoaparátem, který by mohl posloužit jako fotodetektor.

2.2.4 IEEE 802.15.7

IEEE 802.15 představuje standard známý jako WPAN (Wireless Personal Area Network) [42]. Tento standard obsahuje několik norem, například 802.15.1 je známý jako Bluetooth, nebo 802.15.4 představuje popis technologie ZigBee. V prosinci 2011 přibyla i část VLC označená jako 802.15.7 [2], [43].

Architektura standardu řeší problematiku pozorovatelnosti komunikace lidským okem a také možnost stmívání, aby bylo umožněno co největších úspor energie. Z hlediska přenosových rychlostí a použití je rozdělena do tří fyzických vrstev (PHY). Tyto vrstvy se liší především přenosovou rychlostí a modulační frekvencí, ale jsou zde i rozdíly v modulačních schématech, kódování a způsobech využití. Parazitní vlivy okolního světelného záření představují spíše nízkofrekvenční rušení, proto většinou stačí tyto části odfiltrovat a přesunout komunikaci k vyšším frekvencím, kde již je rušení mnohem menší, jak je ukázáno na obrázku 2.14.

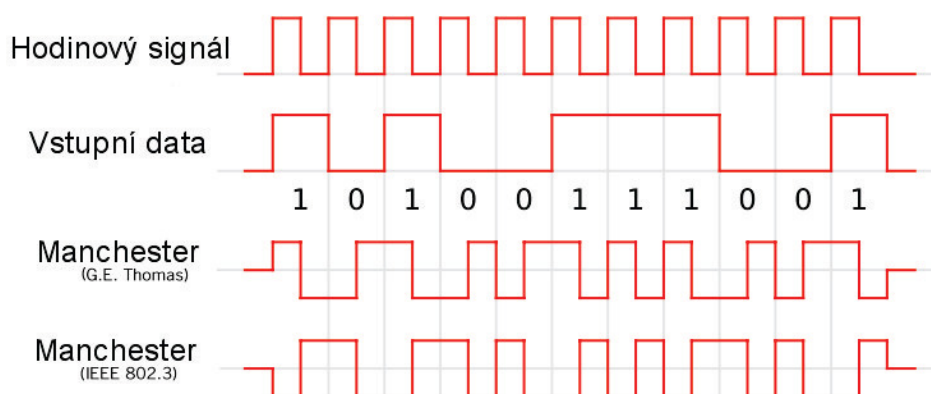


Obr. 2.14: Frekvenční spektrum jednotlivých fyzických vrstev 802.15.7.

PHY I

Základní a zároveň nejpomalejší vrstva. Její parametry byly optimalizovány pro odolné přenosy na delší vzdálenosti ve venkovním prostředí (přenos dat mezi automobily, pouličním osvětlením atd.) Pracovní frekvence jsou navrženy tak, aby využívaly výkonové LED diody, které pracují s velkými proudy, takže se zde počítá s maximem 400 kHz. Jako modulace zde slouží buď OOK (On-Off Keying), tedy jednoduchý případ, kdy zhasnuto znamená log. "0" a rozsvíceno představuje log. "1". Nebo je zde použito VPPM (Variabilní Pulzně-Polohové Modulace).

Základní metodou kódování je zde kód Manchester. Tento způsob kódování je velmi odolný proti rušení a snadno se na přijímači synchronizuje. Jeho princip je znázorněn na obrázku 2.15.



Obr. 2.15: Princip kódování Manchester.

Z obrázku 2.15 je patrné, že kódování neustále udržuje stejnou střední hodnotu signálu bez ohledu na přicházející data. Díky tomu je komunikaci nemožné pozorovat a je tak splněn základní požadavek pro VLC.

Naneštěstí je také patrné, že pro přenos dat potřebujeme vždy dva různé stavy pro přenos jediného užitečného bitu ("10" pro log. "1" a "01" pro log. "0", nebo naopak). Takže i přes vysoké modulační frekvence bude přenosová rychlost pouze polovinou potřebného přenosového pásma. I když kódování Manchester splňuje požadavky pro síť pracující ve viditelném spektru, tak bylo zapotřebí přenos dat nějakým způsobem zefektivnit, ale přitom zachovat odolnost a vlastnosti Manchesteru. To vedlo k využití kódování 4B6B.

Kódovací schéma 4B6B představuje systém, kdy každé 4 bitové slovo přeloží do 6 bitového slova, které se skládá vždy ze stejného počtu jedniček a nul, jak ukazuje následující tabulka (Tab 2.1). Díky tomu je převedeno 4 bitové slovo na 6 bitové, které vždy zachovává svou střední hodnotu. Navíc máme díky tomuto systému možnost snadno zjistit, jestli nedošlo k drobné chybě při přenosu, protože pokud nebudou v rámci slova přijaty 3 nuly a 3 jedničky, tak určitě nebylo slovo přeneseno správně.

Tab. 2.1: Kódovací tabulka 4B6B.

4B (4bit vstup)	6B (6bit výstup)
0000	001110
0001	001101
0010	010011
0011	010110
0100	010101
0101	100011
0110	100110
0111	100101
1000	011001
1001	011010
1010	011100
1011	110001
1100	110010
1101	101001
1110	101010
1111	101100

Přehled rychlostí a jednotlivých kódování pro PHY I je znázorněn v tabulce 2.2.

PHY II

Tato verze byla navržena pro vysokorychlostní přenosy ve vnitřních prostorech. Jednotlivé operační módy jsou v tabulce 2.3. I zde je použito pouze modulace OOK a VPPM, což již lze v dnešní době považovat za překonané. Nechybí zde ani podpora ochrany chyb pomocí Reed-Solomonových kódů pro případy, kdy bude signál vystaven rušení, nebo dojde k chybnému vyhodnocení některého z přenášených bitů. Pracovní frekvence dosahují horní hranice 120 MHz při přenosové rychlosti 96 Mb/s, nicméně pouze v případě, kdy není implementována oprava chyb.

PHY III

Vrstva PHY III byla navržena pro vnitřní aplikace, při kterých máme možnost využít RGB LED diod. Pro modulaci se zde využívá CSK (Color Shift Keying). Tedy systém klíčování barev, při kterém každá barva představuje určitou bitovou hodnotu. Na následujícím obrázku 2.16 je znázorněn příklad konstelačního diagramu pro 4CSK.

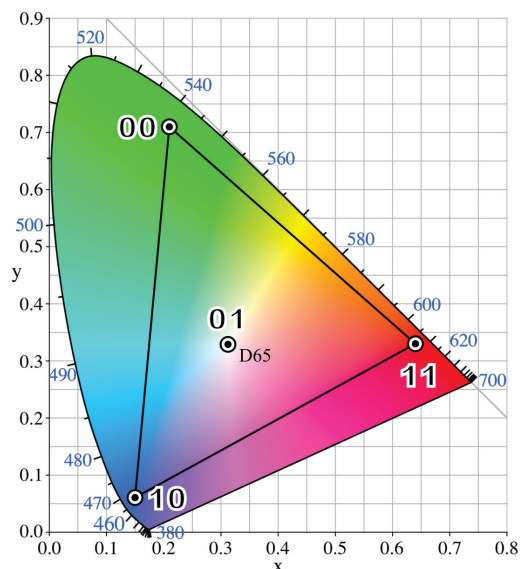
Z obrázku 2.16 je patrné, že u RGB (Red Green Blue) modelu máme k dispozici pouze 3 základní barvy. Pro získání čtvrtého stavu pak modulace spouští červenou, zelenou a modrou barvu současně a vytváří tak "bílou". Pro využití v osvětlování je ale jasné, že bez dalších úprav by taková modulace neposkytovala stabilní barevnou teplotu. Proto

Tab. 2.2: Operační rychlosti 802.15.7 - PHY I.

Modulace	Kódování	Optická Frekvence	Oprava chyb	Rychlost [kb/s]
OOK	Manchester	200kHz	RS(15,7), CC(1/4)	11,67
OOK	Manchester	200kHz	RS(15,11), CC(1/3)	24,44
OOK	Manchester	200kHz	RS(15,11),CC(2/3)	48,89
OOK	Manchester	200kHz	RS(15,11)	73,30
OOK	Manchester	200kHz	není	100,00
VPPM	4B6B	400kHz	RS(15,2)	35,56
VPPM	4B6B	400kHz	RS(15,4)	71,11
VPPM	4B6B	400kHz	RS(15,7)	124,40
VPPM	4B6B	400kHz	není	266,60

Tab. 2.3: Operační rychlosti 802.15.7 - PHY II.

Modulace	Kódování	Optická Frekvence	Oprava chyb	Rychlost [Mb/s]
VPPM	4B6B	3,75MHz	RS(64,32)	1,25
VPPM	4B6B	3,75MHz	RS(160,128)	2
VPPM	4B6B	7,5MHz	RS(64,32)	2,5
VPPM	4B6B	7,5MHz	RS(160,128)	4
VPPM	4B6B	7,5MHz	není	5
OOK	8B10B	15MHz	RS(64,32)	6
OOK	8B10B	15MHz	RS(160,128)	9,6
OOK	8B10B	30MHz	RS(64,32)	12
OOK	8B10B	30MHz	RS(160,128)	19,2
OOK	8B10B	60MHz	RS(64,32)	24
OOK	8B10B	60MHz	RS(160,128)	38,4
OOK	8B10B	120MHz	RS(64,32)	48
OOK	8B10B	120MHz	RS(160,128)	76,8
OOK	8B10B	120MHz	není	96



Obr. 2.16: Konstelační diagram pro 4CSK [2].

Tab. 2.4: Operační rychlosti 802.15.7 - PHY III.

Modulace	Optická Frekvence	Oprava chyb	Rychlost [Mb/s]
4-CSK	12MHz	RS(64,32)	12
8-CSK	12MHz	RS(64,32)	18
4-CSK	24MHz	RS(64,32)	24
8-CSK	24MHz	RS(64,32)	36
16-CSK	24MHz	RS(64,32)	48
8-CSK	24MHz	není	72
16-CSK	24MHz	není	96

je potřeba signál vhodným způsobem upravovat, aby byly jednotlivé barevné složky pro lidský zrak stabilní. Dle 802.15.7 se to děje pomocí scramblingu, které má za úkol na výstupu vytvářet pseudonáhodné data, které budou potenciální nerovnováhy potlačovat a výstupní světelné záření si tak bude udržovat stálé barevné hodnoty.

Vyšší verze CSK se pak vytvářejí tak, že se LED diody rozsvěčují po dvou, případně i s různými intenzitami a vytvářejí tak další detekovatelné stavy. A zde se rovněž projevuje problém, kdy při třech barvách, které máme k dispozici, bude vždy jeden stav chybět. Což předjímá cíl této práce, který spočívá v doplnění modelu o čtvrtou barvu (žlutou).

Tabulka 2.4 znázorňuje jednotlivé rychlosti a parametry pro PHY III. Můžeme si zde všimnout například toho, jak vícestavová modulace pozitivně působí na používané pracovní frekvence, protože na rozdíl od PHY II zde pro dosažení 96 Mb/s stačí pouze 24 MHz.

Stmívání

Pro používání osvětlovacích systémů pro komunikaci je zde rovněž požadavek, aby se tato svítidla dala stmívat. Zejména pak přes den, kdy není díky světelnému záření z okolí další světelný zdroj zapotřebí. Tento požadavek vychází především z ekologického pohledu na věc a pro přenos dat představuje problém. U přenosu dat pomocí světla je to právě amplituda signálu, která je pro přenos v denním zarušeném prostředí důležitá pro zachování odstupů signálu od šumu. Namísto stmívání je tak přes den potřeba výstupní výkon spíše zvyšovat. A zůstává zde také všeobecný fakt, že při zachovávání komunikace nelze VLC svítidlo nikdy úplně zhasnout.

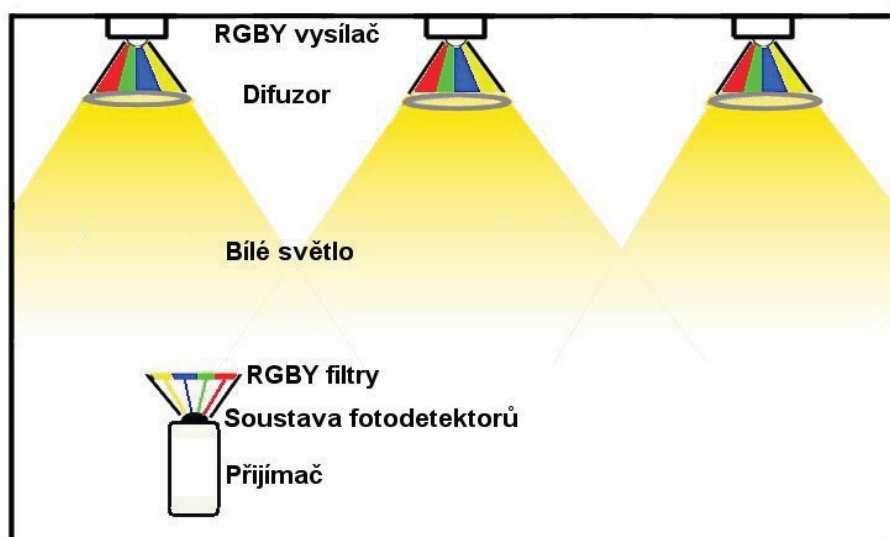
Možnosti stmívání máme v případě 802.15.7 celkem dvě.

- Snižování amplitudy signálu – má za následek menší dosah signálu, nebo snížení přenosové rychlosti, protože bude potřeba zvýšit citlivost fotodetektoru, a tím se logicky zvýší doba jeho odezvy.
- Vkládání stmívacích vzorců do přenášených dat – tento systém funguje tak, že užitečná data jsou pravidelně střídána sadami bitových posloupností, které mají posunout stejnosměrnou složku optického signálu. Například 16 bitů stmívání, 16 bitů dat a tak pořád dokola. I tento systém má ale své nevýhody, protože tím dochází k omezování přenosové rychlosti. Na druhou stranu ale můžeme zachovat potřebnou amplitudu signálu.

3 NAVRHOVANÝ SYSTÉM RGBY

Cílem navrhovaného systému RGBY je rozšíření stávajících řešení VLC tak, aby bylo umožněno rozšíření o další vlnovou délku a přitom byly jednotlivé systémy vzájemně kompatibilní. RGBY tak bude schopen pracovat na 4 vlnových délkách současně a přitom bude moci fungovat i v případě, že bude na vysílací straně použita třeba jen jedna bílá LED.

Jednou z hlavních priorit je vytvoření bílého světla na výstupu vysílací jednotky. Toho je docíleno pomocí difuzoru, který jednotlivé vlnové délky se na vysílací straně spojí a vytvoří tak bílé světlo, které bude sloužit pro funkci osvětlení místnosti. Na přijímací straně se pak pomocí soustavy filtrů jednotlivé vlnové délky oddělí a budou zpracovány odpovídajícími fotodetektory. Princip navrhovaného RGBY systému je zobrazen na obrázku 3.1.



Obr. 3.1: Princip fungování RGBY systému.

3.1 Současná řešení

V současnosti se systémy VLC soustředí především na bílé LED diody, tedy kombinace modrá LED a luminofor. Méně často se pak můžeme setkat s řešením RGB, kdy by bylo využito 3-barevných LED diod.

Směrem od uživatele pak všechny systémy, včetně nově navrhovaného, využívají blízkou IR oblast. Toto řešení má hned několik důvodů:

- Uživatel není obtěžován "zářícím" zařízením.
- Díky neviditelnému spektru nemusí být vysílač neustále aktivní – úspora energie.

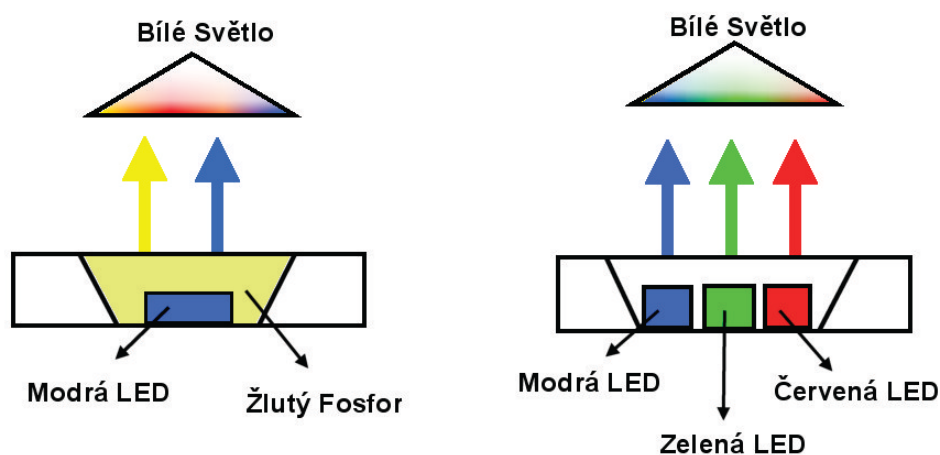
- Menší rušení okolním světlem – problematika okolních šumů je u VLC systémů známý pojem, nicméně je také fakt, že většina dnešních umělých osvětlovacích soustav v IR spektru již nepracuje a ani sluneční záření v této oblasti nepřestavuje takový problém (v porovnání s viditelnou částí spektra). To opět vede k úsporám energie, protože vysílač nemusí vysílat tak velkým výkonem [58].

3.1.1 Bílé LED

Důvodů k využití bílých LED je celá řada, prvním a největším argumentem je samozřejmě cena, protože výroba těchto LED v posledních několika letech dosáhla takového objemu, že ceny jsou dnes dokonce nižší, než u jejich "obyčejných" jednobarevných předchůdců. Navíc lze bez většího omezení volit barvu světla dle potřeby, což je většinou teple bílá v hodnotách kolem 2700-3000 K.

Princip fungování bílých LED je znázorněn na obrázku 3.2, společně se způsobem vytváření bílé barvy v případě diod RGB.

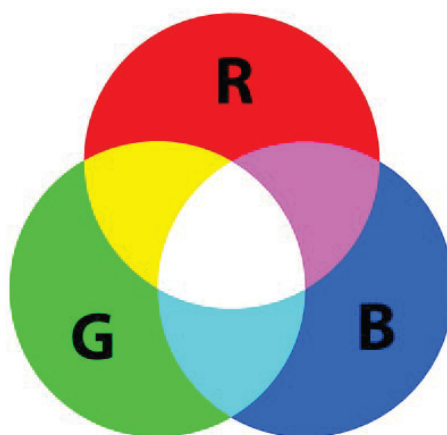
Na druhou stranu má tento systém i několik nevýhod, protože pro komunikaci lze využít pouze jeden komunikační kanál a případný větší počet zařízení se bude o tento kanál muset dělit. Komunikace s použitím těchto LED je založena na tom, že se pro komunikaci využívá pouze modrá část spektra, kde svítí zdrojové LED diody. Zbylé spektrum se pak na přijímací části odfiltruje, protože luminoforu nějakou dobu trvá, než zareaguje a vnáší do komunikace zpoždění náběžných a sestupných hran signálu [5]. Při pokrývání větších prostor je pak největším problémem vznik interferencí. Ty mají při větším počtu vysílačů za následek, že se v oblastech překryvu komunikujících svítidel objevují výrazné interferenční zóny, kde je komunikace nemožná (tyto oblasti mohou dosahovat i třetiny pokrývaného prostoru).



Obr. 3.2: Způsob vytváření bílého světla pro Bílou LED (vlevo) a RGB LED (vpravo).

3.1.2 RGB LED

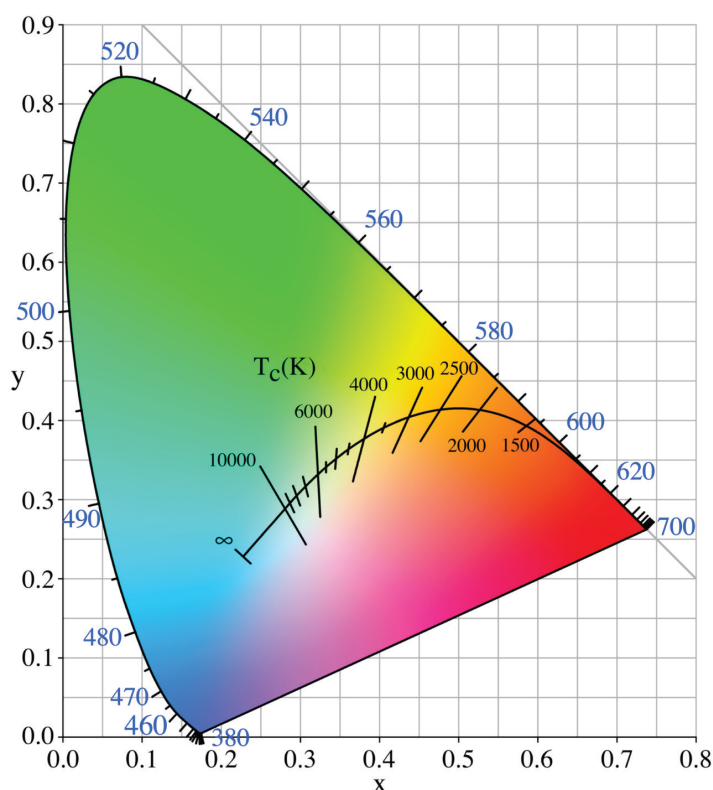
Tyto LED diody sice nabízejí z komunikačního hlediska mnohem lepší parametry, protože mohou nabídnout až 3 komunikační kanály, které nejsou rušeny žádným luminoforem. Blíže k červenému spektru navíc fotodetektory dosahují lepší účinnosti, takže i dosah signálu by na tom měl být lépe. Naneštěstí je zde několik významných problémů, díky kterým se toto řešení v podstatě nepoužívá. Především se jedná o potřeby osvětlení, protože RGB model zde vykazuje značné nedostatky. Začátek problému spočívá v získání bílé barvy. U zjednodušeného modelu aditivního míchání barev na obrázku 3.3 vše vypadá na první pohled v naprostém pořádku. Bílá barva se zde získá rozsvícením všech barev najednou.



Obr. 3.3: Adaptivní míchání barev s RGB LED.

Pro získání požadované bílé barvy o určité teplotě je ale potřeba přesného poměru mezi červenou, zelenou a modrou složkou. Na obrázku 3.4 je barevný diagram podle CIE 1931, ten znázorňuje barvy, které je schopen rozpoznat lidský zrak (ten rozpoznává barvy podle 3 vlnových délek, které dosahují vrcholu na přibližně 430, 535 a 570 nm). V něm jsou vyneseny odpovídající teploty záření černého tělesa. V běžném životě se u osvětlovacích soustav můžeme setkat s teplotami od 2700 K (teplá bílá), až po 6200 K (studená bílá) a ve výsledku má každá barva na lidský organizmus specifické účinky. Studenější odstíny obsahují větší podíl modré, což z evolučního hlediska lidský mozek vnímá jako signál, že je den a začne zvyšovat produkci serotoninu a omezovat produkci melatoninu. Produkce serotoninu má za následek vyšší aktivitu a pozornost, takže pro pracovní osvětlení jsou studenější odstíny ideální. Pro domácí osvětlení (především v nočních hodinách) je však studená barva světla vnímána negativně, protože hladina serotoninu klesá pomalu. V kombinaci s nízkou hladinou melatoninu, který má v lidském těle důležitou funkci řízení rytmu den/noc, pak může narušovat spánek. V domácnostech jsou tak v případě LED osvětlení upřednostňovány většinou teploty kolem 2700–3000 K. Zde je z hlediska RGB oproti bílým LED trochu výhoda, protože u vícebarevného modelu můžeme barvu

teoreticky libovolně měnit. Ráno a přes den tak může osvětlení pracovat ve studenějších odstínech a v noci pak přejít k teplejším.



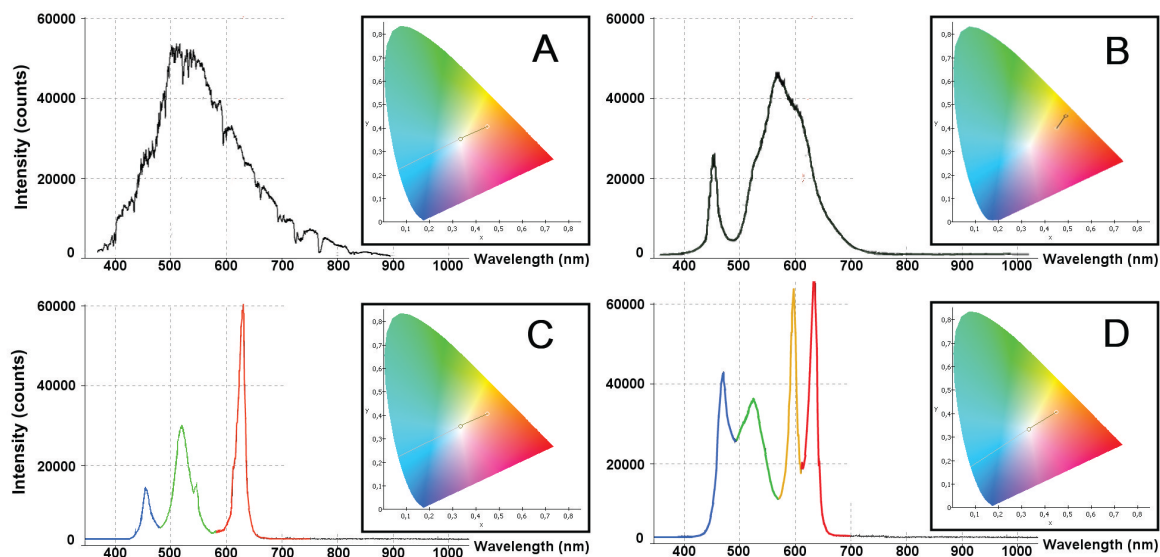
Obr. 3.4: Barevný diagram podle CIE 1931 vs. záření černého tělesa. [32]

Pokud vycházíme z faktu, že je uživateli preferováno světlo o teplotě kolem 2700 K, tak můžeme pozorovat, že podíl modré složky se výrazně sníží. Tím ale logicky poklesne i vysílací výkon a rozdíl ve výkonech pak bude mít za následek složitější detekci a menší komunikační dosah. Jednotlivé barvy se totiž v případě LED diod překrývají vlivem velkých hodnot FWHM.

Posledním problémem je pak stále počet barev, které máme k dispozici. 3 nezávislé komunikační kanály (barvy) jsou sice víc, než v případě bílé LED, ale z praktického hlediska nám pořád jeden komunikační kanál chybí. Ve světě dvojkové soustavy nám systém, který je schopen nabývat 3 stavů výrazně nepomůže.

3.2 Podstata RGBY

RGBY systém je v zásadě podobný systému RGB, ale pro funkci využívá 4 barvy namísto 3 barev. Červená, zelená a modrá zde jsou doplněny ještě o žlutou, která obsazuje volné místo v barevném spektru. Pro názornost jsou na následujícím obrázku (Obr. 3.5) znázorněny příklady průběhů barevných spekter pro různé LED zdroje světla v porovnání se spektrem slunečního světla.



Obr. 3.5: Porovnání spekter (A: denní světlo, B: bílá LED, C: RGB LED, D: RGBY LED).

Z obrázku 3.5 je patrné, jak nízké intenzity dosahuje modrá složka u RGB modelu. Dokonce ani u bílé LED nejsou hodnoty nijak závratné. U bílé LED je to zde způsobeno tím, že se jedná o variantu s teplotou barvy 2700 K, tudíž je modrá složka, v porovnání se zbytkem spektra, nižší. Zbývající spektra pak shodně odpovídají teplotám kolem 5500 K. Výhoda přidání žluté barvy do spektra je dobře vidět na obrázku 3.4. Žlutá je totiž, v rámci barevných souřadnic, umístěna na opačné straně od modré. Díky tomu na sebe vzájemně působí - přidáním žluté se výsledná barva posune více doprava a přidáním modré se posune více doleva. Tato vlastnost je patrná z průběhů spektra pro zdroj RGBY, kdy díky přidání intenzity ve žluté části spektra mohlo dojít ke zvýšení intenzity modré části a přitom zůstala výsledná teplota barvy stejná. Nyní tak máme k dispozici 4 plnohodnotné komunikační kanály o dostatečném výstupním výkonu.

Výstupní výkony jednotlivých barev nyní, v porovnání s RGB, rovnoměrněji pokrývají oblast viditelného spektra. Získaná rovnováha rovněž přispívá k tomu, že ani při teplejších barevných teplotách nedochází k výraznému omezení modré složky spektra a komunikace přes modrou tak není znemožněna [62], [65].

3.2.1 Kompatibilita s ostatními systémy

Výše byly popsány tři VLC systémy, kdy každý pracuje trochu jinak. Pro zajištění kompatibility je logicky třeba využít toho, co mají všechny tři systémy společné. Kompatibilita jednotlivých systémů tak závisí právě na modré barvě. A to především díky bílým LED, které zde mají hlavní komunikační oblast. Pro rychlosti řádově nepřesahující 1 MHz lze samozřejmě použít jakoukoliv společnou část spektra, ale počet kanálů bude ve zbytku spektra vlivem rušení stejně nepoužitelný. Stále tak zůstáváme u kompatibility přes modrou barvu, kdy bez ohledu na systém bude tato barva vždy fungovat pro libovolnou kom-

binaci přijímače a vysílače (za předpokladu, že se zbytek systému už lišit nebude). Způsob komunikace, jako například kódování, musí samozřejmě zůstat kompatibilní a složitější systémy musí s touto možností počítat. Komunikace směrem od mobilní stanice k VLC svítidlu (Uplink) je ve všech případech veden v IR oblasti (kolem 950 nm), takže z hlediska kompatibility nepředstavuje problém. Ve výsledku pak může omezení vznikat pouze z pohledu přenosové rychlosti a možného rušení u složitějších systémů s více základnovými stanicemi.

V případě základnových stanic s bílými LED budou všechny mobilní stanice pracovat pouze s modrou částí spektra (bez ohledu na typ mobilní stanice).

V případě, že bude základnová stanice RGBY, tak si mohou mobilní stanice samy zvolit pracovní vlnovou délku (podle toho, kterou disponují).

3.2.2 Pokrývání prostoru – buňkový systém

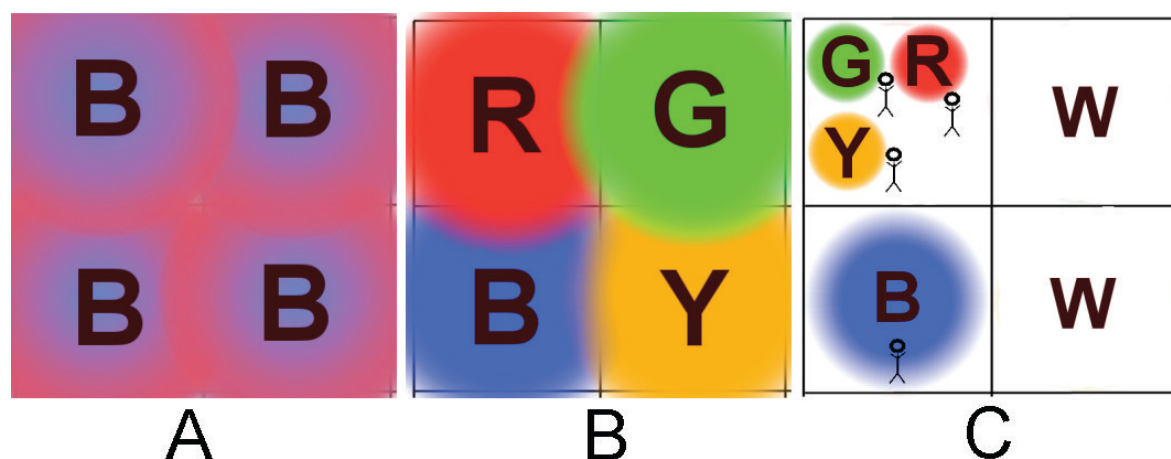
Způsob pokrývání prostoru má, oproti předchozím modelům, značnou výhodu. Vycházíme-li z předpokladu, že většina pokrývaných prostor bude mít obdélníkový tvar, tak sudý počet komunikačních vlnových délek umožní jednodušší rozdělení prostoru do menších buněk.

Rozdělení prostoru do menších buněk je v případě větších prostor nutností. Představme si velkou místnost, která bude pro pokrytí signálem vyžadovat více než jednu základnovou stanici. Pokud ale použijeme více základnových stanic, tak i v případě precizní synchronizace bude na jejich hranici docházet ke zkreslení přenášeného signálu. V případě, že stanice synchronizované nebudou, tak vznikne na hranici těchto oblastí interferenční zóna, která komunikaci v podstatě znemožní.

Na obrázku 3.6 jsou pro názornost porovnány různé případy, kdy jsou v místnosti použity 4 základnové stanice. V prvním případě (Obr. 3.6a) komunikují na stejné vlnové délce a v hraničních částech tak vzniknou interferenční zóny (viz. podkapitola Interference). Velikost těchto interferenčních zón nezasahuje příliš daleko, takže v centrálních částech je komunikace v pořádku. Na obrázku 3.6b je pak komunikace rozdělena na jednotlivé vlnové délky a každá základnová stanice komunikuje pomocí právě takové vlnové délky, kterou nepoužívá žádná sousední stanice. Výsledkem je umožnění komunikace v celém pokrývaném prostoru bez vzniku nežádoucího rušení.

Navíc má v tomto případě systém tu vlastnost, že vzniklou RGBY matici z obrázku 3.6b můžeme neustále opakovat. V žádném případě totiž nemůže dojít k tomu, že by se vedle sebe ocitly dvě stejné vlnové délky (na rozdíl od systému RGB [31]).

Zachování bílé barvy v pokrývaném prostoru je umožněno tak, že zbylé barvy vždy kontinuálně svítí. To zajišťuje z hlediska rušení přinejhorším transponování přijímaného signálu o malou DC složku, která je snadno odfiltrována a nepředstavuje problém. V tomto případě si navíc základnová stanice vystačí pouze s jedním modulátorem, protože stačí vysílat pouze na jedné vlnové délce.



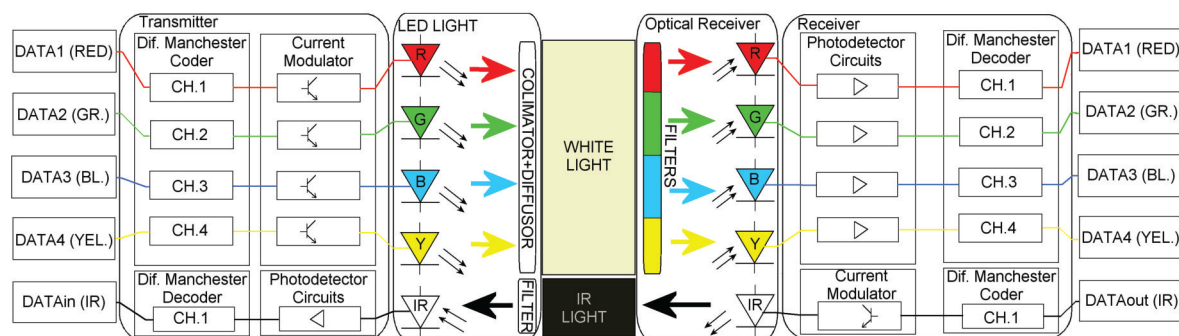
Obr. 3.6: Rušení v buňkovém systému: Bílá LED (A), RGBY (B), Dynamické přidělování RGBY (C).

Ve specifických případech pak můžeme jednotlivé vlnové délky například pevně přidělit daným zařízením a ty potom v rámci prostoru sledovat a komunikovat dle potřeby. Pevné přidělení vlnové délky pak ale může způsobit problémy v případě, že je v oblasti více uživatelů než vlnových délek. Na příkladu z obrázku 3.6c můžeme vidět, kdy se 3 osoby nachází v oblasti jedné základnové stanice. Systém v tomto případě převede komunikující vlnové délky na odpovídající stanici a u nepoužívaných stanic přejde do DC režimu (žádná modulace). Tato funkce může mít své uplatnění i v případě, že počet uživatelů jedné vlnové délky je sice větší než 1, ale je omezen. Pokud tedy v nějaké oblasti již není místo, potom může systém zapůjčit vlnovou délku z oblasti, kde komunikace neprobíhá. RGBY model je tak mnohem flexibilnější a snadněji se může adaptovat dle aktuálních potřeb uživatelů v porovnání s použitím pouze bílých LED.

3.2.3 Princip konstrukce

Konstrukce systému vychází z blokového schématu na obrázku 3.7. Vysílač má funkci základnové stanice, která je pevně umístěna na stropě a plní funkci osvětlení a komunikace současně. Je vybavena 4 vysílacími diodami (RGBY) a jednou IR přijímací fotodiodou. Na výstupu svítidla je použit difuzor, který má za úkol jednotlivé barvy smíchat tak, aby vytvořily homogenní bílé světlo bez případných barevných odchylek. Přijímač má funkci mobilní stanice a v rámci sítě se může volně pohybovat, k dispozici má 4 fotodetektory opatřené optickými filtry, které rozdělí bílé světlo zpět na jednotlivé barevné složky.

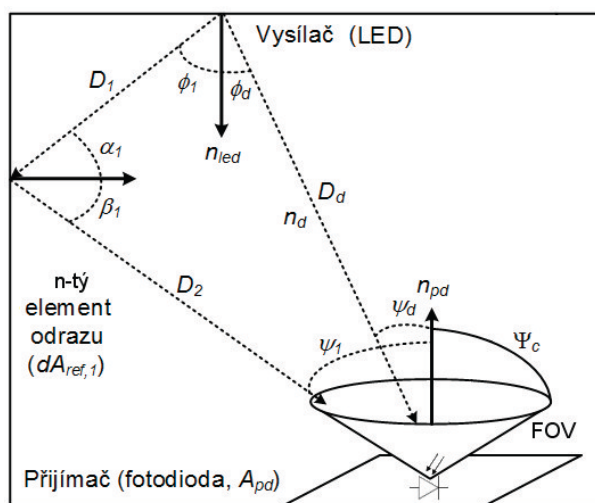
Největším problémem konstrukce je spojení jednotlivých barev. Pokud na difuzoru nedojde k rovnoměrnému splynutí, bude výsledek snadno detekovatelný lidským zrakem. Základním způsobem řešení tohoto nežádoucího projevu je přiblížení jednotlivých LED diod navzájem co nejbližší. Ideálně pak rovnou všechny vysílací LED diody umístit na jeden společný "čip".



Obr. 3.7: Blokové schéma RGBY systému. [65]

3.2.4 Výpočet pokrytí prostoru

Komunikační dosah systému bude vždy závislý na optickém výkonu dopadajícím na fotodetektor. Ten bude mít v této oblasti vždy nějakou mezní hodnotu, kterou je schopen spolehlivě detekovat. Na obrázku 3.8 je příklad takového bezvláknového optického kanálu. Výkon dopadající na fotodetektor se bude samozřejmě v jednotlivých místech pokrývaného prostoru lišit, což je také důvod, proč byly v rámci této práce prováděny měření a počítačové simulace.



Obr. 3.8: Optický bezvláknový kanál.

V optických komunikacích se zdroje LED, a zároveň i případné odrazy, popisují jako tzv. Lambertovské zdroje. To znamená, že optické záření má kosinovou závislost na úhlu ϕ od normály vyzařovací plochy, kterou lze popsat jako [47]:

$$I(\phi) = \frac{d\Omega}{dP_t} = I(0)\cos^m(\phi) = P_t \frac{m+1}{2\pi} \cos^m(\phi), \quad (3.1)$$

kde $I(0)$ je svítivost zdroje optického záření v normále vyzařovací plochy, ϕ je úhel od normály vyzařovací plochy, kde $I(0) = I(\phi = 0)$ označuje směr s maximální svítivostí, $d\Omega$

je prostorový úhel vztažený k svítivosti $I(0)$, m je řád Lambertovských zdrojů optického záření a pro polovinu vyzařovací charakteristiky vysílače $\phi_{1/2}$ ho vyjadřuje vztah

$$m = -\frac{\ln 2}{\ln(\cos \phi_{1/2})}. \quad (3.2)$$

Pro výpočet optického výkonu dopadajícího na fotodetektor (P_{pd}) pak budeme potřebovat znát výkon vysílací části P_t plochu fotodetektoru A_{pd} , vzdálenost mezi fotodetektořem a LED (D_d) a vektory popisující směr maximální svítivosti vysílače, citlivosti přijímače a směr přímé viditelnosti mezi přijímačem a vysílačem (n_{LED} , N_{pd} a n_d) kdy vycházíme ze vztahu:

$$P_{pd} = P_t \frac{m+1}{2\pi} \langle n_{LED}, n_d \rangle^m \frac{A_{pd}}{D_d^2} \langle n_{pd}, -n_d \rangle. \quad (3.3)$$

V rámci temné místnosti budou odrazy od stěn minimální a účinnost komunikačního kanálu při existenci LOS pak můžeme popsat jako:

$$\eta_{LOS} = \frac{P_{pd}}{P_t} = \frac{A_{pd}}{D_d^2} \cdot \frac{m+1}{2\pi} \cdot \cos^m(\phi) \cdot \cos(\psi), \quad (3.4)$$

kde budeme potřebovat znát i ψ , což je úhel, pod kterým dopadá světelné záření na fotodetektor.

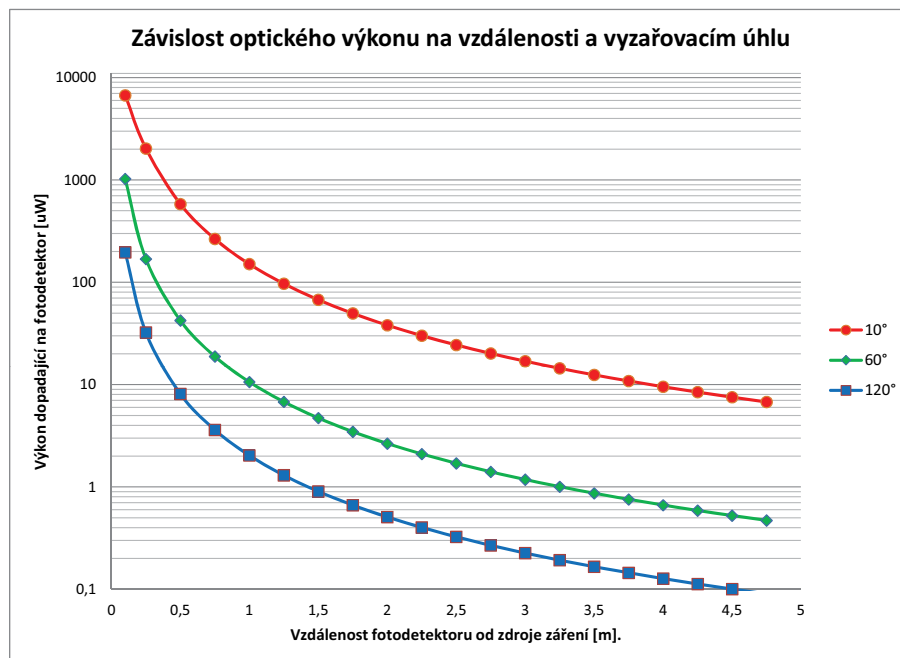
Pro potřeby případného zvyšování dosahu musíme zajistit vyšší výkon na fotodetektoru. Ze zmiňovaných vztahů tak máme hned několik možností:

- Úprava fotodetektoru – pomocí optiké soustavy můžeme uměle zvýšit plochu fotodetektoru (soustředit na něj světlo z větší oblasti), nicméně tím dojde k omezení jeho zorného pole (FOV).
- Zvýšit výkon vysílače - s rostoucím proudem ale může docházet k problémům při vyšších rychlostech, protože spínání vysokých proudů je z pohledu elektroniky časově náročnější.
- Umístit přijímač blíže k vysílači – tento způsob sice většinu problémů vyřeší (zejména při experimentech), protože se vzdáleností se výkonu ztrácí nejvíce, nicméně cílem je zvýšení dosahu, nikoliv jeho omezení.
- Změna vyzařovacího úhlu vysílače – Lambertovský zářič má, ve své podstatě, většinu svého výkonu v úhlu kolem 120° , nicméně pro pokrytí místnosti může stačit i méně a tedy můžeme soustředit výkon do užšího svazku. Tím získáme více výkonu na menší ploše a v rámci této úpravy nebylo potřeba zvyšovat proud LED, nebo jinak upravovat její elektroniku. (výhodné, pokud je svítidlo umístěno ve velké výšce a osvětluje pouze malý prostor).

V případě, že neuvažujeme vlivy odrazů od překážek a známe potřebné parametry vysílače a přijímače, můžeme za předpokladu existence LOS vztah pro výpočet výkonu dopadajícího na fotodetektor zjednodušit na [17]:

$$P_{pd} = P_0 \cdot \frac{A_{pd}}{A_{tr} + \frac{\pi}{4} (\theta R)^2}. \quad (3.5)$$

Zde kromě plochy fotodetektoru (A_{pd}) budeme potřebovat znát ještě aktivní plochu vysílací části A_{tr} , vyzařovací úhel θ a vzájemnou vzdálenost R mezi vysílačem a přijímačem. Díky tomuto zjednodušení můžeme jednoduše vypočítat výkon dopadající na fotodetektor v závislosti na optice použité na straně vysílače.



Obr. 3.9: Výkonové hodnoty na fotodetektoru v závislosti na vzdálenosti a vyzařovacím úhlu vysílače (10°, 60° a 120°).

Na obrázku 3.9 můžeme vidět výsledky měření pro 1 W led diodu s různými variantami vazební optiky. Vynesené průběhy zde představují hodnoty vyzařovacích úhlů 10°, 60° a 120°. Na svislé ose je vidět optický výkon dopadající na plochu fotodetektoru. Vodorovná osa pak představuje vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem. Ve výsledku bude komunikační dosah určen prahem citlivosti obvodů fotodetektoru, tedy minimální hodnotou výkonu, který je fotodetektor schopen spolehlivě detekovat. Pokud bude fotodetektor mít tuto hranici například na hodnotě 10 μW , tak se v případě 120° optické soustavy pohybujeme pouze na hodnotách kolem 0,5 metru. Zúžením optického svazku na 60° pak v tomto případě může být vzdálenost mezi vysílací LED a fotodetektorem až 1 metr. V případě vyzařovacího úhlu vysílače na hodnotách 10° pak bude komunikační vzdálenost na hranici 4 metrů. V tomto případě už ale nelze předpokládat difúzní charakter komunikace, protože při tak malých vyzařovacích úhlech už jde spíše o spojení typu bod-bod.

Z grafu na Obr. 3.9 vyplývá, že pro zajištění použitelné komunikační vzdálenosti a mobility je u VLC sítí podmínkou, aby práh detekce přijímače dosahoval co nejnižších hodnot (v tomto případě okolo 0,1 μW). Dosažení hranice 0,1 μW je ale v zarušeném prostředí viditelného spektra velmi obtížné a přináší také omezení z hlediska přenosových rychlostí.

Dalším faktem, který lze z grafu na obrázku 3.9 vyvodit, je závislost zvyšování optického výkonu na vysílací straně a dosahu. Je zde totiž jasně vidět, že pokud potřebujeme zvyšovat dosah komunikace, tak zvyšování vysílacího optického výkonu je poněkud nevhodné, protože pro zdvojnásobení dosahu musíme zvýšit vysílací výkon hned čtyřnásobně. U vyšších výkonů je tak lepší cestou začít úpravami citlivosti na straně fotodetektoru.

3.3 Bezporuchovost a RGBY

Další důležitou otázkou je chování systému z pohledu bezporuchovosti. Systém RGBY je složen z většího počtu součástí než jeho předchůdci založení na bílých LED, nebo RGB. To vede k zamyšlení, jak moc tento fakt ovlivní systém z hlediska spolehlivosti. Střední doba mezi poruchami (MTBF) je sice u LED diod velmi vysoká, ale i zde se s rostoucí složitostí systému může projevit omezení.

Nejprve je třeba definovat úhel pohledu na případné poruchy, protože některé nemusí nutně znamenat neřešitelný problém.

- Porucha = okamžitá a úplná ztráta nějaké funkce.
- Chyba = snížení výkonnosti - omezení nějaké funkce.

Pro zachování funkce komunikace teoreticky stačí i 1 funkční LED ze 4. – Tento model by ale znamenal, že na výstupu už nebude zachováno bílé světlo, a tím by už systém "neplnil" funkci osvětlení.

Výpadek jedné LED by šel teoreticky vyrovnat změnou intenzit ostatních LED. – U žlutých LED diod výrobci udávají mnohem menší MTBF než v případě ostatních barev (přibližně poloviční), takže by systém mohl být připraven na její předčasný výpadek. Tak by byla zachována funkce osvětlení a funkce komunikace s omezením. Tento případ ale platí pouze pro výpadek žluté LED. Navíc by takový výpadek bylo nutno nějak detekovat a v případě složitějších systémů podle toho upravit i nastavení okolních svítidel (Změnit komunikační vlnové délky sousedních buněk atd.).

Patrně nejproblematičtější část systému bude část modulátorů, které budou mít na starost komunikaci. Cílem řešení tedy je v první řadě to, aby byl vliv těchto modulátorů na osvětlovací funkce naprosto minimalizován. Při přímé modulaci LED pomocí nějakého spínacího prvku totiž hrozí, že při jeho poruše dojde k přerušení dodávky proudu (takže svítidlo pak přestane svítit, i když bude LED a napájecí zdroj pořádku). V tomto případě v podstatě nabízí jen jedno řešení a to je modulační obvod Bias Tee [48]. Do obvodu mezi LED a napájecí zdroj tak přibude jen cívka, která by svou spolehlivostí systém neměla nijak výrazně omezovat a můžeme tak posuzovat pouze bezporuchovost samotného RGBY svítidla.

Nejlogičtější je ten případ, kdy poruchu systému vyvolá:

- Ztráta jakékoliv výstupní barvy (poškození LED),
- porucha na napájecím zdroji,

- porucha na cívce BIAS TEE.

U použití modulátorů typu BIAS TEE při výpadku komunikace nedojde ke zhasnutí LED. Případné poruchy na sofistikovanější elektronice, která se bude případ od případu lišit, můžeme teoreticky zanedbat (prakticky pak ovšem nesmíme zapomenout na případ, kdy by došlo k chybě na všech komunikačních kanálech – potom by totiž komunikace již nebyla možná).

3.3.1 Definice veličin

Pro určení bezporuchovosti máme k dispozici 4 základní veličiny [35]

- $f(t)$ – Hustota pravděpodobnosti [-]
- $F(t)$ – Pravděpodobnost poruchy [-]
- $R(t)$ – Bezporuchovost [-]
- $\lambda(t)$ – Intenzita poruch – popisuje číselně počet poruch za jednotku času [1/hod]

Každá z těchto zmiňovaných veličin úplně popisuje bezporuchovost a z každé z nich je, díky vzájemné provázanosti, možné odvodit 3 zbývající.

Hustota pravděpodobnosti ($f(x)$) vyjadřuje pravděpodobnost, že náhodná veličina X nabude hodnoty z nekonečně malého intervalu dx :

$$f(x)dx = P(x \leq X \leq x + dx). \quad (3.6)$$

Pokud uvažujeme tyto hodnoty v čase t , potom používáme označení $f(t)$.

Pravděpodobnost poruchy ($F(t)$) je distribuční funkcí základní sledované veličiny, což je doba od uvedení výrobku do provozu do poruchy výrobku. Vztah mezi hustotou pravděpodobnosti a pravděpodobností poruchy je popsán vztahem:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx}. \quad (3.7)$$

Pravděpodobnost poruchy popisuje pravděpodobnost, že náhodná veličina X nabude hodnoty menší, nebo rovné, než hodnota x a je obecně definována jako:

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx. \quad (3.8)$$

$R(t)$ je interpretována jako pravděpodobnost bezporuchového stavu v čase t . Jedná se o takzvanou doplňkovou funkci k $F(t)$ do jedničky a je dána vztahem:

$$R(x) = P(X \geq x) = 1 - F(x). \quad (3.9)$$

Intenzita poruch je definována, jako podmíněná pravděpodobnost toho, že porucha nastane za nekonečně malý okamžik dx za podmínky, že do okamžiku x porucha nenastala. Obecně pak:

$$\lambda(x) = \frac{f(x)}{R(x)}. \quad (3.10)$$

3.3.2 Výpočet bezporuchovosti

Vzhledem k povaze systému se v tomto případě bude jednat o sériový systém, tedy kterákoliv část systému ve stavu poruchy způsobí poruchu celého systému. Systém tak bude vypadat následovně:



Obr. 3.10: Blokové schéma RGBY systému pro bezporuchovost.

Výpočet sériového modelu pak bude probíhat pomocí vztahu:

$$R(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot R_3(t) \cdot \dots \cdot R_n(t). \quad (3.11)$$

V případě, že půjde o paralelní zapojení, využije se výpočtu pomocí distribuční funkce $F(x)$, kde:

$$F(t) = F_1(t) \cdot F_2(t) \cdot F_3(t) \cdot \dots \cdot F_n(t). \quad (3.12)$$

Pro elektroniku platí exponenciální rozdělení, takže pro výpočty pak můžeme použít vztahy:

$$R(t) = e^{-\lambda t}, \text{ resp. } F(t) = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (3.13)$$

V uvažovaném modelu pak intenzitu poruch pro exponenciální rozdělení definujeme jako:

$$\lambda(x) = \frac{1}{MTBF}. \quad (3.14)$$

kdy střední doba mezi poruchami MTBF (Mean Time Between Failures) je údaj, který lze od renomovaných výrobců většinou snadno získat. Díky tomuto údaji pak máme všechny potřebné údaje pro provedení potřebných výpočtů.

Pro výpočet sériového systému z obr.3.10 pak bude vztah vypadat následovně:

$$R(t) = e^{-\lambda_1 \cdot t} \cdot e^{-\lambda_2 \cdot t} \cdot e^{-\lambda_3 \cdot t} \cdot \dots \cdot e^{-\lambda_n \cdot t} = e^{-t \cdot (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n)}. \quad (3.15)$$

Do rovnice pak můžeme použít výrobcem udávané hodnoty MTBF. Pro ostatní jednotlivé elektronické součástky (například cívka modulátoru Bias Tee), u kterých hodnoty nemáme, můžeme použít například MTBF Calculator a hodnoty zvolit dle normy Bellcore iss.6 (ta se zabývá hodnotami MTBF pro telekomunikační účely) [49].

Pro provedení přehledových výpočtů a vykreslení grafů byly použity hodnoty z tabulky 3.1. Z tabulky MTBF je patrné, že hodnoty pro různé barevné verze se u LED diod výrazně liší. Vzhledem k rozdílným složením lze tento jev samozřejmě očekávat, stejně tak jako závislost na typu pouzdra atd., takže není problém narazit na LED diody, jejichž udávaná životnost je pod hodnotou 10000 hodin (např. XQAGRN při pracovní teplotě $105^\circ C$ má udávanou MTBF pouze 9490 hodin). A i z dalších uváděných hodnot je patrné, že s

Tab. 3.1: Uvažované hodnoty MTBF.

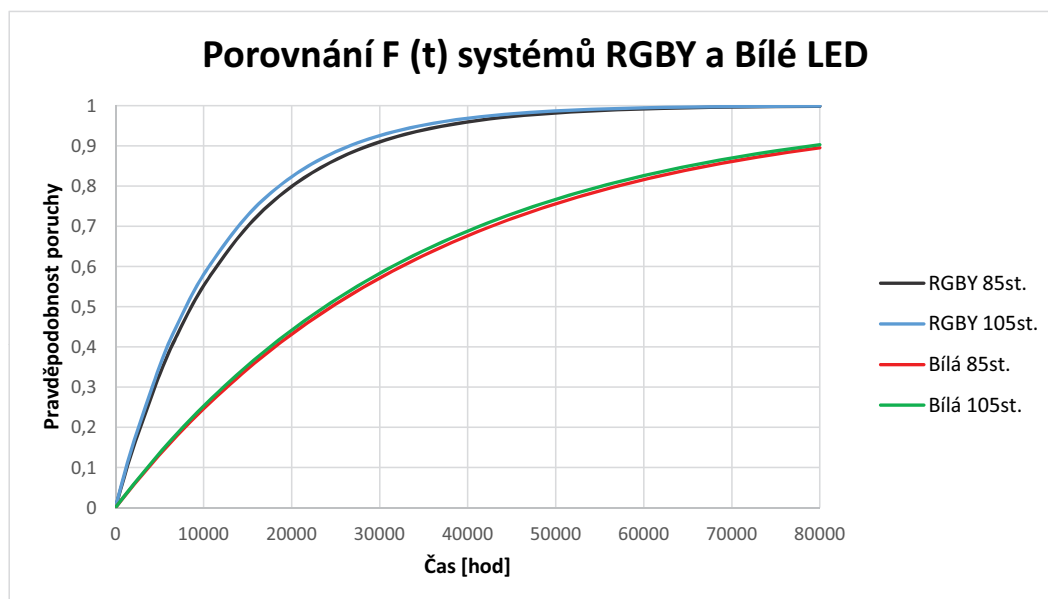
Součástka	MTBF [hodin] (85°C)	MTBF [hodin] (105°C)
Proudový zdroj MW LPC-20-350 [50]	786500 (při 25°C)	786500 (při 25°C)
Cívka Bias Tee [49]	841876180 (při 25°C)	841876180 (při 25°C)
LED bílá Cree XPEBWT [51]	37100	35900
LED červená Cree XPEBRD [51]	103000	72600
LED žlutá Cree XPEBAM [51]	33300	33300
LED zelená Cree XPEBGR [51]	51400	51400
LED modrá Cree XPEBBL [51]	51400	45400

rostoucí teplotou bude otázka bezporuchovosti mnohem důležitější (v některých případech klesla životnost se zmiňovanými rozsahy teplot až na polovinu).

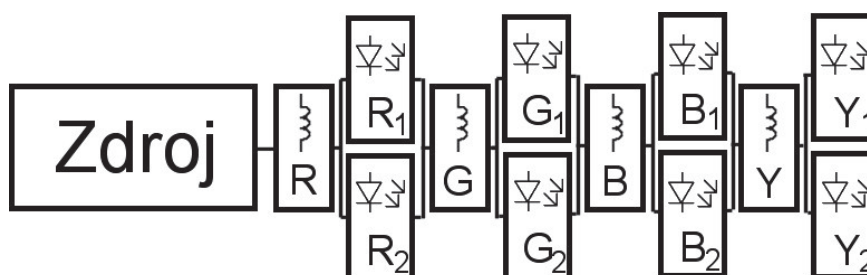
Na obrázku 3.11 můžeme vidět srovnání pravděpodobností poruch pro systém RGBY a pro systém s jednou bílou LED diodou. Z průběhů je zřejmé, že vliv teploty zde představuje jen malý rozdíl. V porovnání jednotlivých systémů jsou rozdíly mnohem větší. Díky vyšší složitosti systému lze jisté omezení předpokládat, nicméně příliš velký rozdíl ve spolehlivosti není z uživatelského hlediska žádoucí. Pro konstrukci svítidla se systémem RGBY je tedy vhodné najít způsob, kterým by bylo možné rozdíl pravděpodobnosti poruch alespoň omezit. Prvním krokem je samozřejmě snížení pracovní teploty.

Další důležitou veličinou, která výrazně ovlivňuje MTBF, je pracovní proud. Pokud nebudeme LED diodu zatěžovat maximálním dovoleným proudem, ale snížíme jej například na polovinu, tak i zde můžeme dosáhnout nezanedbatelného zlepšení doby životnosti. Nabízí se zde tedy možnost použít namísto jedné LED diody (Obr. 3.10), rovnou 2 LED diody paralelně (Obr. 3.12). Proud LED diodami se sníží na polovinu (čímž se teoreticky zvýší MTBF) a navíc v případě předčasné poruchy některé z LED diod bude zbývající dioda stále v provozu. Proud, který pak touto diodou protéká, nepřesahuje maximální hodnoty a není se tak třeba obávat předčasného zničení LED vlivem nadměrného proudu. Naneštěstí jsou hodnoty MTBF udávané výrobci v tomto ohledu neúplné (nepokrývají všechny výše zmiňované LED diody), takže u výpočtu bychom mohli pouze vycházet z předpokladu, že tato hodnota MTBF pak byla u většiny LED přibližně o 30% vyšší. Pro výpočet hodnot paralelního řazení LED tak bude lepší použít známé hodnoty MTBF a pozorovat tak pouze vliv změny zapojení oproti předchozímu případu.

Blokové schéma systému bude potom pro výpočet vypadat následovně (Obr. 3.12):



Obr. 3.11: Grafy průběhu pravděpodobnosti poruchy pro bílé a barevné LED s teplotou.



Obr. 3.12: Blokové schéma paralelního RGBY systému pro bezporuchovost.

Za předpokladu, že budou LED diody (nebo jiné prvky) zapojovány paralelně, bude pro výpočet nutné nejprve spočítat tyto paralelní části zapojení dle vztahu (3.12). Tak získáme náhradní bloky, se kterými pak dále počítáme jako v sériovém modelu. Pro jednotlivé paralelní bloky LED pak dostaneme:

$$R_{Rpar}(t) = 1 - F_{Rpar}(t) = 1 - [F_{R1}(t) \cdot F_{R2}(t)], \quad (3.16)$$

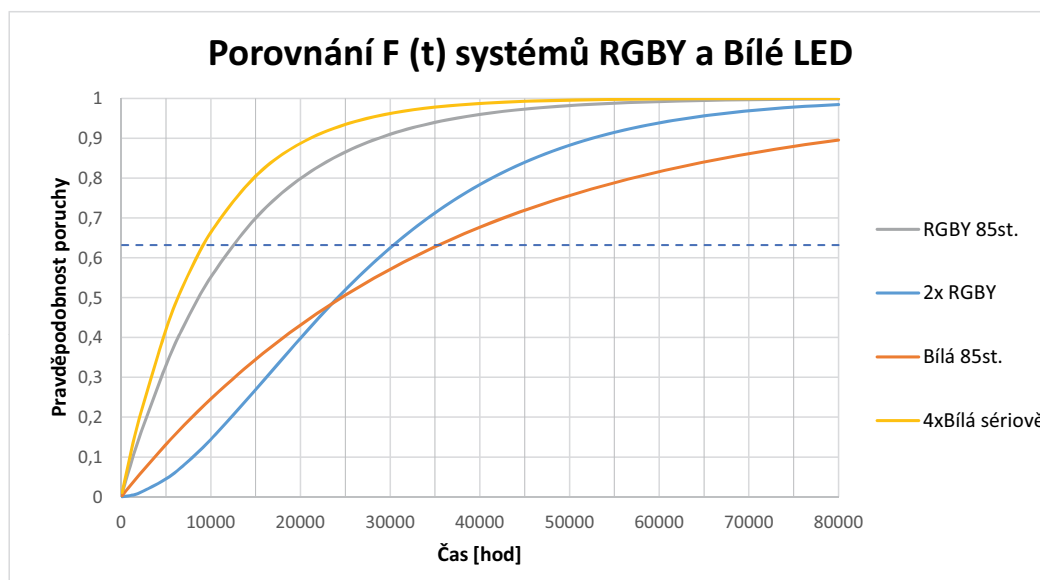
$$R_{Gpar}(t) = 1 - F_{Gpar}(t) = 1 - [F_{G1}(t) \cdot F_{G2}(t)], \quad (3.17)$$

$$R_{Bpar}(t) = 1 - F_{Bpar}(t) = 1 - [F_{B1}(t) \cdot F_{B2}(t)], \quad (3.18)$$

$$R_{Ypar}(t) = 1 - F_{Ypar}(t) = 1 - [F_{Y1}(t) \cdot F_{Y2}(t)]. \quad (3.19)$$

Dosažením do sériového modelu pak dostaneme:

$$R(t) = R_{zdroj}(t) \cdot R_{LR}(t) \cdot R_{Rpar}(t) \cdot R_{LG}(t) \cdot R_{Gpar}(t) \cdot R_{LB}(t) \cdot R_{Bpar}(t) \cdot R_{LY}(t) \cdot R_{Ypar}(t). \quad (3.20)$$



Obr. 3.13: Porovnání vlivu sériového zapojení bílých LED na průběh pravděpodobnosti poruchy.

Z průběhů výsledků na obrázku 3.13 je patrné, že díky relativně levné změně v zapojení, můžeme jednoduše zvětšit MTBF systému. V delším časovém horizontu jsme sice, oproti bílé LED diodě, stále v nevýhodě, ale rozdíl už není tak výrazný. Vliv zapojení na předpokládanou životnost zařízení je hlavním důvodem prováděných výpočtů, protože současným trendem v osvětlování je zapojení velkého počtu LED diod sériově. To je samozřejmě výhodné z hlediska napájení, protože výrazně poklesne proud a na zdroji se jednoduše zvýší napětí. Z hlediska bezporuchovosti je ale tento přístup velmi nevýhodný, což pro ukázkou představuje průběh označený jako "4xBílá sériově". Tento průběh představuje případ, kdy porovnáváme i ekvivalentní zapojení 4 bílých LED diod do série (což je nejpravděpodobnější řešení při použití stávajících osvětlovacích systémů). A jak je vidět, tak toto řešení je z pohledu porovnávaných systému nejméně výhodné.

Pro konstrukci komunikujícího LED svítidla tak bude nezbytné vzít v úvahu především možnosti zapojení použitých LED. Tabulka 3.2 vyjadřuje dosažené hodnoty MTBF, tedy kdy $F(t)=0,632$.

Tab. 3.2: Dosažené hodnoty MTBF.

Konfigurace LED	4xBílá v sérii	1xRGBY	2xRGBY paralelně	1xBílá
MTBF [hod]	9100	12600	30400	35500

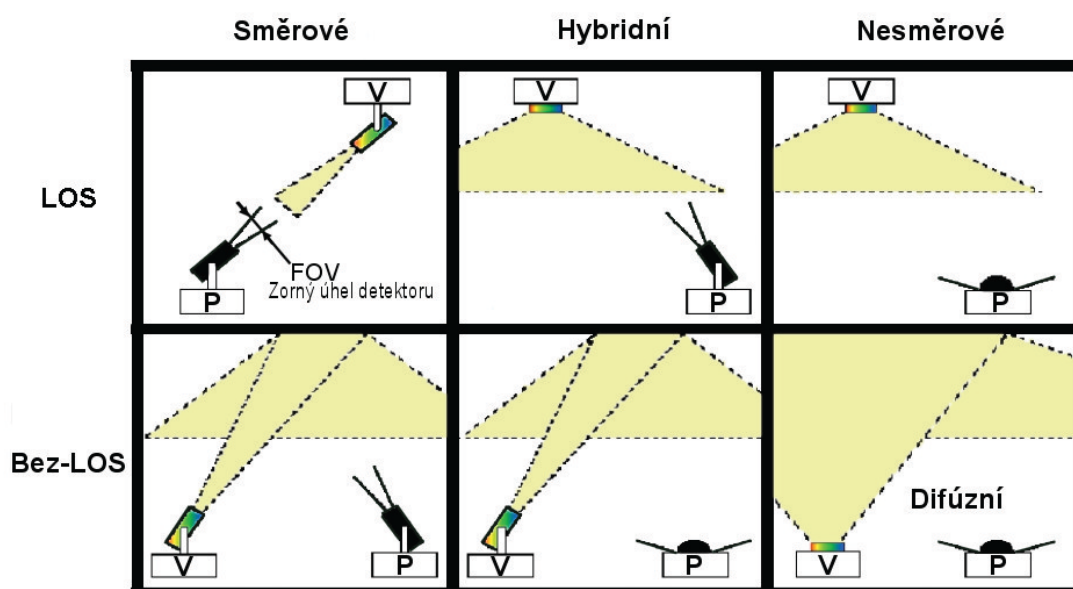
4 POKRYTÍ PROSTORU

Tato kapitola se zabývá způsoby pokrytí prostoru světelným zářením a jejich možnostmi pro přenos dat. A to od samotného návrhu až k výsledným měřením a simulacím.

4.1 Způsoby pokrytí prostoru

Základním pravidlem pro úspěšnou komunikaci ve vnitřních (i venkovních) bezvláknových optických sítích (BOS) je, že vysílané světlo nesoucí informaci musí v dostatečné míře dopadat na fotodetektor. Za ideální se zde samozřejmě považuje případ, kdy je dosaženo přímé viditelnosti mezi vysílačem a přijímačem. Existuje ale i několik způsobů, kdy je komunikace možná, i když na sebe vysílač a přijímač přímo nevidí [16].

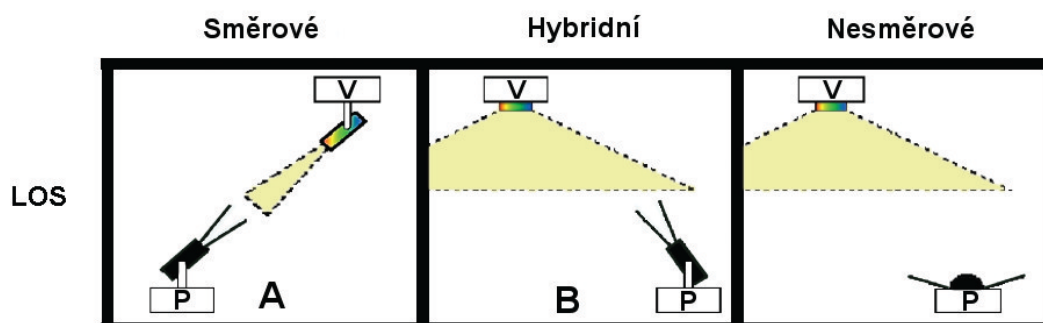
Na následujícím obrázku (Obr. 4.1) jsou jednotlivé způsoby pokrytí prostoru pomocí BOS znázorněny. Výběr vhodného způsobu pokrytí se odvíjí od několika faktorů a každý má své přednosti i omezení.



Obr. 4.1: Možnosti pokrytí prostoru v bezvláknových optických sítích.

Při pohledu na obrázek 4.1 se dostáváme k definici LOS (Line Of Sight) – "přímá viditelnost", která znamená, že vysílač a přijímač na sebe přímo vidí a komunikace probíhá bez nutnosti odrazů od překážek. Druhým pojmem, který je v tomto okamžiku nutné zmínit je zorné pole fotodetektoru FOV (Field Of View). FOV popisuje oblast, ze které je fotodetektor schopen přijímat data. Při potřebě zvýšit optický výkon dopadající na fotodetektor se totiž nejčastěji nabízí možnost použít čočku, nebo reflektor, který soustředí světlo z větší plochy na relativně malou plochu fotodetektoru. To má ovšem za následek zúžení zorného pole a přijímač tak je nutno pro potřeby LOS pečlivěji směřovat.

Příklady pokrytí, při kterých je zachováno LOS jsou vybrány na následujícím obrázku.



Obr. 4.2: Způsoby pokrytí při zachování LOS.

Obrázek 4.2A znázorňuje případ, kdy je optický signál z vysílače soustředěn do úzkého paprsku o vysokém výkonu a přijímací strana je opatřena optickou soustavou, která soustřeďuje co největší část výkonu na fotodetektor. Z hlediska přenosové rychlosti je toto bezpochyby nejlepší řešení, protože pro dosažení vysokých přenosových rychlostí jde v první řadě právě o úroveň výkonu, kterou jsme schopni na fotodetektoru zachytit. Na druhou stranu ale toto řešení postrádá možnost mobility, protože pokud se vysílač nebo přijímač budou pohybovat, tak bude nemožné udržet stabilní zaměření LOS, nebo bude výkon natolik kolísat, že budeme mít problém rozlišovat tok přenášených dat. V tomto případě tedy musí vysílač i přijímač udržovat stálou vzájemnou pozici.

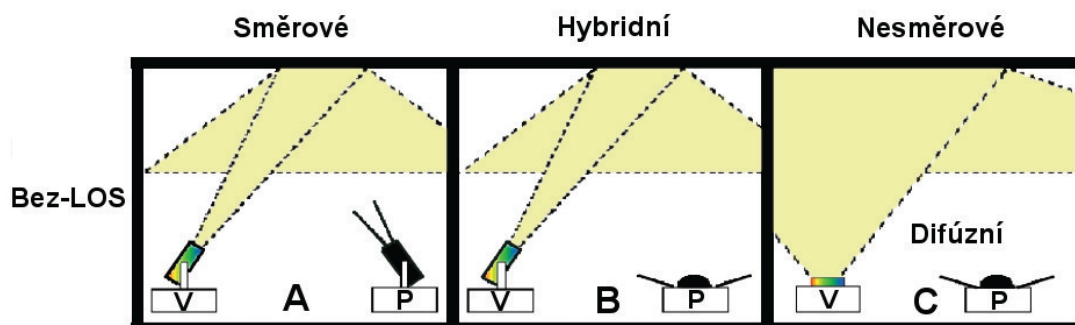
Obrázek 4.2B představuje situaci, kdy vysílací část není soustředěna do úzkého svazku, ale pokrývá větší oblast. Díky tomu je přijímači umožněno se pohybovat ve větším pokrývaném prostoru. Optický výkon, který vysílač vyzáří, se ale díky tomu rozptýluje na mnohem větší plochu. Výkon dopadající na fotodetektor je tak nižší (3.5).

Přijímač se to v tomto případě (4.2B) snaží snížení přenosové rychlosti zmírnit, proto je opatřen optickou vazební soustavou, která soustřeďuje na fotodetektor více optického výkonu. Z hlediska mobility tohoto řešení platí, že přijímač se nyní může pohybovat, ale stále musí zachovávat zaměření na vysílač.

Obrázek 4.2C znázorňuje nejpravděpodobnější způsob pokrytí pro mobilní optické sítě. Vysílač zde pokrývá širokou oblast a FOV fotodetektoru je dostatečně velké, aby byl umožněn vzájemný pohyb. Stále platí, že musí být zachována podmínka LOS, takže systém bude mít problémy při případném výskytu překážek mezi vysílačem a přijímačem. Přenosová rychlost se i v tomto případě zase o něco sníží, protože optická soustava s větším přijímacím úhlem nyní soustřeďuje na fotodetektor komunikační signál s nižší účinností. Navíc je zde větší nebezpečí rušení z okolních zdrojů záření (např. ze slunce, zářivek, monitorů, atd.). Stále se ale jedná o výhodný kompromis mezi mobilitou a přenosovou rychlostí.

Následující obrázek (4.3) ukazuje případy, kdy není zachována přímá viditelnost mezi vysílačem a přijímačem. V takových případech pak komunikace probíhá pomocí odrazů od

zdi, nebo jiných překážek nacházejících se ve vnitřních prostorách. Parametry takovýchto způsobů pokrytí budou vždy horší, než v případě dodržení LOS, nicméně pokud není našim cílem rychlost, ale vyšší mobilita, tak má tento způsob řešení své uplatnění. Pro všechny níže popisované konfigurace rovněž platí, že fotodetektory musí být mnohem citlivější, protože při odrazu se v závislosti na odrazném materiálu většinou nemalá část optického výkonu absorbuje, nebo rozptyluje do prostoru [18]. Světlo musí v tomto případě urazit mnohem větší vzdálenost a přijímaný výkon klesá, i v tomto případě, s druhou mocninou vzdálenosti (viz. (3.5)).



Obr. 4.3: Způsoby pokrytí bez zachování LOS.

U 4.3A probíhá komunikace díky odrazu od překážky (např. stropu místnosti). Pokud jde o chování systému, tak díky rozptýlení světelného záření na širší plochu se bude systém chovat podobně jako v případě 4.2B. Výkon dopadající na fotodetektor je ale mnohem nižší.

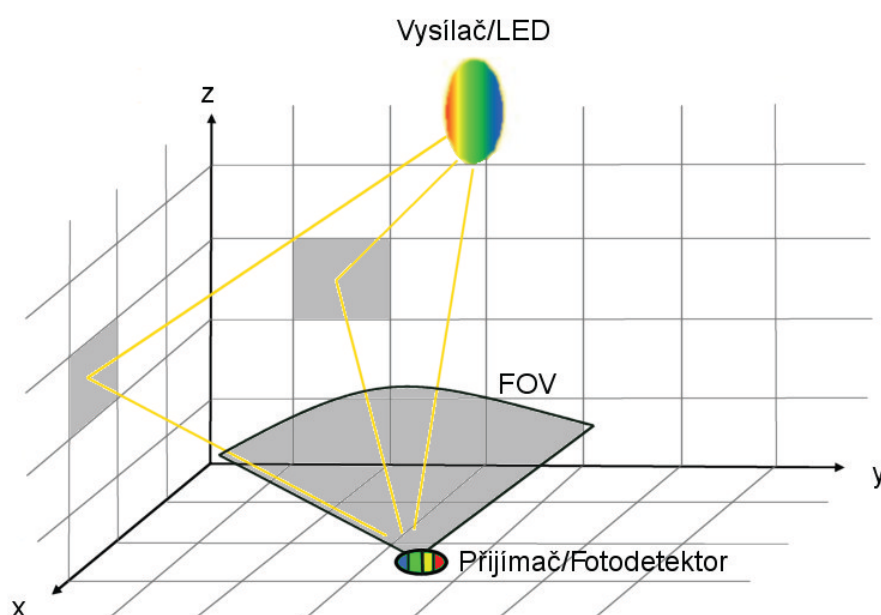
Obrázky 4.3B a 4.3C představují případ, kdy je odražené světelné záření zachycováno přijímačem s širokým FOV. Díky tomu může komunikace probíhat nejen v případech, kdy na sebe přijímač a vysílač nevidí, ale i v případech, kdy se vzájemně pohybují. Bohužel, v tomto případě bude úroveň optického signálu přijímaného fotodetektorem velmi malá. Přenosová rychlost bude v těchto případech s velkou pravděpodobností omezena na řády desítek až stovek kb/s. Nejedná se tedy o vysokorychlostní datový přenos, ale například pro přenos telefonního hovoru by tento systém stačil bez větších problémů.

4.2 Vícecestné šíření světla

Pokud jde o mobilní využití BOS, tak jsou výhodnější nesměrové způsoby pokrytí. Optický signál totiž bude na fotodetektor ve většině případů přicházet z více než jednoho směru. Největší část signálu bude na fotodetektor dopadat ze směru LOS (pokud bude k dispozici). Další část bude díky velkému zornému poli fotodetektoru (FOV) detekována po odrazech od okolních zdí a dalších překážek. Tento stav na první pohled komunikaci pomáhá, protože systému tak nemusí vadit, že přijde o komunikaci pomocí LOS. Umožňuje tak lepší mobilitu a zároveň zvyšuje úroveň přijímaného výkonu. Avšak "nízké" rychlosti

světla představují jisté omezení. Světlo totiž musí v tomto případě urazit k fotodetektoru různé vzdálenosti a čas, který k tomu potřebuje, není zanedbatelný [16], [19], [20].

Pokud vycházíme z toho, že se světlo v okolním prostoru (vakuu) šíří rychlostí $2,998 \cdot 10^8$ m/s, dojdeme k výsledku, že světlo k překonání vzdálenosti 1 metru potřebuje minimálně 3,33 ns (tato hodnota pak bude pro různé materiály, například ve vodě, ještě větší). Z pohledu komunikace je tato hodnota omezující, protože ve výsledku tak bude docházet k rozšiřování přijímaných impulsů a snižování odstupů signálu od šumu. Tento jev se nazývá disperze. Úspěšnost detekce bude v takových případech záviset hlavně na fotodetektoru a vyhodnocovací elektronice.



Obr. 4.4: Popis vzniku paprskové disperze vlivem vícecestného šíření signálu [19].

Obrázek 4.4 ukazuje příklad, kdy se světlo dostává od zdroje k fotodetektoru několika cestami najednou. To vede k tomu, že data přicházejí z více směrů najednou (což nevádí), ale přicházejí také v různou dobu. Rozdíl v těchto časech se odvíjí od rozdílů vzdáleností (Δs), které musí světlo urazit.

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{c}. \quad (4.1)$$

Pokud tedy například uvažujeme $\Delta s = 4$ metry, tak odražený signál dorazí k detektoru o víc než 13 ns později. Pokud by součet výkonů odražených signálů dosahoval dostatečné úrovně, tak by mohl spolehlivě rušit komunikaci již na frekvencích kolem 10 MHz a při 38 MHz by se přijímané pulzy začaly navzájem překrývat a vzrostla by tak mezisymbolová interference. Pokud tedy budeme chtít pracovat s frekvencemi kolem 20 - 30 MHz, tak se v tomto případě již dostáváme na limit použitelnosti a vliv tohoto vícecestného šíření již nelze snadno zanedbat. Vliv popisovaného vícecestného šíření bude mnohem citelnější ve velkoprostorových instalacích, kdy budou vzdálenosti od překážek a počty vysílačů větší.

Podobně i při použití svítidel veřejného osvětlení ve venkovních prostorách bude mít za následek nemalé rušení, především pak díky vzájemnému překrývání osvětlované plochy jednotlivými svítidly.

Průměrnou dobu mezi odrazy lze definovat na základě rozměrů uvažované místnosti [21]:

$$\bar{t} = \frac{4 \cdot V_{room}}{c \cdot A_{room}} = \frac{2 \cdot d \cdot s \cdot v}{c \cdot (d \cdot s + d \cdot v + s \cdot v)}, \quad (4.2)$$

kde c je rychlost světla a rozměry místnosti jsou d (délka), s (šířka) a v (výška).

Omezení vícecestným šířením lze částečně eliminovat, například pomocí dynamického optického kódového mnohonásobného přístupu (OCDMA) [22]. Princip v tomto případě spočívá v tom, že se po každém odeslaném bitovém slovu změní kódovací sekvence a případný odražený signál je tak ignorován. Nicméně zde se jedná o případ, kdy odražený pulz přichází až poté, co byl přímý pulz vysílače již zpracován, a došlo ke změně kódovací sekvence.

Dalším problémem je také zkreslení hodnot při použití amplitudových a šířkových modulací, protože fotodetektor pouze počítá dopadající světelné záření z okolí. Odstranění vzniklých fluktuací tak bude pouze v režii přijímací elektroniky.

4.3 Měření a simulace v pokrývaném prostoru

Pro osvětlení místností a jiných prostor máme k dispozici několik možností, jak tento prostor pokrýt. V praxi se pak setkáme se dvěma základními typy svítidel:

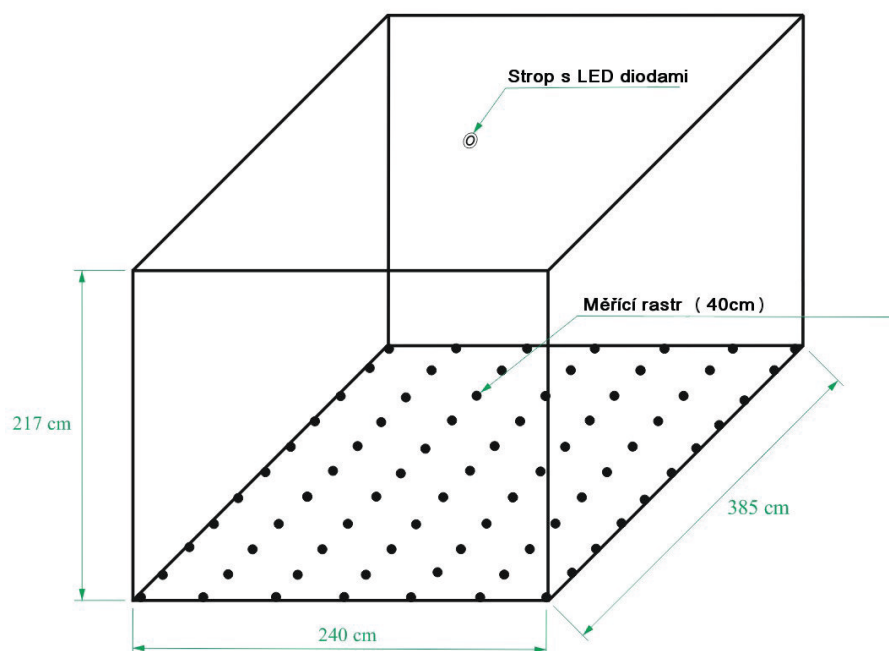
- "Žárovková" – světlo vychází z jednoho bodu (nahrazeno výkonovou LED).
- "Zářivková" – světlo vychází z přímky (nahrazeno LED trubicí, nebo LED páskem).

Z komunikačního hlediska je velmi obtížné mezi těmito zdroji vybírat, protože oba typy mají své výhody a nevýhody. Většinou ale závisí na aktuální situaci. Investice do systému při výměně svítidel v celém domě, nebo rovnou budově, neúměrně zvýší náklady. Podstatou VLC systémů tak v začátcích bude zachování možnosti použít původní svítidla a měnit pouze světelné zdroje za LED. Otázkou však je, jak se jednotlivé typy svítidel vlastně chovají. Lze předpokládat, že i když bodové zdroje světla budou mít lepší parametry v oblasti přenosové rychlosti, tak plošné zdroje budou poskytovat rovnoměrnější pokrytí signálem.

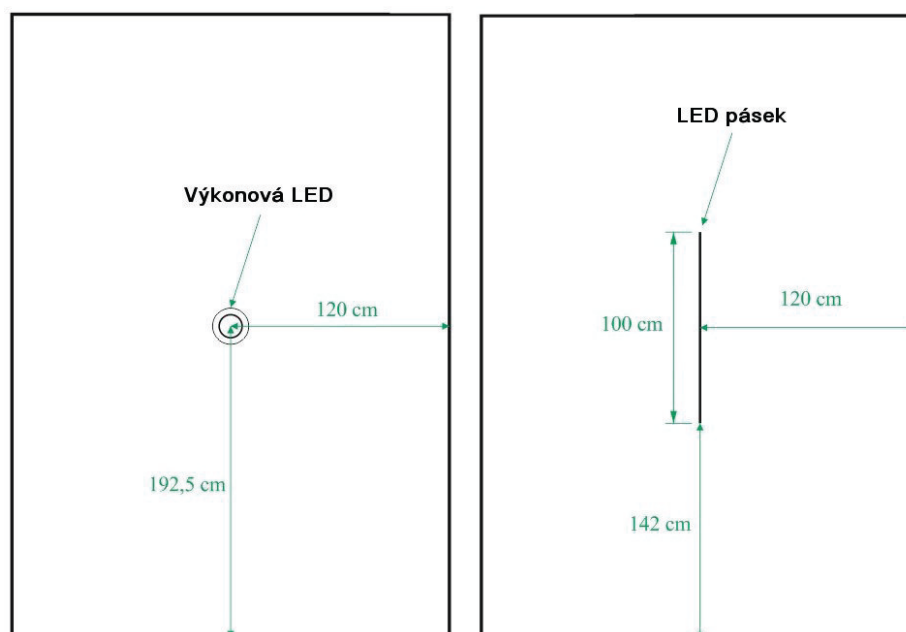
4.3.1 Temná místnost

Pro fyzická měření byla použita temná místnost. Ta je zkonstruována tak, aby dovnitř místnosti pronikalo pouze minimum světla z okolí. Photon counterem naměřené hodnoty světelného záření pronikajícího z okolí místnosti byly v tomto případě na úrovni 7 CPS, tedy 7 fotonů za období 1 vteřiny [54]. Měření zdrojů optického záření tak není ovlivněno okolním světlem. Stěny místnosti jsou natřeny černou matnou barvou, aby pokud možno

pohltily většinu dopadajícího optického záření a nedocházelo tak k odrazům způsobujícím zkreslování výsledků [30]. Jednotlivé typy svítidel byly nejprve změřeny v temné místnosti a poté byly hodnoty použity k vytvoření odpovídajících simulací dalších konfigurací.



Obr. 4.5: Měření v temné místnosti.



Obr. 4.6: Konfigurace osvětlení pro měření v temné místnosti.

Měření bylo prováděno pro dvě základní konfigurace. První byl bodový zdroj světla (výkonová LED) a druhým zdrojem byl LED pásek o délce 1 metr (Obr. 4.6). Jako výko-

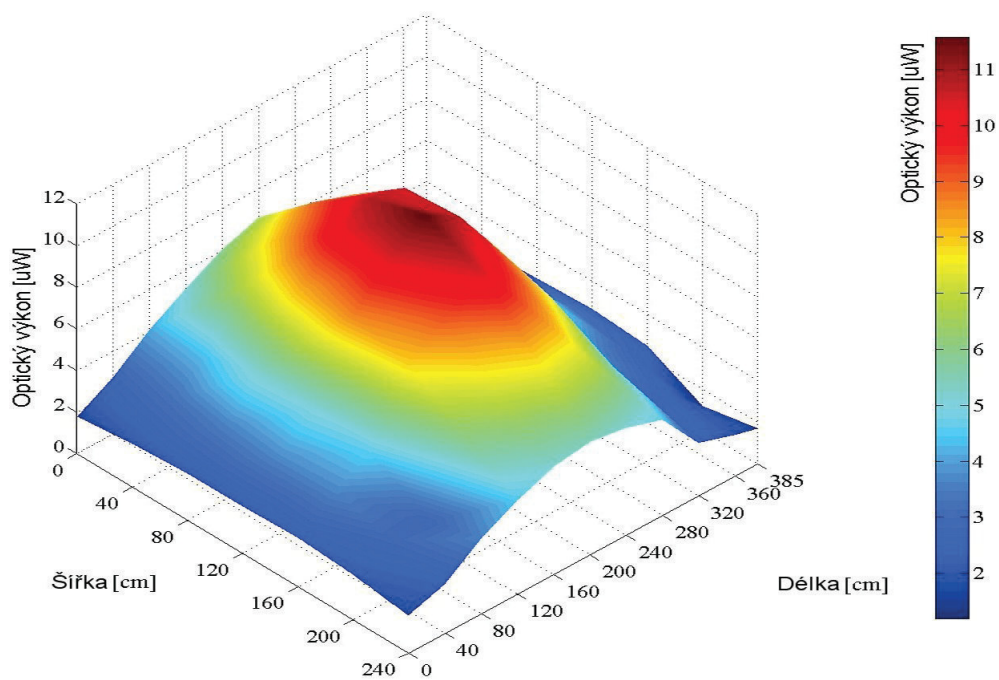
nová byla použita COB LED typu SPL-NPW5-273 s výkonem 5W a uváděným světelným tokem 500 lm a LED pásek RGB s 30 LED diodami typu G-M5050RGB-0 o udávaném výkonu 7,2W/m. V případě LED pásku je však nutno podotknout, že odebíraný proud při 12V tomuto výkonu neodpovídal a udávaný světelný tok udávaný výrobcem byl pouhých 150 lm. Tento nepoměr je jedním z důvodů, proč bylo později, v rámci navrženého svítidla prováděno porovnání výsledných intenzit osvětlení pro RGBY a bílou LED diodou.

Měření pak probíhalo postupně v jednotlivých bodech mřížky se vzdálenostmi 40cm pomocí měřiče optického výkonu Thorlabs PM100. Výsledky měření pro jednotlivé konfigurace jsou na následujících grafech (Obr. 4.7 a 4.8).

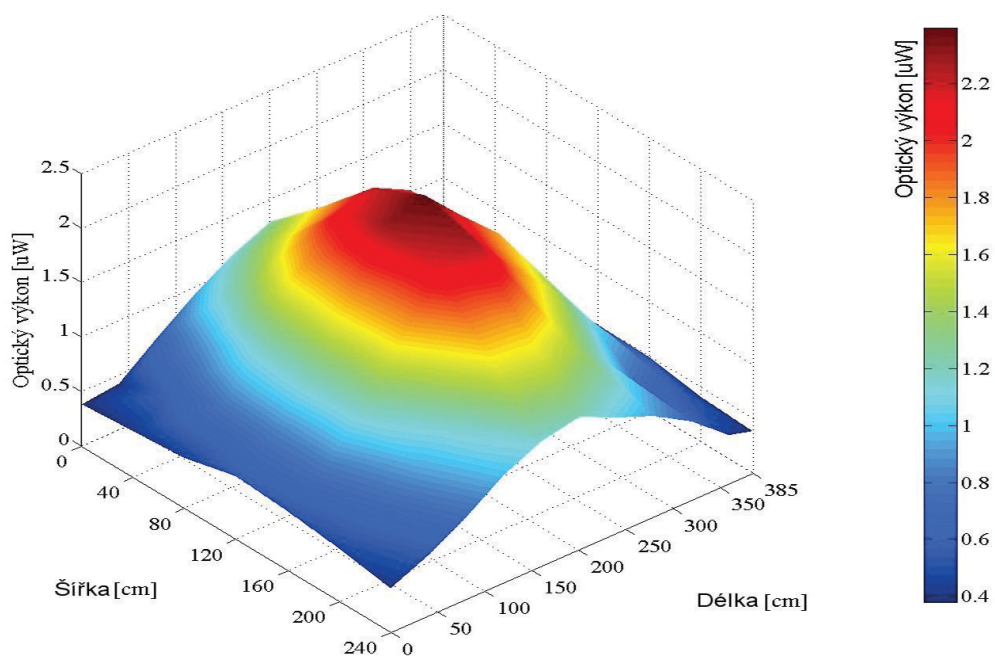
Navzdory nižšímu optickému výkonu (což je následkem použití starších čipů SMD5050) je pokrytí prostoru pomocí LED pásku mírně rovnoměrnější, než v případě jedné výkonové LED ve středu měřeného prostoru.

Stejně rozměry místnosti a konfigurace svítidel (dle Obr. 4.5 a 4.6) byly také nasimulovány v simulačním prostředí LightTools. Vzhledem k široké databázi LED zdrojů záření v prostředí LightTools bylo rovněž možno nasimulovat i odpovídající svítidla. Pro potřeby simulací tak byl vytvořen SW model místnosti i svítidel. Výsledky těchto simulací můžeme vidět na obrázcích 4.9 a 4.10.

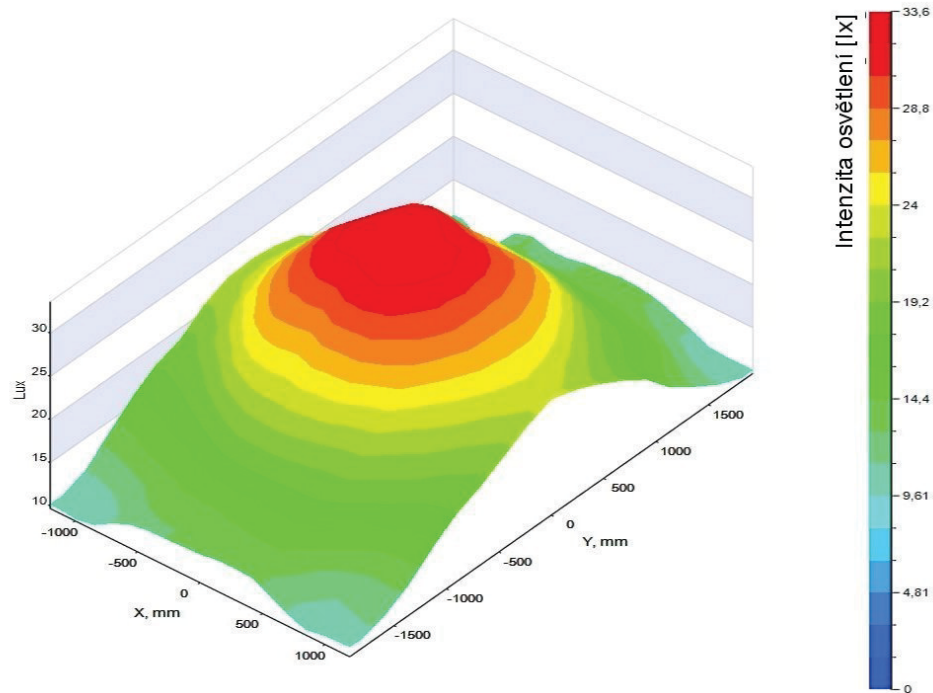
Pro potřeby simulací bylo rovněž nutno použít (definovat) odpovídající fotodetektor. Z tohoto důvodu byl v simulačním prostředí simulován fotodetektor o stejné ploše a parametrech jako byl Thotlabs S120UV, použitý při měření s přístrojem PM100. Tento detektor je schopen detekovat vlnové délky v rozsahu 200–1100nm, takže pro potřeby měření ve viditelném spektru byl více než dostačující.



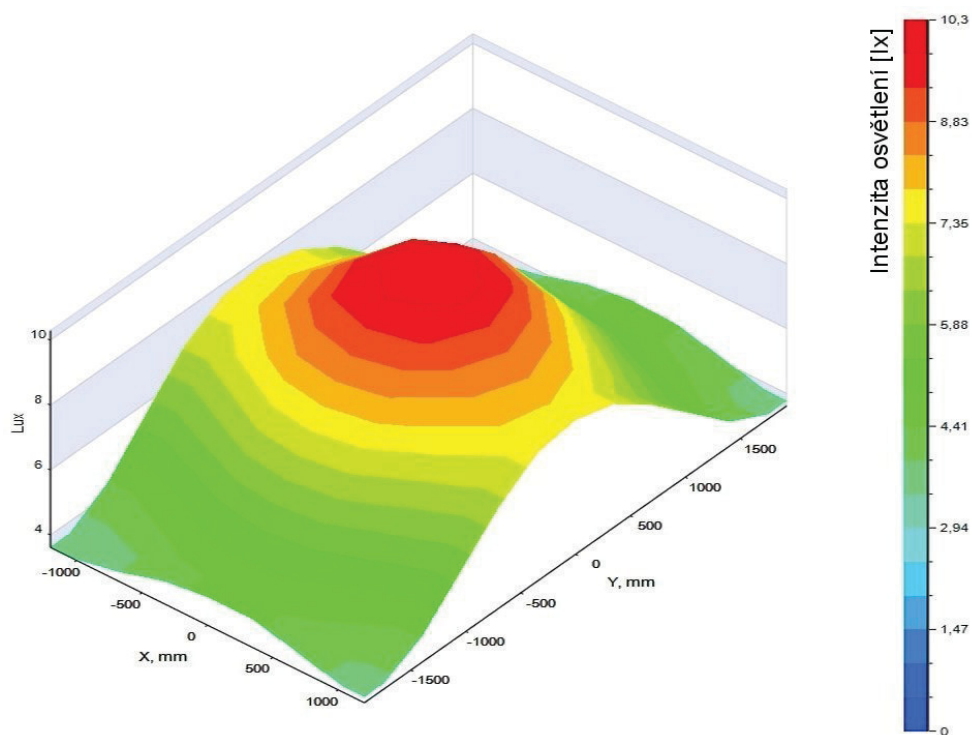
Obr. 4.7: Výsledky měření pro výkonovou LED (SPL-NPW5-273).



Obr. 4.8: Výsledky měření pro LED pásek (30ks G-M5050RGB-0).



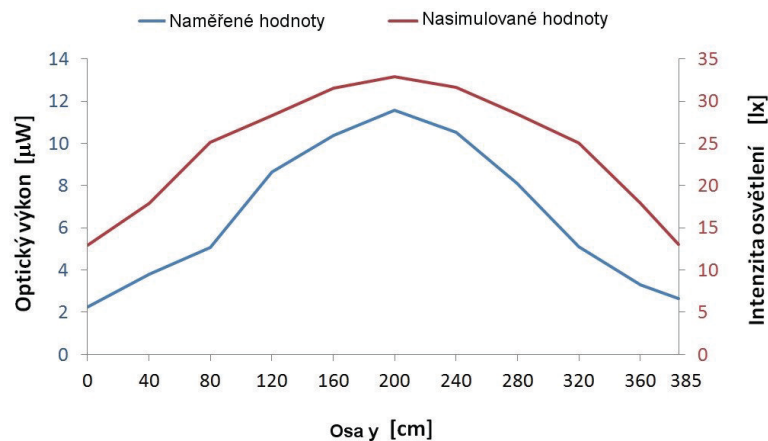
Obr. 4.9: Výsledky simulací pro výkonovou LED (SPL-NPW5-273).



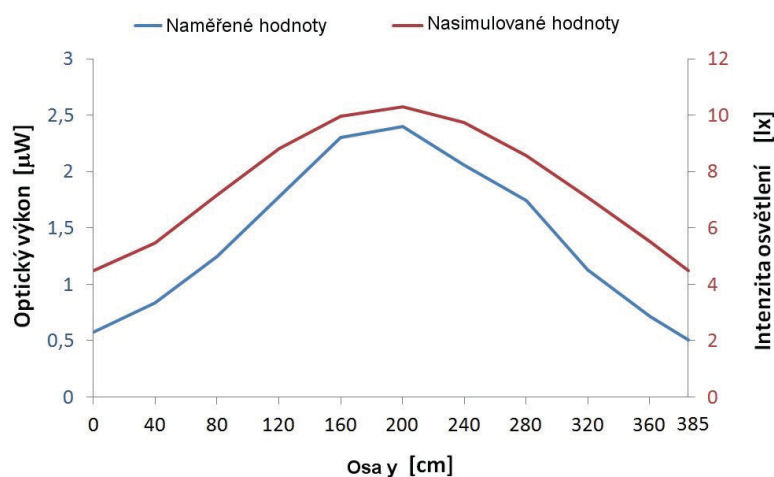
Obr. 4.10: Výsledky simulací pro osvětlení LED páskem (30ks G-M5050RGB-0).

4.3.2 Porovnání výsledků ze simulací a vztahy mezi jednotkami

Pro porovnání podobnosti simulací a reálného měření jsou na následujících grafech (obr. 4.11 a 4.12) vyneseny průběhy naměřených hodnot v ose měření.



Obr. 4.11: Porovnání měřených a simulovaných hodnot pro výkonovou LED (SPL-NPW5-273).



Obr. 4.12: Porovnání měřených a simulovaných hodnot pro LED pásek (30ks G-M5050RGB-0).

Pro porovnání výsledných hodnot z reálných měření a simulací se musíme na grafech z obrázků 4.11 a 4.12 zaměřit na podobnost jednotlivých průběhů. Ty se v obou případech podobají dostatečně na to, aby se dala přesnost simulací vyhodnotit jako dostačující pro další prováděné simulace. Pokud průběhy překryjeme, tak ani v oblasti největšího rozdílu, není chyba větší než 20 %. Druhou částí porovnání jsou v tomto případě různé jednotky naměřených hodnot pro simulace a měření.

Jednotkou intenzity osvětlení je lux (lx), značí se jako E a lze popsat jako [45]:

$$E = \frac{\Phi}{S}, \quad (4.3)$$

kde Φ je světelný tok v lumenech [lm] a S je plocha udávaná v [m²]. Tato hodnota se tak vztahuje k referenční ploše, zatímco naměřené hodnoty optického výkonu odpovídají výkonu, který při měření dopadal přímo na fotodetektor. Optický výkon tak představuje hodnotu, která je na obvodech fotodetektoru používána ke zpracování příchozích dat. Přijímaný optický výkon závisí hlavně na ploše fotodetektoru, větší čip znamená větší plochu a tedy i více fotonů pro rekombinace. Jak je z naměřených hodnot vidět, tak hodnoty optického výkonu jsou velmi malé, protože i plocha fotodetektoru je velmi malá (většinou méně než 1mm²).

Přepočet mezi intenzitou osvětlení a výkonem na fotodetektoru vychází z toho, že jednotlivé veličiny v podstatě vyjadřují totéž, tedy optický výkon. Intenzita osvětlení však, jakožto fotometrická veličina, vychází z citlivosti lidského oka, zatímco optický výkon představuje hodnotu vázanou k přesné vlnové délce (protože citlivost fotodetektoru se s vlnovou délkou mění). Hodnota pro bílé světlo by tak v podobě intenzity osvětlení měla zůstat stejná, zatímco hodnota optického výkonu, který bude zpracováván fotodetektorem se bude pro jednotlivé vlnové délky lišit. Pro přepočet tak můžeme pomocí vzorce (4.4) vypočítat světelný tok dopadající na plochu fotodetektoru a poté stačí dosadit odpovídající účinnost fotodetektoru pro žádanou vlnovou délku. Vzorec pro výpočet pak bude vypadat následovně:

$$P = \frac{E_V \cdot A}{\eta}, \quad (4.4)$$

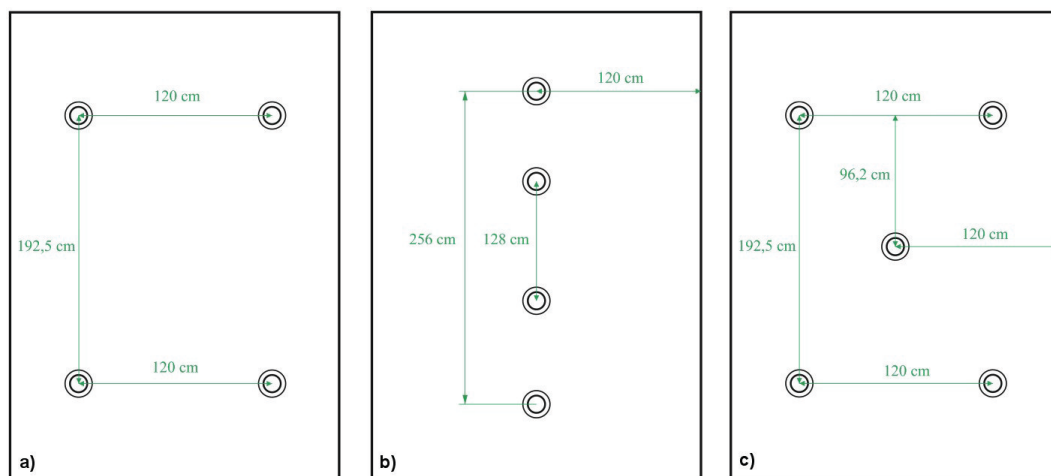
kde E_V je intenzita osvětlení v Luxech, A je plocha fotodetektoru v m² a η je účinnost přeměny energie na straně fotodetektoru v lumenech/Watt. Při intenzitě osvětlení 30 lux, ploše fotodetektou 0,00004 m² a účinnosti 100 lm/W bude vyzařovaný výkon 12 μW. Dle těchto výpočtů si tak osy na grafu 4.11 odpovídají. Naměřená hodnota je pak, v porovnání se simulacemi, o něco nižší. To lze přičítat tomu, že LED dioda nesvítila na 100% (například díky výkonovým ztrátám na přívodním kabelu atd.). Ohledně účinnosti používané k přepočtu je třeba brát v úvahu, že se nejedná o účinnost udávanou u použité LED diody. V tomto případě jsou si sice hodnoty podobné, v rámci přepočtu mají ale zcela opačnou závislost.

Vzhledem k širokému spektru a podstatě vysílaného signálu (bílé světlo) se jeví jako nejvhodnější použití jednotek intenzity osvětlení (lux). Fotodetektor bude totiž reagovat na každou vlnovou délku jinak, takže pro analýzu hodnot na přijímací straně bude mnohem výhodnější měřit napětí po samotné fotodetekci, tedy hodnoty, které budou reálně použity při zpracování signálu.

4.3.3 Výsledky simulací pro složitější konfigurace

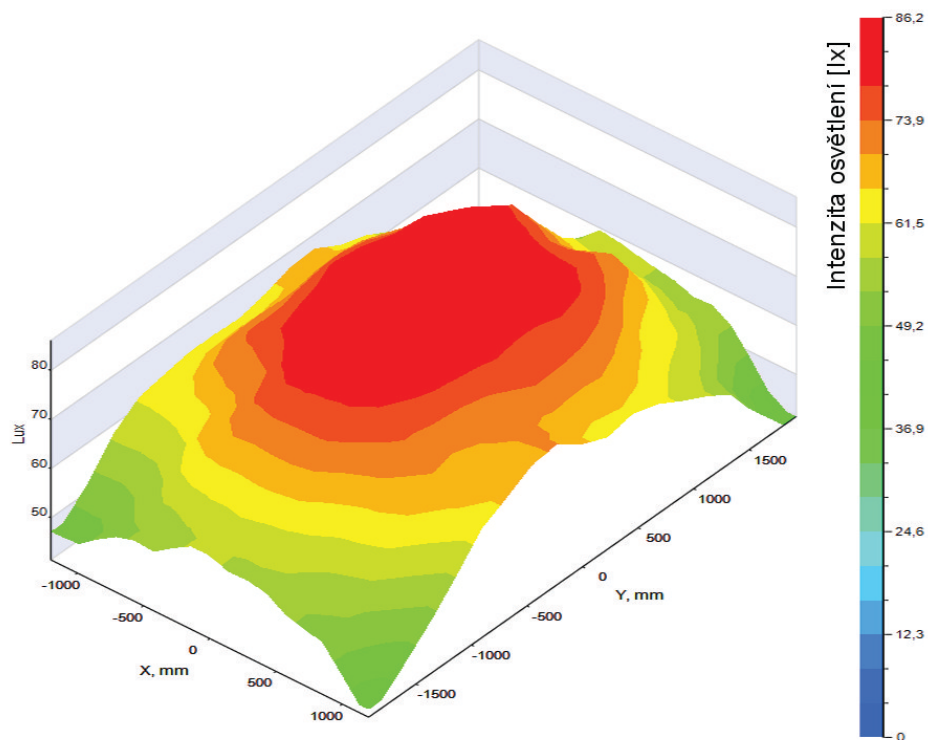
Podstata simulací spočívá ve zkrácení doby, která by jinak byla potřeba k fyzickému změření a hlavně pak v minimalizaci tvorby velkého množství prototypů. Pro simulace

tedy bylo použito několik konfigurací zdrojů záření s cílem pokrýt ty nejpoužívanější a nejpravděpodobnější. Použitá rozvržení jsou na obr. 4.13 a 4.17.

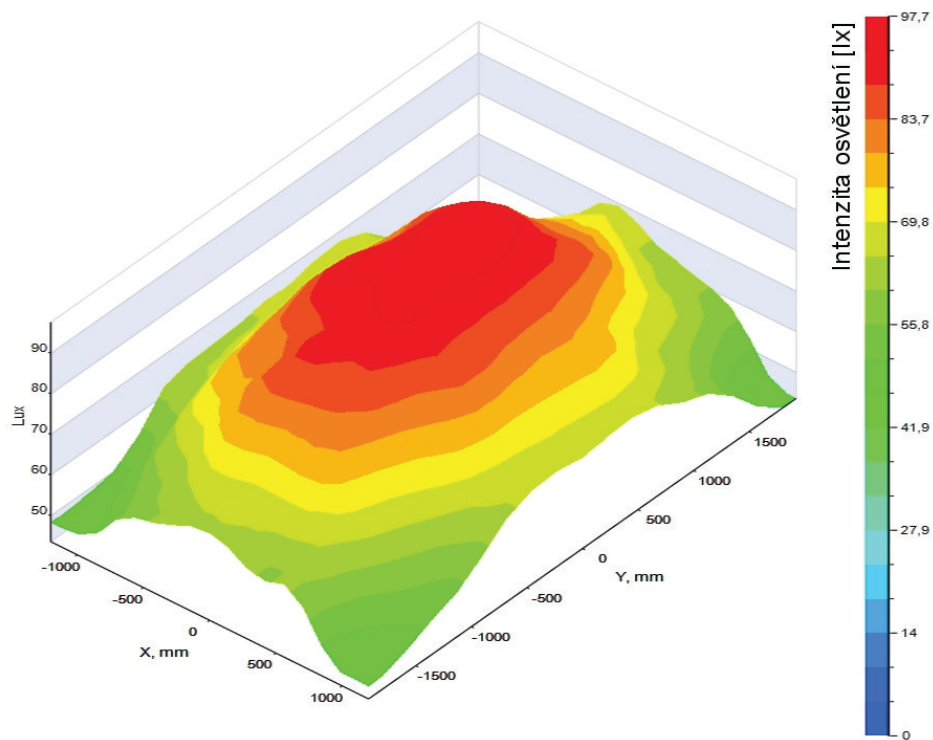


Obr. 4.13: Konfigurace s použitím výkonových LED diod.

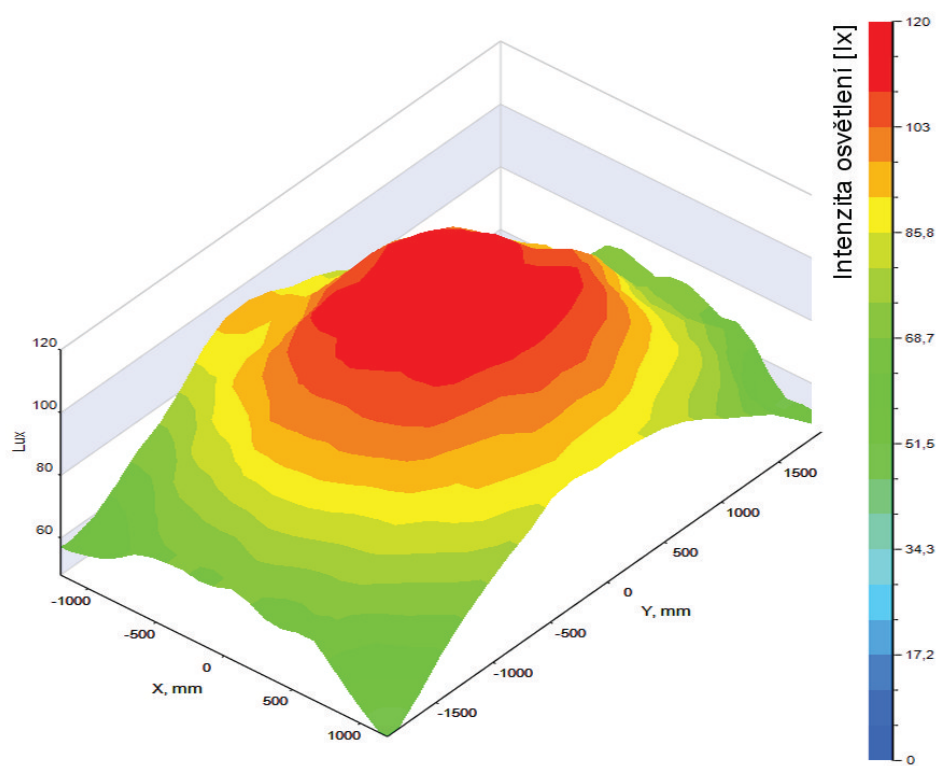
Pro vyhodnocení pokrytí prostoru je důležitý údaj o výkonu, který potřebujeme na fotodetektoru pro bezchybnou a spolehlivou detekci. A protože optický výkon lze nahradit odpovídající hodnotou intenzity osvětlení a intenzita osvětlení je v osvětlování mnohem používanější, tak stačí odpovídající údaj i v těchto jednotkách.



Obr. 4.14: Výsledky pro konfiguraci 4.13a.

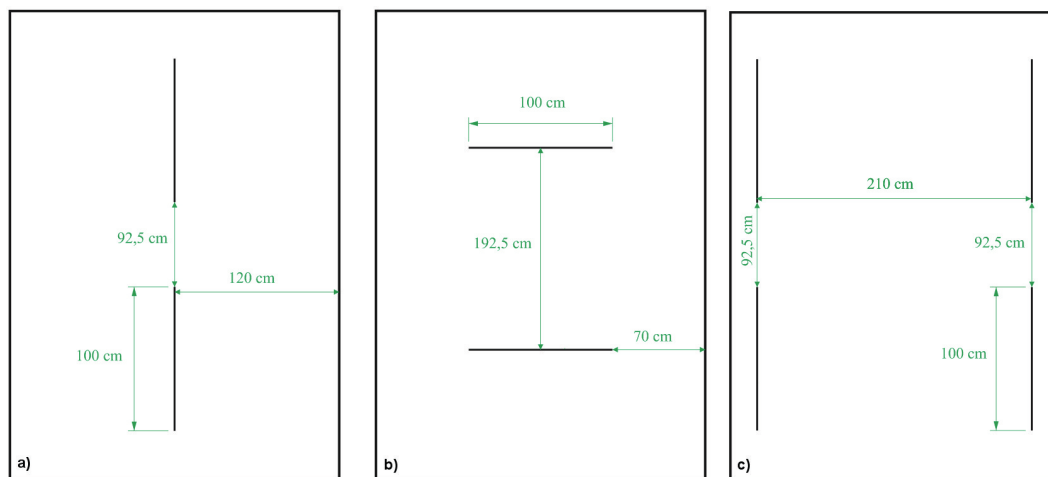


Obr. 4.15: Výsledky pro konfiguraci 4.13b.

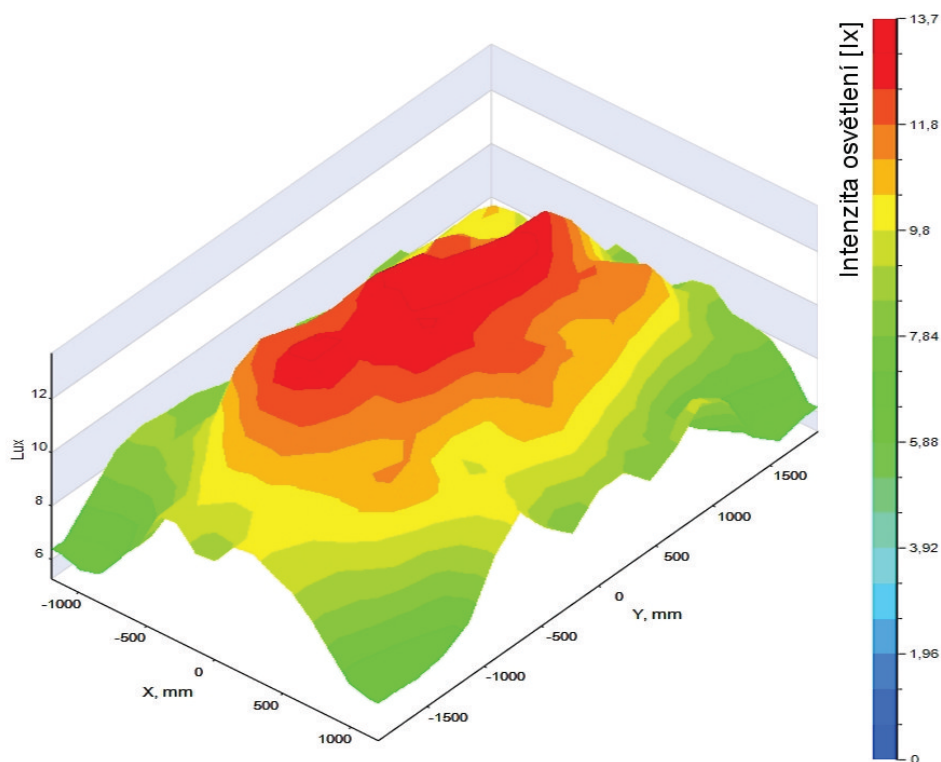


Obr. 4.16: Výsledky pro konfiguraci 4.13c.

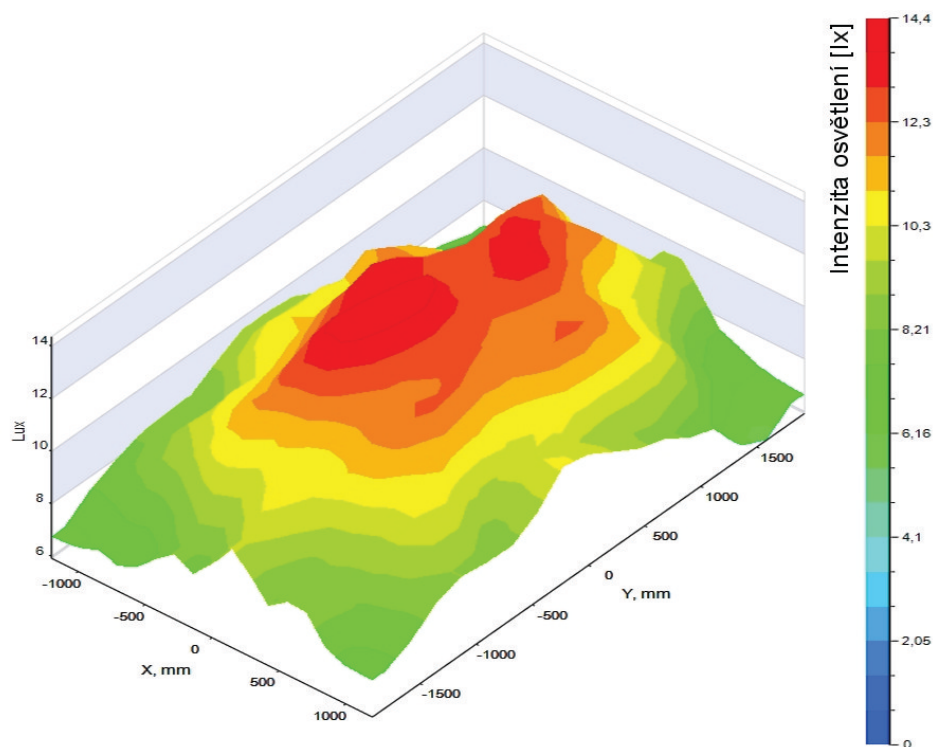
Obrázek 4.14 představuje rozsáhlejší systém místnosti a v porovnání s ostatními (4.15 a 4.16) je pokrytí nejrovnoměrnější. Obrázek 4.15 představuje způsob pokrytí pro podlouhlejší místnosti (např. chodby) a výkon je zde soustředěn více po délce. Na obrázku 4.16 je případ pokrytí prostoru v případě, že je stávající osvětlení z konfigurace 61a doplněno o vysílač uprostřed místnosti. Výsledkem je ale výraznější nerovnoměrnost osvětlení, protože uprostřed místnosti je výrazně více světla než v rozích.



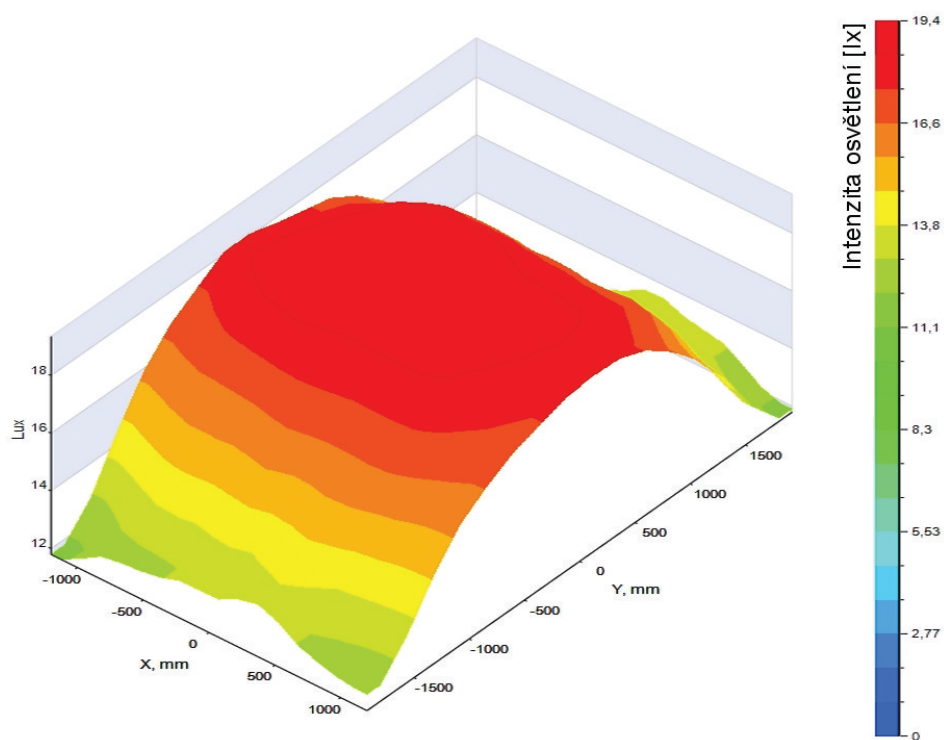
Obr. 4.17: Konfigurace s použitím LED pásků.



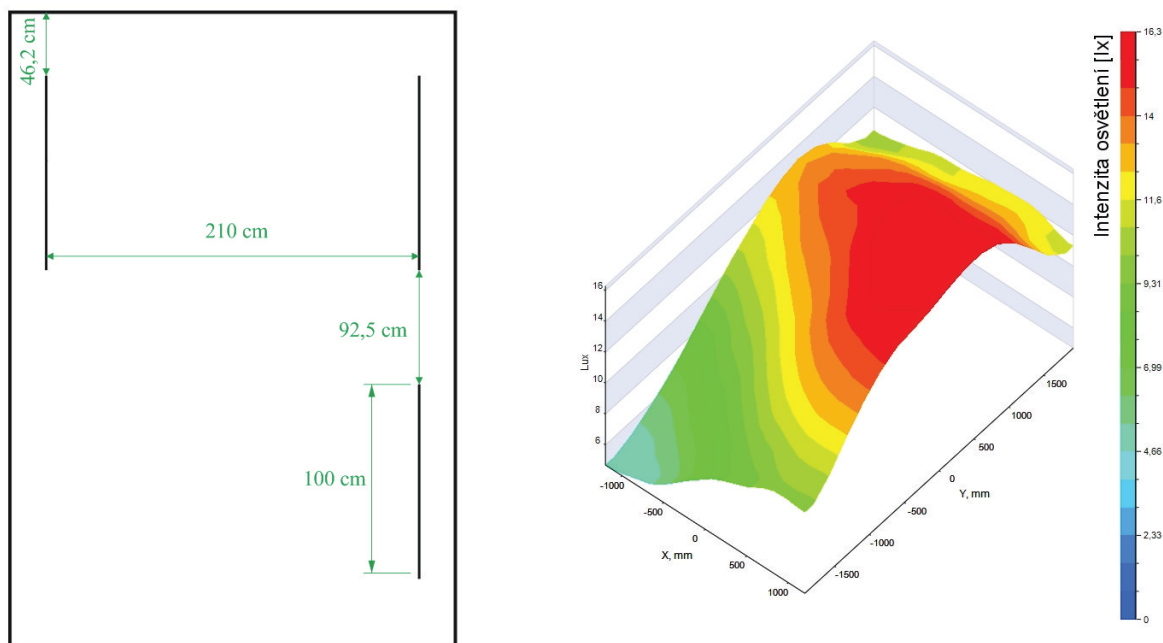
Obr. 4.18: Výsledky pro konfiguraci 4.17a.



Obr. 4.19: Výsledky pro konfiguraci 4.17b.



Obr. 4.20: Výsledky pro konfiguraci 4.17c.



Obr. 4.21: Výsledky simulací pro výpadek jednoho vysílače/svítidla.

Navzdory atypickému umístění svítidel dle konfigurace z obrázku 4.17c je pokrytí až nezvykle rovnoměrné a s dostatečným výkonem na velké ploše. Na následujícím obrázku (obr. 4.21) je případ, kdy jedno ze svítidel přestane fungovat. Při takovém výpadku došlo k poklesu intenzity osvětlení v takovém rozsahu, že se v rohu místnosti snížila intenzita osvětlení z 11 lx asi na polovinu (5 lx). Oproti maximální hodnotě v místnosti (16 lx) je pak hodnota rovnou třetinová. Je tak patrné, že i v rámci jedné místnosti s relativně rovnoměrným osvětlením, bude potřeba velký dynamický rozsah na straně fotodetektoru. Pokud bude v tomto případě práh citlivosti fotodetektoru například 10 lx, tak v případě poruchy jednoho ze svítidel nevyhnutelně dojde k výpadku komunikace v dané okrajové části místnosti.

Závěrem této kapitoly je třeba ještě zmínit průběhy na obrázcích 4.18 a 4.19. Již na první pohled totiž budí mírně chaotický dojem. To je způsobeno větším počtem zdrojů záření a méně optimalizovaným počtem simulovaných paprsků. Pokud ponecháme počet paprsků, který byl v případě 1–5 LED světelných zdrojů dostačující, tak v případě zvýšení počtu LED diod na 30 už může při simulacích docházet ke zmiňovaným projevům ve výsledných hodnotách. V případě podobných projevů je tak vhodné počet paprsků zvýšit (jak je vidět na obrázcích 4.20 a 4.21).

5 VYTVOŘENÍ BÍLÉ BARVY POMOCÍ RGBY

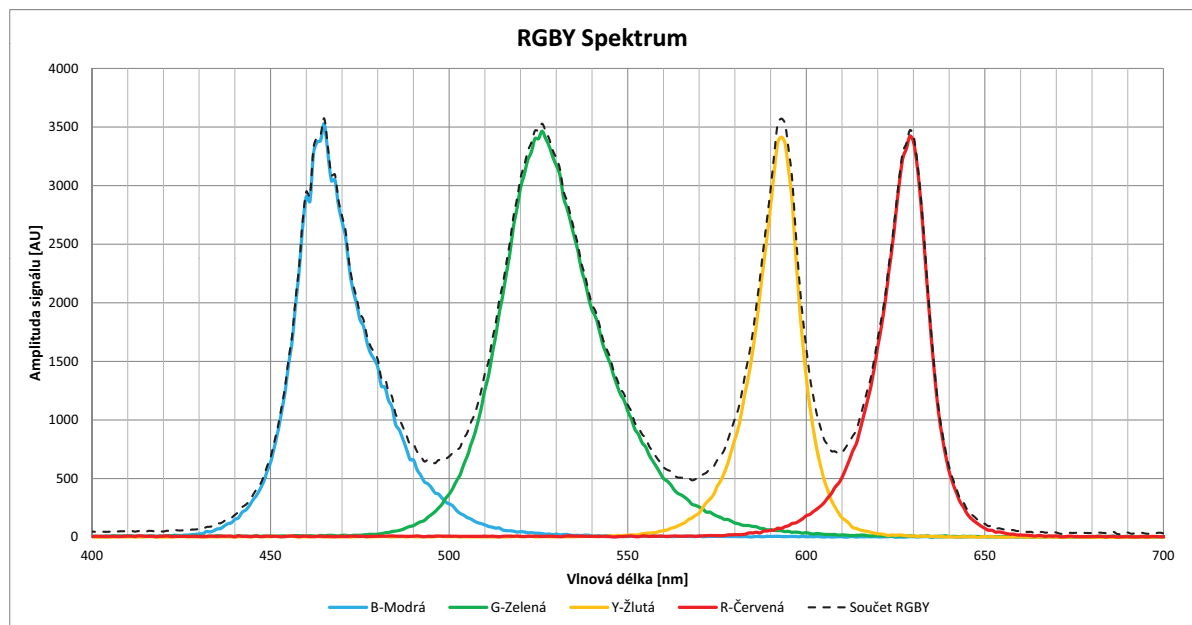
Pro konstrukci svítidla/vysílače je třeba brát v potaz potřebu vytvoření bílé barvy na výstupu. Bílá barva navíc musí být schopna pokrývat prostor rovnoměrně, což v některých případech nemusí být jednoduché. Pro splnění požadavků tak bude v tomto případě záležet nejen na nalezení vhodných poměrů jednotlivých barev, ale i na mechanické konstrukci.

Prvním předpokladem pro úspěch při vytváření bílé je nalezení vhodných poměrů jednotlivých barev tak, aby výsledná barva odpovídala záření černého tělesa o určité teplotě, kdy hodnoty kolem 2700 K jsou považovány za teple bílou a spektrum je laděno více do červené části spektra. Teplota kolem 6000 K je, navzdory vyšší teplotě, označována za studenou bílou, protože obsahuje velký podíl modré.

Postup při vytvoření bílé barvy pomocí skládání jednotlivých barev je na obrázku 5.1. K dispozici máme LED diody se čtyřmi různými vlnovými délkami (WL-BRYG2A140-001), které odpovídají jednotlivým barvám:

- červená: 627 nm,
- zelená: 525 nm,
- modrá: 465 nm,
- žlutá: 593 nm.

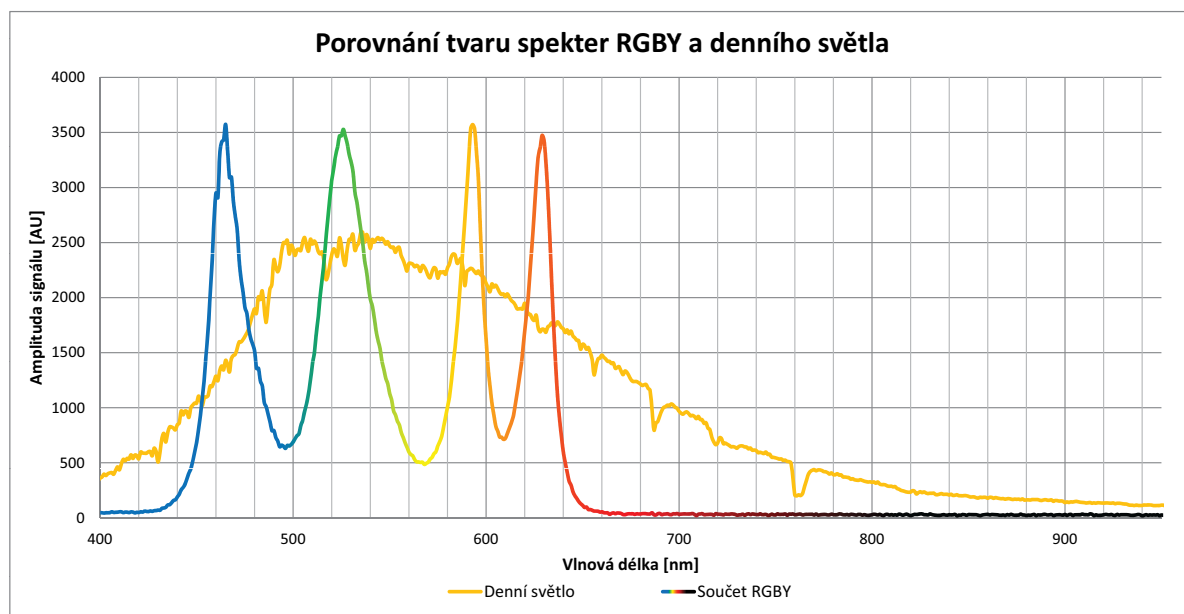
Díky širokému FWHM u jednotlivých LED, které tak pokrývají prostor napříč viditelným spektrem, můžeme vhodným nastavením proudů jednotlivých LED nastavovat požadovanou výstupní barvu.



Obr. 5.1: Samostatná spektra RGBY LED vysílače (LED dioda WL-BRYG2A140-001)

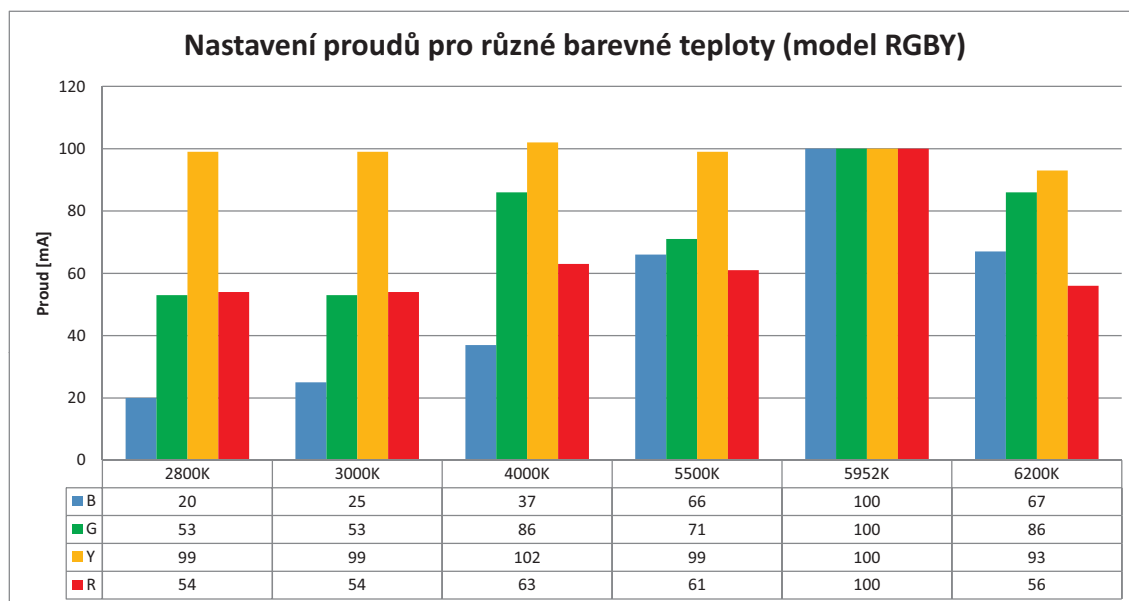
Z grafu na Obr. 5.1 je vidět, že v případě zelené LED diody je šířka spektra nezvykle široká, protože při polovině výkonu zabírá ve spektru téměř dvakrát více než ostatní barvy. Další vlastností, které si můžeme všimnout, je překrývání jednotlivých spekter na jejich okrajích. V tomto případě není překrývání na kritické úrovni, protože vzniklé kanály jsou na první pohled dobře oddělitelné. Při špatné volbě LED ale mohou tyto překryvy způsobit problémy na přijímací straně, protože šířky FWHM u některých testovaných vzorků zasahovaly do spekter okolních kanálů mnohem výrazněji. Nejvíce byl tento vliv patrný v případě některých zelených LED, protože zde docházelo k výrazným překryvům na hranicích modré a zelené části spektra. Docházelo tak k interferenci jednotlivých kanálů způsobem, při kterém na přijímací straně nemusí být jednoduché kanály vzájemně odfiltrovat a rozdělit na odpovídající fotodetektory.

V oblasti překrývání spekter se budou jednotlivé optické výkony sčítat. Výsledný tvar spektra pro případ RGBY vysílače z obrázku 5.1 a jeho porovnání se spektrem denního světla je na obrázku 5.2.

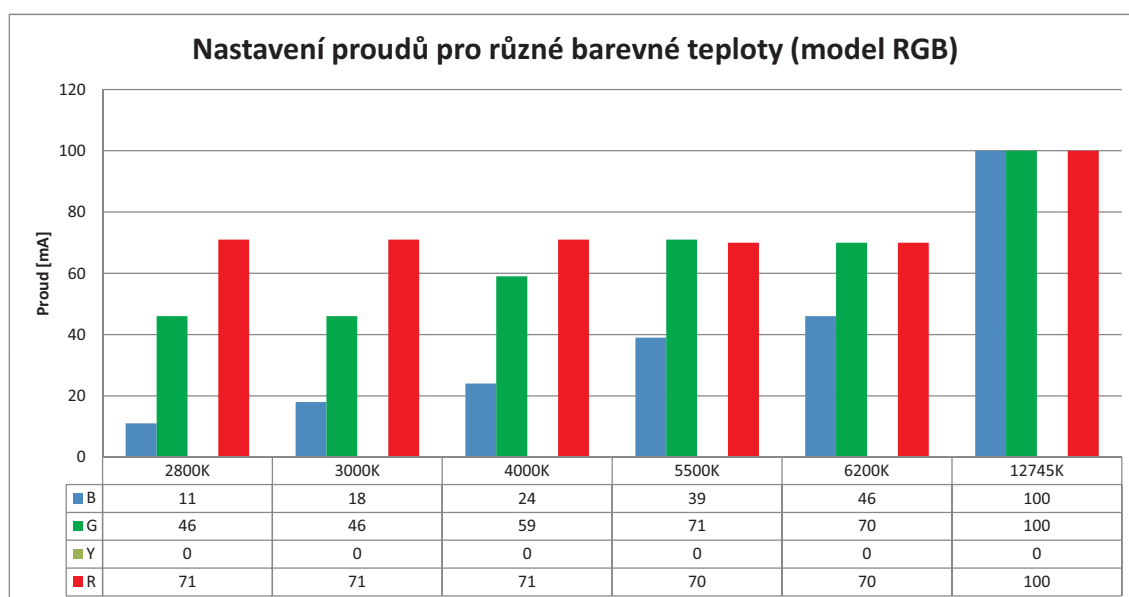


Obr. 5.2: Porovnání součtu RGBY spektra (WL-BRYG2A140-001) s denním světlem.

Pro vytvoření bílého světla je zapotřebí vhodně zvolit pracovní proudy jednotlivých LED diod, takže každý typ použité LED bude pravděpodobně potřeba nastavovat samostatně. V následujících grafech (obrázky 5.3 a 5.4) jsou příklady nastavení pro různé barevné teploty. Pro porovnání jsou zde uvedeny hodnoty pro navrhovaný RGBY model, i pro dřívější RGB model. Ze zmiňovaných grafů je patrné, že dle původních předpokladů jsou hodnoty modré barvy u dřívějšího modelu RGB znatelně nižší. Zbytek spektra je pak na druhé straně dorovnáván pomocí červené.



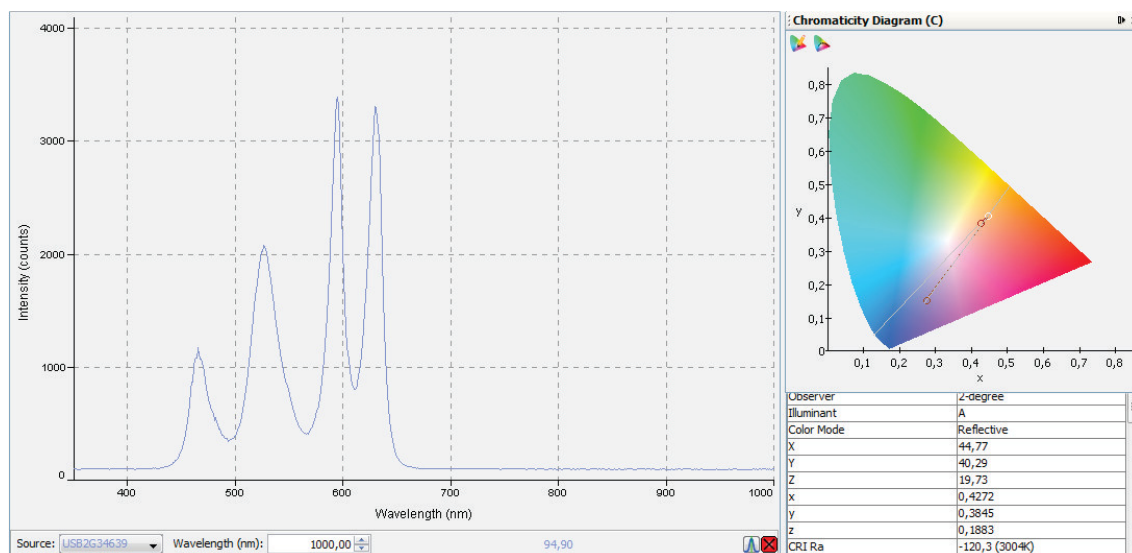
Obr. 5.3: Úrovně RGBY pro různé barevné teploty (WL-BRYG2A140-001).



Obr. 5.4: Úrovně RGB pro různé barevné teploty (WL-BRYG2A140-001).

Zajímavá část výsledků je v oblasti, kdy jsou hodnoty proudů pro všechny LED shodné. Tedy případ, kdy všechny barvy vysílají na 100% výkonu. Pro RGBY model se naměřená teplota barev pohybovala kolem 5900 K, přičemž během měření s různými LED se hodnoty pohybovaly mezi 5000 – 6000 K (dle účinností použitých LED). V případě RGB je ale výsledná hodnota přes 12000 K, což je jeden z hlavních důvodů vzniku této práce a také jeden z důvodů, proč není tento systém v praxi příliš využíván pro osvětlení. Složitě nastavování intenzit jednotlivých LED je ve výrobním procesu nákladné a pro potřeby komunikace nejsou takto nastavované hodnoty ani příliš žádoucí. S nastavovanými hodnotami výkonu se totiž mění i komunikační dosah.

Hodnoty z Obr. 5.3 a 5.4 představují hodnoty proudů, které během testů LED diodami protékaly. Přesněji se zde jedná o výsledky pro LED WL-BRYG2A140-001. Výsledné hodnoty jasů (optického výkonu) se ale lišily. Tyto rozdíly jsou zde právě díky různým účinnostem jednotlivých LED diod. Výsledky ze spektrometru pro vybrané barevné teploty jsou na následujících obrázcích.

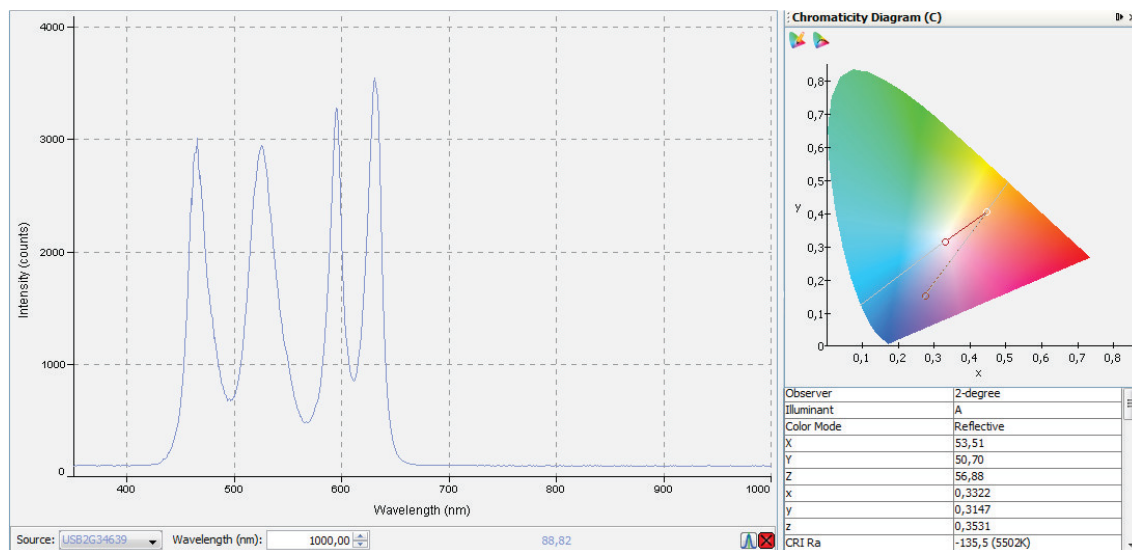


Obr. 5.5: Výsledky ze spektrometru pro RGBY při 3000 K.

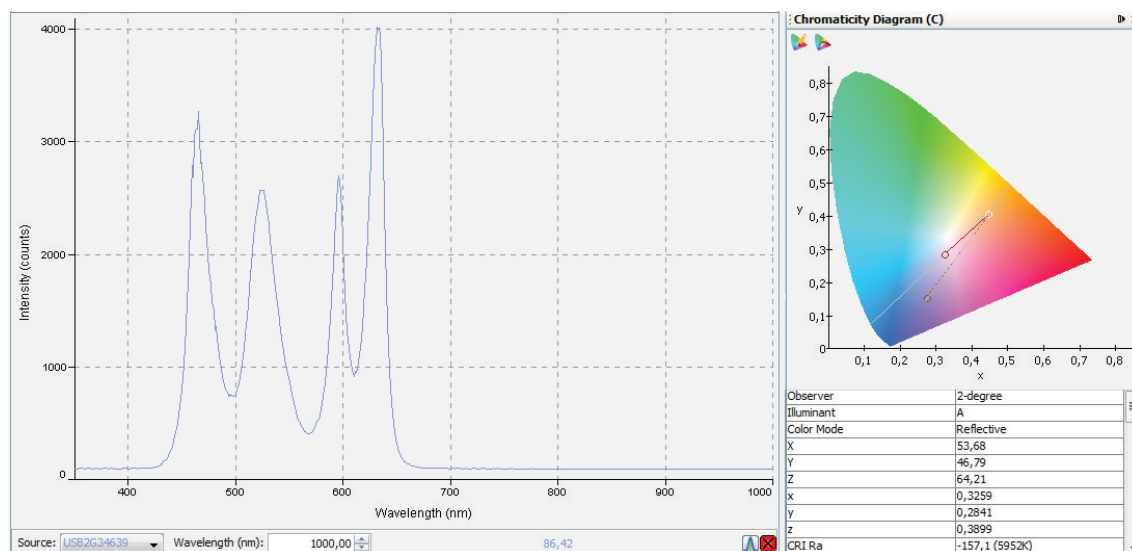
Už při 3000 K (obr. 5.5) je u červené barvy patrný nepoměr mezi proudy, které LED diodou prochází a amplitudou signálu, který zachycuje spektrometr na výstupní straně. Pro analýzu je však třeba vzít v úvahu také šířku spektra, kterou daná LED zabírá, protože například zelená LED produkuje výkon v širším spektru než ostatní a díky tomu je maximální hodnota na pohled o něco nižší.

V porovnání s úrovněmi pro 5500 K (obr. 5.6) je hodnota 5952 K (obr. 5.7) mírně posunutá směrem k modré části spektra, což je v tomto případě vlivem nižší účinnosti žluté LED. Podíl žluté je tak nižší, než v předchozích zobrazených spektrech. I to ale stačí pro udržení barevné teploty v použitelných hodnotách kolem 6000 K.

Vzhledem k pozorovaným vlastnostem lze pro nastavování teploty barvy využít i další přednost modelu RGBY. Díky poloze žluté můžeme nastavovat teplotu barvy také způso-



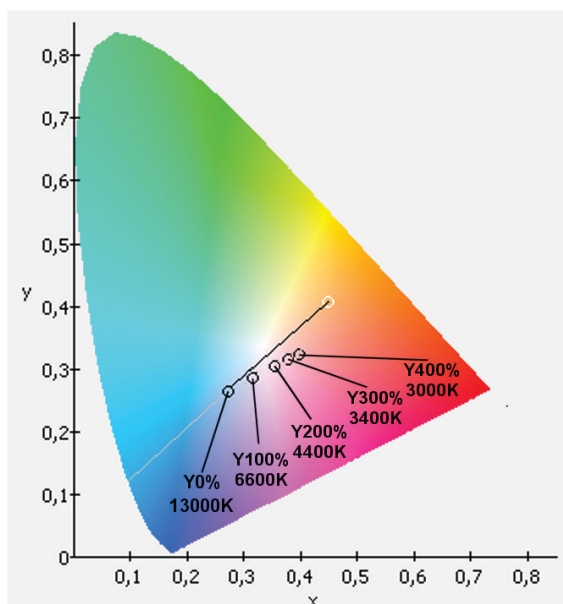
Obr. 5.6: Výsledky ze spektrometru pro RGBY při 5500 K.



Obr. 5.7: Výsledky ze spektrometru pro RGBY při 5952 K (stejně velké budící proudy).

bem, kdy RGB část svítí se stejnými proudy, což nám dá teplotu kolem 13000 K. Samotné nastavení barvy pak probíhá pouze pomocí intenzity žluté složky, která na diagramu (obr. 5.8) posouvá výsledný vektor směrem doprava. To ovšem znamená, že pro dosažení teplejších barev budeme potřebovat výkonnější LED diodu, případně více žlutých LED, které by se mohly například spínat dle požadavků uživatele.

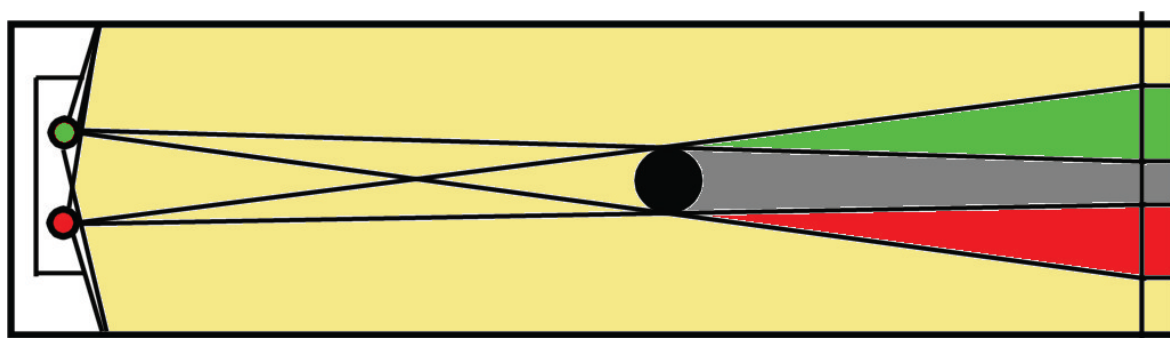
Potenciální výroba RGBY systému se tak díky této vlastnosti podstatně zjednoduší. Snad jen vlnové délky jednotlivých LED diod by bylo vhodné mírně upravit (zvolit vhodnější "čipy") pro lepší aproximaci záření černého tělesa. Při příliš vysokých výkonech žluté totiž docházelo k nepatrnému nadbytku výkonu v červené části spektra.



Obr. 5.8: Ladění teploty barvy pouze pomocí Y (žluté složky).

5.1 Funkce difuzoru

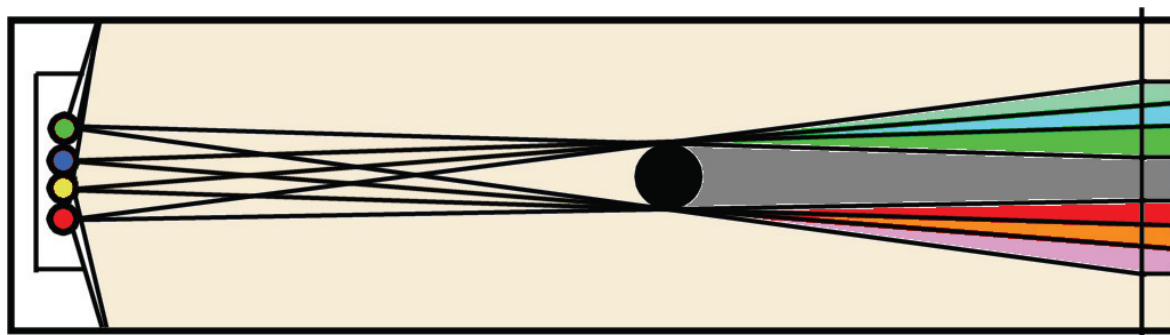
Spojení jednotlivých barev do bílé barvy je kromě nastavení jednotlivých barev spektra závislé také na konstrukci. V případě LED diod vychází světlo z jednoho bodu, a tím je dána i geometrie výsledného optického svazku. V okamžiku, kdy světlo narazí na překážku, tak nemůže pokračovat dále a nedopadne na požadované místo. Fakt, že překážka vytváří stín, není nic nového a v případě "bílého" zdroje záření zůstává stín většinou bez povšimnutí. Princip při skládání bílé z jednotlivých barev ale vytváří stíny poněkud zajímavější, protože každá barva vychází z trochu jiného místa, a tím také vrhá stín na odlišné místo. Výsledkem je, že stín už není pouze tmavé místo za překážkou. Na obrázku 5.9 je zobrazen princip vzniku těchto barevných stínů.



Obr. 5.9: Princip vzniku barevných stínů při míchání barev.

Na obrázku 5.10 je pak vidět, že při použití více barev dochází za překážkou k rozdělení i na další barvy, které vzniknou postupným překrýváním jednotlivých barevných

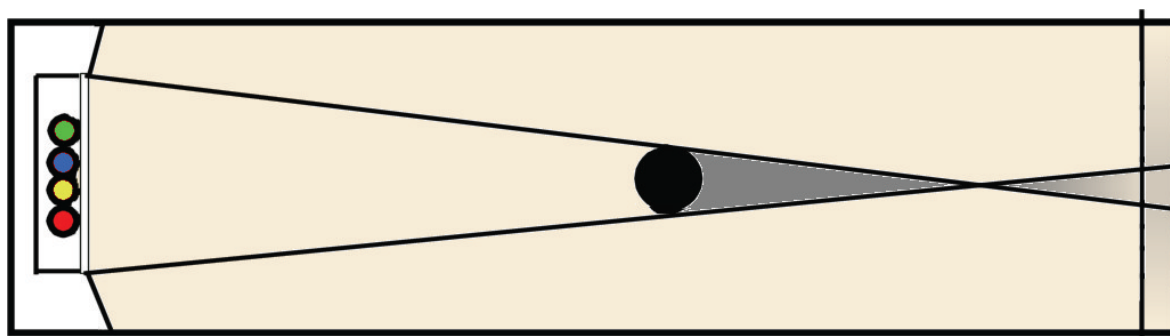
stínů. Čím vzdálenější od sebe LED diody budou, tím větší bude i plocha, kterou budou tyto barevné stíny zabírat.



Obr. 5.10: Princip vzniku barevných stínů při smíchání RGBY barev.

Prvním předpokladem je tedy umístění LED diod s co nejmenší vzájemnou vzdáleností. Zmenšením vzdálenosti sice dojde k omezení barevného efektu, nicméně pro získání plynulejších přechodů je potřeba, aby světlo u zdroje záření vycházelo, pokud možno, rovnoměrně z co největší plochy.

Ke spojení vyzařovaného světla do větší rovnoměrné plochy je nejvhodnější použití difuzoru, případně jeho kombinaci s vhodnou vazební optickou soustavou. V ideálním případě pak dojde k rovnoměrnému překrytí zdrojových barev, a tím pak dojde i k odstranění barevných stínů a jejich transformace do postupného snižování jasu.



Obr. 5.11: Princip míchání barev za pomoci difuzoru.

Na Obr. 5.11 je ukázka, jak by se měl v ideálním případě difuzor na straně RGBY zdroje záření zachovat, tedy optimálně rozprostřít jednotlivé barvy na celou plochu svítidla. I v případě difuzoru ale narazíme na potřebu kompromisu, protože proces, který při průchodu difuzorem rozvádí světlo po jeho ploše zároveň pohlcuje část optického záření. V případě skleněných a kvalitních polykarbonátových difuzorů se ztráty pohybují kolem 20–30 %. V případě použití levnějších plastů se pak ztráty mohou snadno dostat i přes 50 %. Závisí zde také na tom, jak plynule dokáže difuzor jednotlivé barevné složky rozptylovat po své ploše, s tím jsou totiž také spojeny výkonové ztráty. Můžeme mít difuzor,

který perfektně spojí jednotlivé barvy RGBY vysílače, ale pokud při tom ztratíme příliš mnoho výkonu, tak je třeba zvolit kompromis, nebo hledat další způsoby, jakými výstupní výkon zvýšit. Přes všechny ztráty ale reálně použitelný difuzor automaticky nezaručuje požadované parametry z pohledu spojení barev po celé své ploše. Zejména v případech, kdy budou jednotlivé LED diody příliš daleko.

5.2 Konstrukce pomocí samostatných LED

Konstrukce pomocí samostatných LED přináší výhodu v podobě přizpůsobitelnosti různým vlnovým délkám, tvarům a dalším okolnostem. V případě grafu z obrázku 5.1 je vidět, že vlnové délky pro červenou a modrou se v základnách začínají překrývat se zelenou a žlutou. Při vytváření pomocí samostatných LED nám ale nic nebrání jednoduše použít LED diody v mírně odlišné části spektra (např. červená na 660 nm a modrá 450 nm). Kanály se tak úplně oddělí pro vyhodnocování na přijímací straně budou teoreticky stačit i méně kvalitní (levnější) filtry.



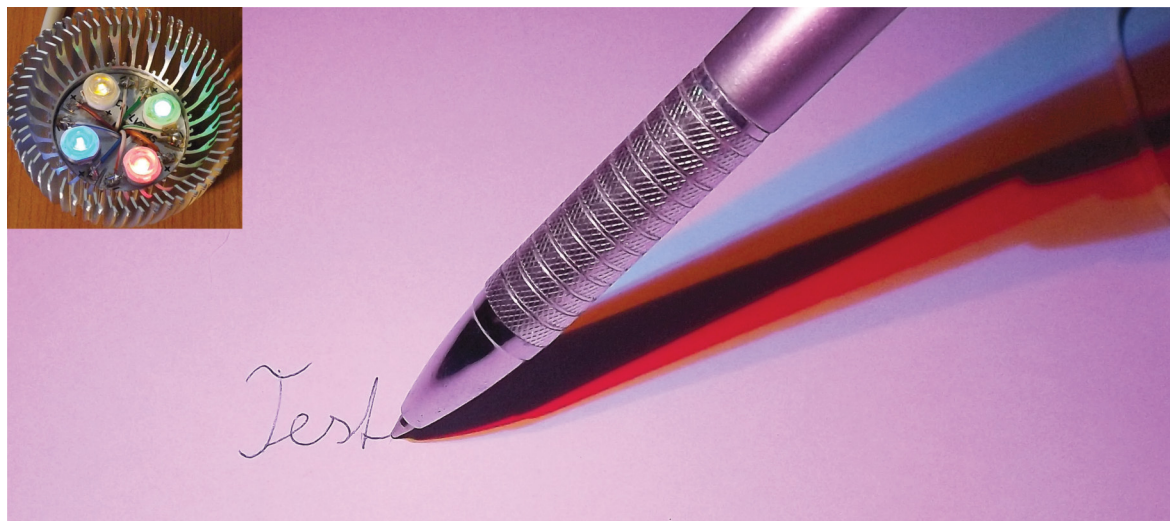
Obr. 5.12: Konstrukce RGBY svítidla - přestavba stávajícího zdroje osvětlení výměnou LED.

Na obrázku 5.12 je příklad konstrukce pomocí stávajícího zdroje osvětlení, výhodou je snadné nahrazení stávajících LED diod pomocí modelu RGBY. Uprostřed výsledného svítidla pak zůstal element pro umístění IR fotodetektoru pro přenos dat směrem ke svítidlu. Navzdory jednoduché úpravě dle aktuálních potřeb jsou ale jednotlivé LED diody navzájem příliš vzdálené.

Pokud budeme chtít takto vytvořený VLC vysílač použít k osvětlení bez části kolimátoru a difuzoru, tak bude výsledek vypadat dle následujícího obrázku (5.13). Při takto navržené konstrukci se bez difuzoru neobejdeme. Výsledné světlo je sice na první pohled rovnoměrné, ale jednotlivé LED diody jsou navzájem příliš vzdálené. V okamžiku, kdy světelné záření dopadne na překážku, vytvoří výrazně pozorovatelný barevný stín.

Doplněním o difuzor dojde ke spojení vyzařovaného světla na větší ploše a výsledek bude vypadat dle obrázku 5.14.

Použitý difuzor způsobil, že je stín méně pozorovatelný, protože světlo je u zdroje rozprostřeno na větší ploše. Nyní však vlivem konstrukce poklesl výstupní optický výkon.



Obr. 5.13: Samostatné LED bez difuzoru.



Obr. 5.14: Samostatné LED s difuzorem.

Vzdálenost difuzoru je sice ideální pro rozptylování světla, nicméně velká část světla uniká po stranách, protože není na difuzor nijak směřována. Další ztráty pak přidává samotný difuzor, který část světla pohlcuje, nebo vyzařuje zpět.

Pro nasměrování světla požadovaným směrem využijeme kolimátoru, díky kterému využijeme většinu optického výkonu. Na obrázku 5.15 je případ, kdy není použit difuzor a světlo z LED diod je jednoduše směřováno ven. Díky nepatrným rozdílům v geometrii jednotlivých LED ale v tomto případě není možné barvy plynule spojit.

Na obr. 5.16 je pak příklad, kdy získaný optický výkon nasměrujeme přes difuzor.

Z výsledků jednotlivých intenzit osvětlení (obr. 5.17) je patrné, že kombinace kolimátoru a difuzoru je v daném případně kombinací s největším výstupním výkonem, protože

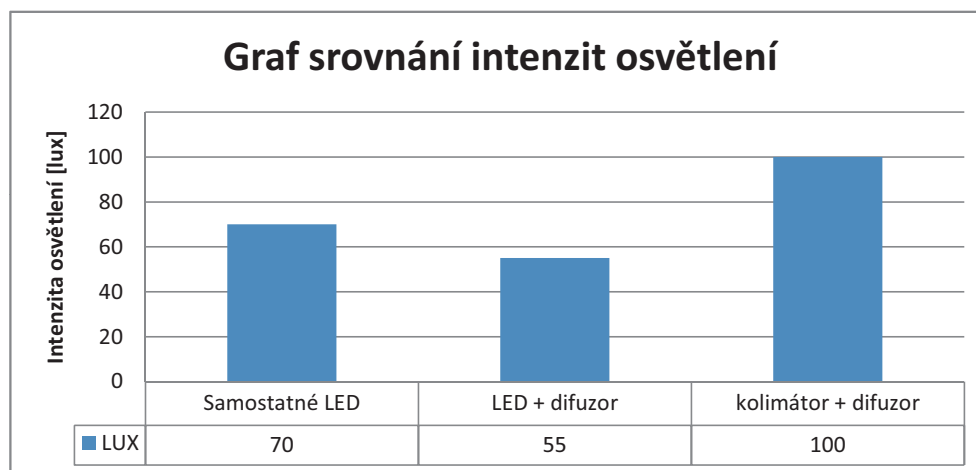


Obr. 5.15: Samostatné LED s kolimátorem.



Obr. 5.16: Samostatné LED s kolimátorem a difuzorem.

na difuzor je nasměrováno i světelné záření, které se v předchozích případech ztrácelo v tělese vysílače. Je však nutno podotknout, že světelné záření bylo v případě použití kolimátoru a difuzoru směřováno do menšího prostoru.



Obr. 5.17: Graf pro srovnání intenzit osvětlení pro konfigurace samostatných LED.

5.3 Konstrukce pomocí RGBY LED na společném čipu

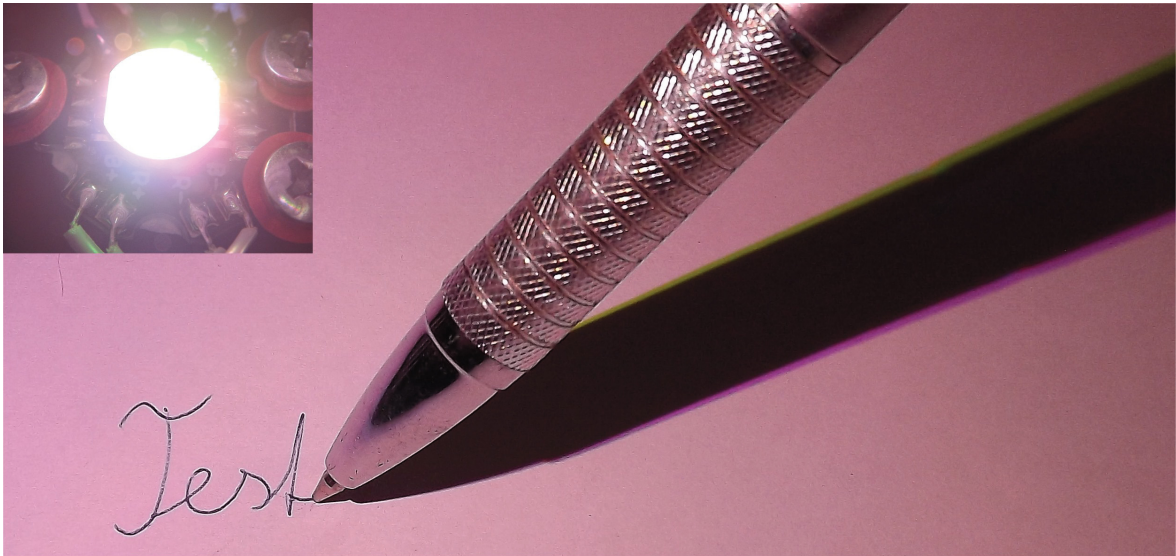
Pokud se snažíme jednotlivé LED diody konstrukčně přiblížit, tak i v případě SMD LED narazíme na omezení z hlediska výkonu a plochy, která bude pro konstrukci potřeba. Výhodou je, že v poslední době začínají na trh pronikat výkonové LED i v jiných konfiguracích než RGB. Díky požadavkům na osvětlování se stále více objevují výkonové konfigurace RGBY, RGBW (Red, Green, Blue, White) a také RGBYW. To umožňuje soustředit větší výkon na mnohem menší ploše. Na Obr. 5.18 je znázorněna RGBY LED dioda WL-BRYG2A140-001 s výkonem 4×2 Waty. Tato dioda je rovněž používána i při dalších popisovaných měřeních.



Obr. 5.18: RGBY výkonová LED (WL-BRYG2A140-001).

Efekt barevného stínování je nyní výrazně omezen už samotnou konstrukcí a je tedy mnohem méně pozorovatelný. Dokonce i při použití bez difuzoru (obr. 5.19).

V případě použití difuzoru už není barevný stín téměř pozorovatelný a ve výsledku



Obr. 5.19: Samostatný RGBY LED čip.



Obr. 5.20: RGBY LED čip s difuzorem.

se tedy jedná o nejvýhodnější způsob konstrukce. Vzhledem k dnešním možnostem je při vyšších počtech odebraných součástek velmi snadné nechat je vyrábět na zakázku. Pro případné reálné výrobní potřeby bude vhodnější konstrukci RGBY LED diody upravit. Pro úpravu máme k dispozici dvě možnosti. Můžeme buď přidat více žlutých čipů a kompenzovat tak jejich nižší pozorovanou účinnost a nižší hodnoty MTBF, nebo použít výkonnější žlutou LED. Výkonnější LED však bude mít odlišné parametry a to by mohlo být problematické z hlediska konstrukce modulátoru.

6 NÁVRH ELEKTRONICKÝCH OBVODŮ PRO TESTOVÁNÍ

V tomto okamžiku máme k dispozici 4 kanálový RGBY vysílač. Osvětlovací část je funkční a podmínka vytvoření bílé barvy je splněna. Nyní je potřeba začít testovat chování systému při přenosu dat. Za tímto účelem bylo potřeba vyvinout pro testování několik vysílačů a přijímačů. Cílem bylo ověření vlastností systému při pokrývání prostoru. Pro testování byla zvolena modulace On-Off Keying (OOK) doplněná o kódování Manchester. Díky tomu je zajištěna stabilní střední hodnota výkonu pro jednotlivé kanály, a tím i stabilní nastavení barevných souřadnic.

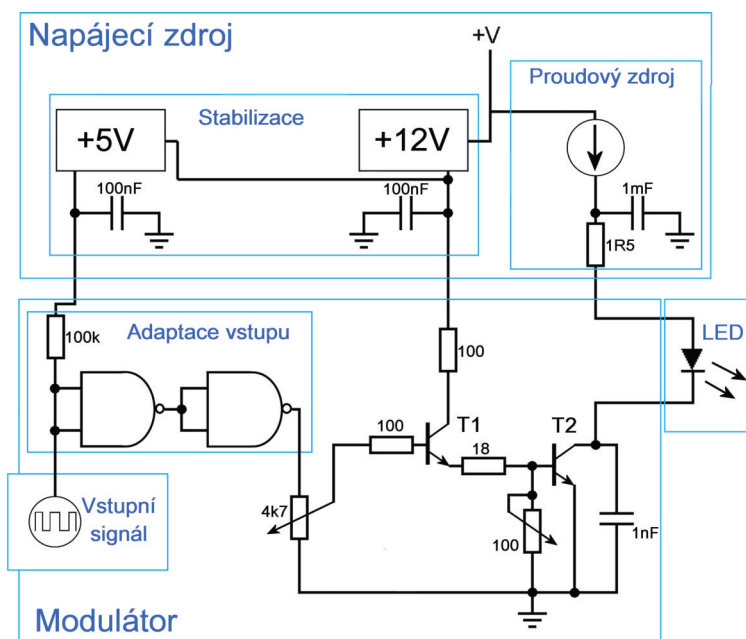
6.1 Návrh modulátoru

Pro návrh vysílače využívající LED diodu je vhodné předem zvážit typ použitých LED a jejich pracovní napětí, proud a frekvence. PN přechod má u LED diody značně kapacitní charakter a při modulaci OOK, kdy dochází k okamžitému spínání a rozpínání přiváděného napětí, bude docházet k nežádoucím záskokům v průběhu signálu. Pro omezení tohoto nežádoucího vlivu je vhodné volit konstrukci založenou spíše na řízení proudu. Pro tento účel se tak nejlépe osvědčil výkonový bipolární tranzistor, který při vhodném nastavení pracovního bodu dokáže snadno pracovat i s vysoce výkonnými LED. Při testování tak bylo například možné využít pro komunikaci i LED svítidlo veřejného osvětlení s výkonem 80W.

6.1.1 Proudový zdroj s bipolárním tranzistorem

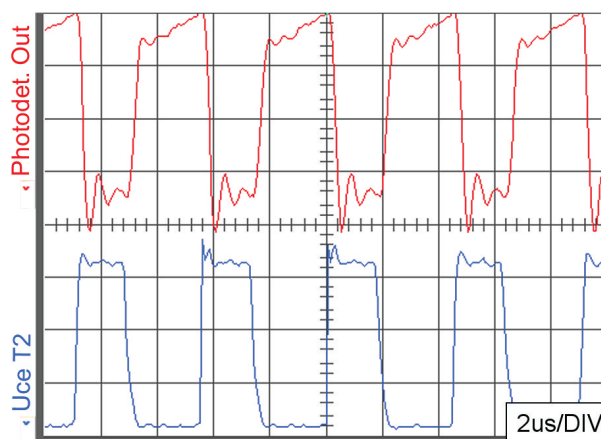
Pro testování různých typů LED diod byl navržen obvod z obrázku 6.1 [63].

Zapojení z obrázku 6.1 je složeno z několika částí. Část napájení se stará o zajištění stabilního napájecího napětí pro část adaptace vstupních hodnot a spínacího obvodu a předání plného napájecího napětí do proudového zdroje. Adaptace vstupu má za úkol adaptovat vstup modulátoru logice TTL a v případě odpojení od zdroje signálu se postarat o rozsvícení připojené LED diody. Obvody proudového zdroje umožňují připojit LED diodu, nebo skupinu LED diod s různým napájecím napětím. Proudový zdroj je doplněn o pomocný kondenzátor s kapacitou 1 mF. Ten se stará o rovnoměrnější zatížení proudového zdroje, kdy při vypnutí LED diody odebírá přebytek proudu ze zdroje. V okamžiku sepnutí LED pak nashromážděnou energii použije pro LED diodu. Výsledkem je menší pokles intenzity osvětlení při komunikaci, protože při zachování stabilní střední hodnoty signálu by jinak došlo k poklesu na 50 % původní hodnoty. Pokud bychom namísto tohoto kondenzátoru jednoduše zvýšili proud zdroje, tak by mohlo při poruše komunikace dojít k poškození LED. Obvod je totiž navržen tak, aby udržoval LED diodu rozsvícenou i při nepřítomnosti příchozích dat na vstupu obvodu. V případě poruchy tak zůstane funkce osvětlení zachována. Důležitý je rovněž kondenzátor mezi kolektorem a emitorem tranzistoru T2. Díky němu lze totiž kompenzovat proudové nárazy při jeho spínání, a tím se



Obr. 6.1: Schéma zapojení jednoduchého proudového modulátoru.

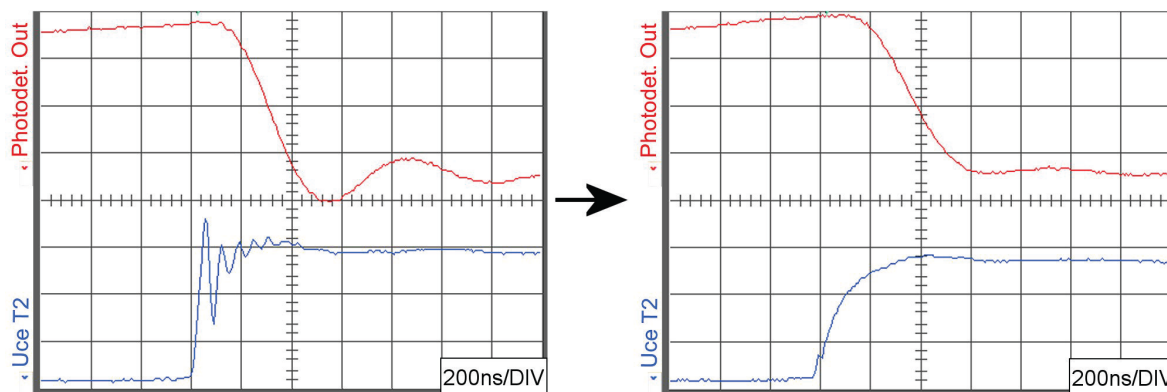
omezí zákmity vznikající ve výstupním signálu. Bez něj by průběhy signálů odpovídaly obrázku 6.2, kdy na spodním průběhu můžeme vidět napětí mezi kolektorem a emitorem tranzistoru T2 a na horním průběhu vidíme průběh signálu zachycený fotodetektoem (Thorlabs PDA36A-EC). Dosažení vysokých hodnot strmosti náběžných a sestupných



Obr. 6.2: Průběhy napětí a výstupního signálu při spínání LED diody.

hran není pro optické komunikace nejvhodnější řešení, protože v extrémních případech může amplituda těchto zákmitů narušit komunikaci. Pro navrhovaný systém je v tomto případě výhodnější hrany mírně vyhladit a zbavit se rušení, které by tak vznikalo už na vysílací straně. Použitím malého kondenzátoru na přechodu CE se průběhy změní dle obrázku 6.3.

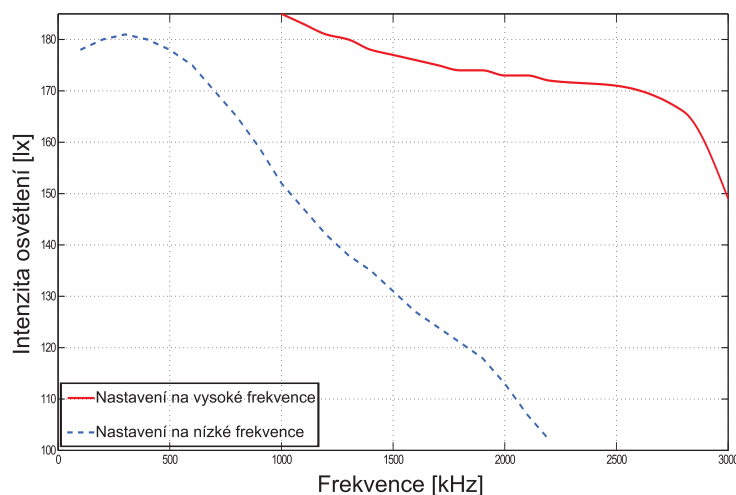
Obrázek 6.3 představuje přiblížení průběhu z obrázku 6.2. Na pravé straně je signál



Obr. 6.3: Porovnání vlivu kompenzačního kondenzátoru.

s tímto kondenzátorem a vlevo pak bez něj. Hodnota kondenzátoru se bude samozřejmě lišit podle použité LED.

Vyhlcení výstupního signálu sice zjednoduší následnou detekci optického signálu, má ale za následek omezení v časové oblasti. Na vyšších frekvencích bude signál slábnout. I přes veškerou snahu není žádný obvod absolutně univerzální a především ve frekvenční oblasti má vždy své hranice. Pracovní bod použitého modulátoru, stejně tak jako fotodetektor, byly nastaveny pro práci do 1 MHz. Takže tomu budou odpovídat i průběhy výstupních signálů. S jiným nastavením pracovního bodu se tyto hodnoty dají samozřejmě posunout (Obr. 6.4), ale i tak je rozsah pracovních frekvencí stále omezen.



Obr. 6.4: Vliv nastavení pracovního bodu na frekvenční charakteristiky.

Úbytek intenzity světla z obrázku 6.4 souvisí nejen s kompenzací zážitků v obdelníkovém průběhu signálu, ale i nerovnoměrnými dobami mezi dobami sepnutí a rozepnutí výkonového tranzistoru a také s nastaveným pracovním bodem tranzistoru T2. V případě,

že bude spínací tranzistor příliš saturován, prodlouží se poměry mezi dobami náběžné a sestupné hrany signálu. Průběh signálu se tak může výrazně změnit. Pokud se bude pracovní bod pohybovat pod hranicí saturace, tak bude při zvyšování frekvence klesat hodnota zesílení tranzistoru a to bude mít za následek pokles výstupního výkonu. Ideální nastavení pro zamýšlené pracovní frekvence je tak mírně nad hranicí saturace, protože při zvyšování frekvence nedojde k omezení výkonu a na nižších frekvencích není příliš ovlivněn průběh signálu.

Volba vhodného výkonového tranzistoru je opět otázkou kompromisu. První myšlenka je obvykle soustředěna směrem, že tranzistor s nejvyšším maximálním pracovním proudem a napětím bude vhodná volba do začátku. Nicméně, při měřeních bylo testováno hned několik výkonových tranzistorů a nejlepší parametry vykazovaly tranzistory, které byly z hlediska mezních hodnot proudu a napětí na hraně použitelnosti. Velká výkonová rezerva totiž do obvodu vnáší zbytečné parazitní kapacity a prodlužuje doby odezvy.

6.1.2 Chování LED při OOK

I chování různých typů LED diod se s navrženým modulátorem vzájemně lišilo. Především pak při porovnání frekvenčních charakteristik z pohledu intenzity osvětlení a amplitudy přijímaného signálu. V následujících podkapitolách jsou tak zobrazeny výsledky pro vybrané testované typy LED.

Výsledky pro SMD LED

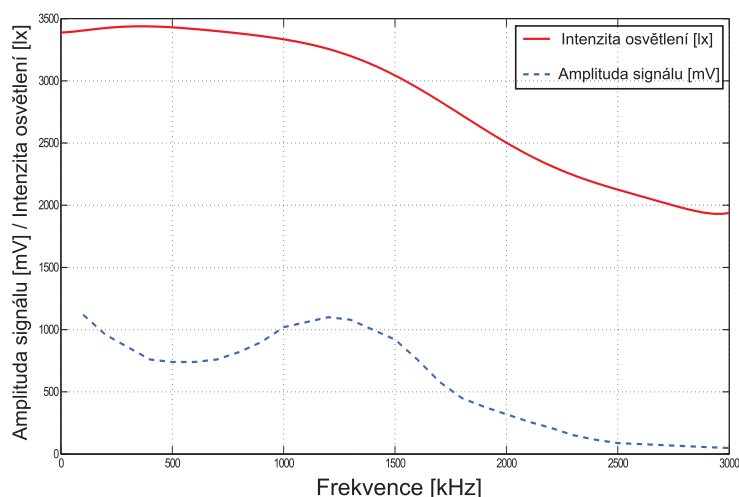
Pokud jde o osvětlení, tak SMD LED v dnešní době převládají. I pro potřeby komunikace mají své přednosti, protože jsou malé. Přesněji jejich PN přechod je malý a díky tomu mají menší parazitní kapacity. Optický výkon ale nedosahuje závratných hodnot, takže zůstává otázka jejich vhodného zapojení do skupin.

Pro úvodní měření byl použit RGB LED pásek s čipy 5050. Při měření budou sledovány dva různé parametry a to amplituda výstupního signálu změřená na fotodetektoru (údaj, který slouží pro komunikaci) a intenzita osvětlení (z hlediska osvětlování a vnímání lidským okem).

Z obrázku 6.5 je patrné, že průběh osvětlení je v rámci optimální hranice 1 MHz téměř stabilní a hodnota detekovaná fotodetektorem se drží v rozmezí 0,7 – 1,2 V. Zajímavější ale je, že jednotlivé průběhy se od sebe liší, protože pokles amplitudy signálu se při frekvenci kolem 500 kHz na výsledném jasu LED diody viditelně neprojevil. To lze přisuzovat odchyškám ve tvaru výstupního signálu, kdy střední hodnota signálu zůstala dle požadavků stejná, ale tvar signálu omezoval použitelnou amplitudu signálu.

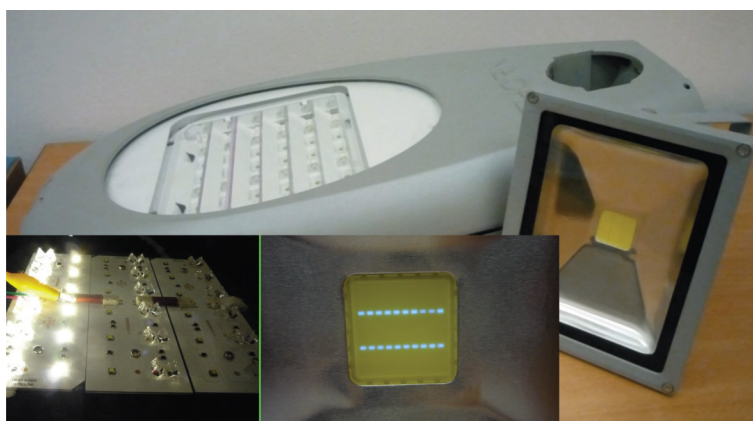
Výsledky pro výkonové LED

Výkonové LED ve své podstatě představují masivní PN přechod (nebo několik) a jsou uzpůsobeny práci s vysokým proudem a napětím. V dnešní době se rovněž začaly objevovat



Obr. 6.5: Průběhy amplitudy signálu a intenzity osvětlení pro RGB LED pásek.

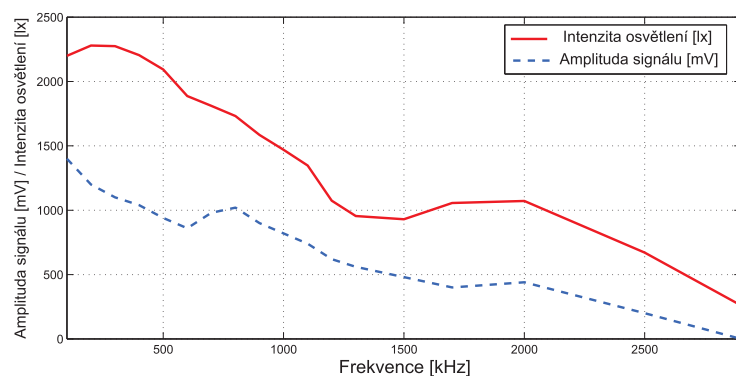
nové typy těchto LED pod označením COB (Chip On Board). Jedná se o alternativu s více menšími čipy na větším prostoru, takže je světlo i teplo rozloženo na větší ploše.



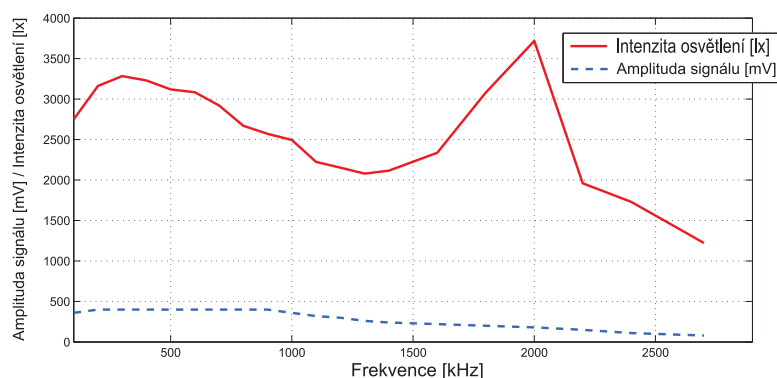
Obr. 6.6: LED zdroje světla s výkonovými LED. (svítidlo VO - THORN s výkonem 80W a COB LED reflektor 20W).

Pro lepší srovnání bylo ze svítidla veřejného osvětlení (VO) použito jen jednoho osvětlovacího členu. Díky tomu byly výkony jednotlivých svítidel na stejné úrovni a lze je tedy lépe porovnat. Průběhy napětí a intenzity osvětlení pak vypadají následovně:

Obrázky 6.7 a 6.8 ukazují, že s použitým modulátorem byly výkonové LED, z pohledu intenzity osvětlení, méně stabilní. U COB LED ale navzdory kolísání v oblasti intenzity osvětlení, signál z fotodetektoru vykazoval použitelné hodnoty i na vyšších frekvencích. Cílem tohoto srovnání je především poukázat na to, že stabilní střední hodnota signálu není sama o sobě zárukou, že bude intenzita osvětlení během komunikace homogenní. I pouhé kódování typu Manchester ve své podstatě potřebuje rozsah frekvencí, kdy nejvyšší



Obr. 6.7: Průběhy amplitudy signálu a intenzity osvětlení pro svítidlo VO (výkonové LED).



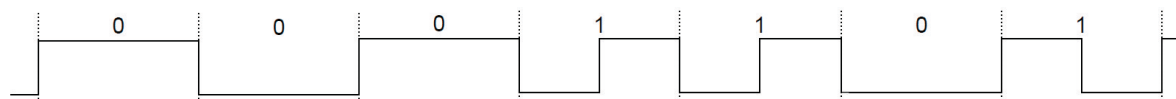
Obr. 6.8: Průběhy amplitudy signálu a intenzity osvětlení pro COB LED 20W.

frekvence signálu je dvojnásobkem té základní.

6.2 Konstrukce vysílací části

6.2.1 Obvody pro implementaci kódování Manchester

S fungujícím modulátorem jsme nyní před otázkou implementace vhodného kódování, protože OOK není pro účely komunikace ve viditelném vhodné. Hlavní požadavky na VLC systémy jsou v tomto případě jasné, komunikace nesmí být pozorovatelná lidským zrakem. Pro tento účel bylo zvoleno kódování diferenciální Manchester. Z příkladu průběhů na obrázku 6.9 je vidět, jak probíhá kódování dat a udržování stabilní střední hodnoty.



Obr. 6.9: Princip kódování diferenciální Manchester.

Z průběhů na obrázku 6.9 je rovněž vidět, že signál si signál ve své podstatě udržuje i střídavý průběh. Lze jej tedy na přijímacím fotodetektoru snadno filtrovat od stejnosměrné složky okolního osvětlení. Při přenosu dat budou vlivem rušení vznikat chyby v komunikaci, pro testování tak bude potřeba mít možnost vyhodnotit bezchybný přenos. Za tímto účelem byl pro obvody vysílače a přijímače zvolen obvod CTR124H [52]. Ten má implementovaný kodér/dekodér pro diferenciální Manchester. Data zde můžeme přenášet po 12-bitových slovech s možností volby 4-bitové adresy. Kromě přenášených dat tedy máme i možnost zvolit, kterému přijímači jsou data určena. Navíc je komunikace doplněna o synchronizaci a kontrolní součet, takže k přeneseným datům máme i informaci, zda byla data přenesena správně.

Preamble	Sync1	Sync2	Data A	Data B	Address	Checksum	Postamble
11001100	10111111	11110010	01101001	00001010	00010010	10000101	0000

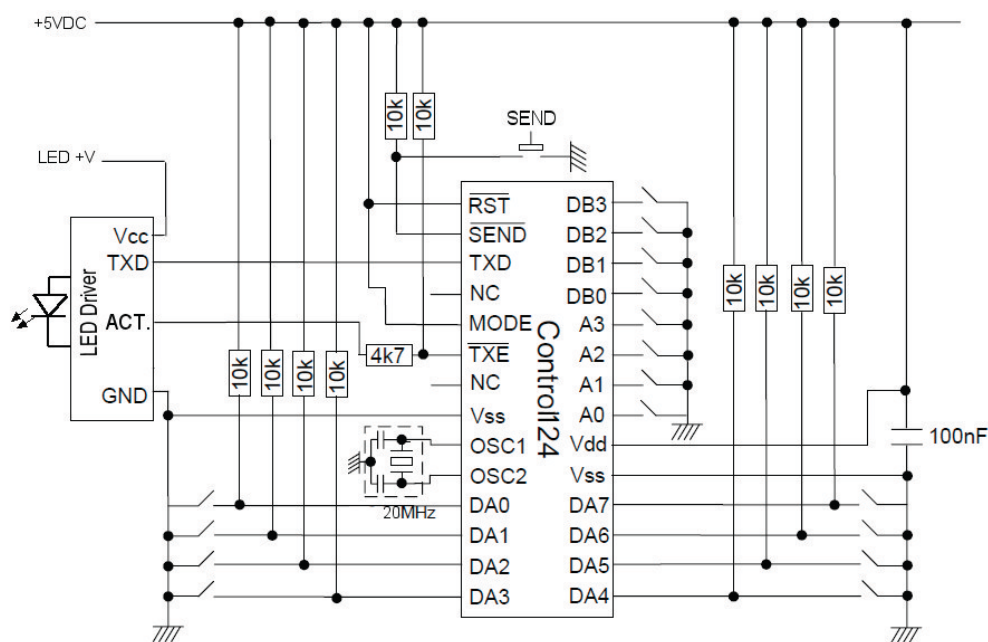
Obr. 6.10: Struktura datové sekvence vysílaná obvodem CTR124 [52].

Na obrázku 6.10 je znázorněna struktura přenášené datové sekvence. Zde můžeme vidět, že ve skutečnosti je přenášeno 16-bitů s daty a 8-bitová adresa. Chybějících 8 bitů ale nemá fyzicky vyvedené vstupy na pouzdro obvodu, takže je u zvoleného obvodu nelze využít. Celá datová sekvence pak, v případě použitého obvodu CTR124H, trvá přibližně 11 ms a neustále se opakuje. Vysílání tedy probíhá i v případě, že nejsou potřeba přenášet žádná data. Tato funkce je pravděpodobná i v případě reálného použití VLC komunikace, protože jde o jediný způsob, jak může přijímač pasivním způsobem zjistit, že se nachází v oblasti pokrývané optickým datovým signálem. Pro identifikaci sítě mu postačí "poslouchat" na správných frekvencích a nemusí plýtvat energií na neustálé vysílání při pokusech o navázání spojení.

6.2.2 Výsledné zapojení vysílací části

Spojením zmiňovaného kodéru a modulátoru získáme kompletní vysílací část pro jeden komunikační kanál. Schéma zapojení popisovaného vysílače/kodéru je na následujícím obrázku (obr. 6.11).

Vysílaná data se nastavují pomocí "spínačů" DA0-DA7 a DB0-DB3, adresování vysílaných dat je nastavováno pomocí vstupů A0-A3. Výhodou je, že s obvody modulátoru přizpůsobenými pro TTL logiku nyní můžeme k navržené vysílací části připojit doslova jakýkoliv zdroj optického signálu (LED). A to od běžné 5mm LED diody, až po LED lampu veřejného osvětlení. Výstup TXE slouží pro případnou aktivaci vysílací elektroniky v případě, že jsou vysílána data. V tomto případě jsou ale data vysílána trvale, což je zabezpečeno trvalým uzemněním vstupu SEND, takže signál o vysílání není zapotřebí. V případě systému s dynamickým přerozdělováním vlnových délek (Obr. 3.6) může být tento signál použit pro aktivaci/deaktivaci vysílání (přepnutím LED do klidového režimu v okamžiku, kdy kanál nevysílá).



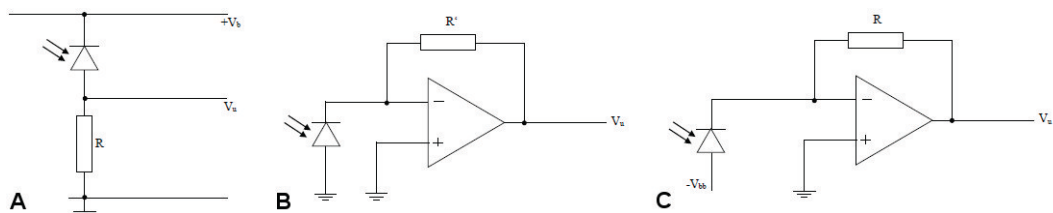
Obr. 6.11: Schéma zapojení vysílací části s kódováním Manchester.

6.3 Konstrukce přijímací části systému

Vysílací část představuje jen polovinu funkčního systému, protože je zbytečné vysílat data, pokud není způsob, jak je přijímat. Je tedy logické sestavit také odpovídající přijímací část, která umožní ověřit funkčnost navrhovaného systému. V tomto případě bude záležet hlavně na obvodech fotodetektoru.

6.3.1 Obvody fotodetektoru

Pro konstrukci fotodetektoru platí mnoho pravidel, volbou vhodného zapojení a součástek můžeme stavět fotodetektory s ohledem na citlivost, jednoduchost, nebo rychlost. V zásadě máme na vybranou ze tří zapojení.

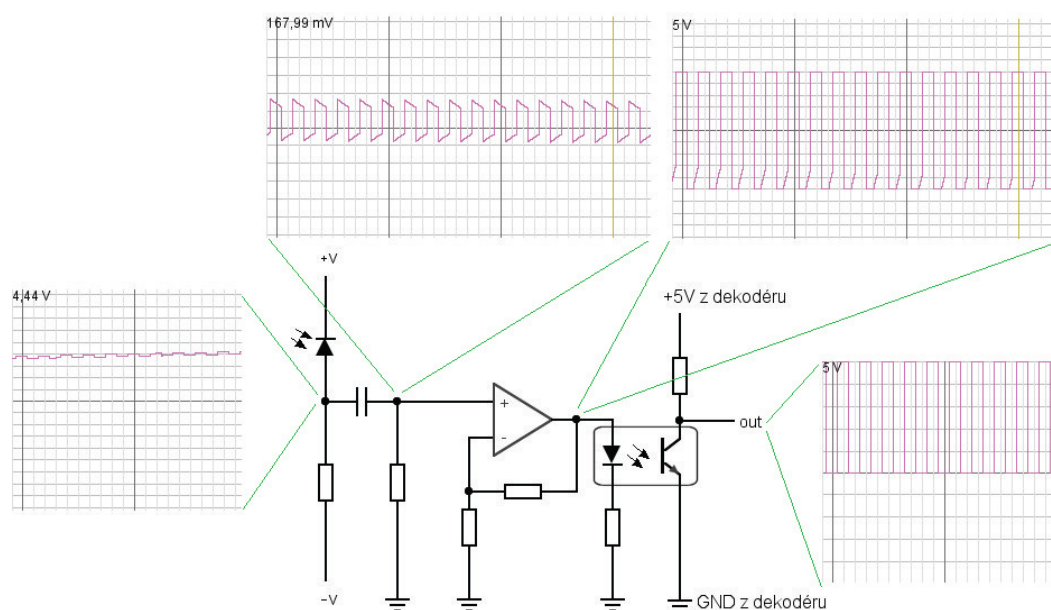


Obr. 6.12: Možnosti zapojení obvodů fotodetektorů.

Obrázek 6.12 popisuje základní zapojení fotodetektorů, A - jednoduché zapojení fotodiody v závěrném směru a rezistoru, B - transimpedanční zapojení ve fotovoltaickém

režimu, C - transimpedanční zapojení ve fotovodivostním režimu. Pro konstrukci je nejvhodnější použít transimpedanční zapojení, protože v porovnání s jednoduchým zapojením dioda/rezistor vykazuje lepší parametry z pohledu citlivosti i rychlosti. Otázkou nyní zůstává volba mezi fotovoltaickým a fotovodivostním režimem. Fotovodivostní režim je samozřejmě mnohem rychlejší a pro většinu aplikací i mnohem vhodnější, nicméně v tomto případě není rychlost prioritou. Použitý obvod CTR124H komunikuje s přenosovou rychlostí 5,6 kb/s, což je pro přenos telemetrie a měření dostačující. Spolu s tím je tak v tomto případě výhodnější využít právě fotovoltaické zapojení fotodetektoru. Z pohledu nižší rychlosti odezvy totiž omezení nejsme a můžeme tak využít mírně výhodnějšího průběhu z hlediska citlivosti. Další výhoda fotovoltaického zapojení pak spočívá v tom, že na fotodiodě není žádné napětí a pro potřeby měření tak můžeme připojit jakoukoliv fotodiodu bez obav z možnosti poškození velkým závěrným napětím. Například použitá fotodioda BPW21 má totiž mezní závěrné napětí pouze 10 V.

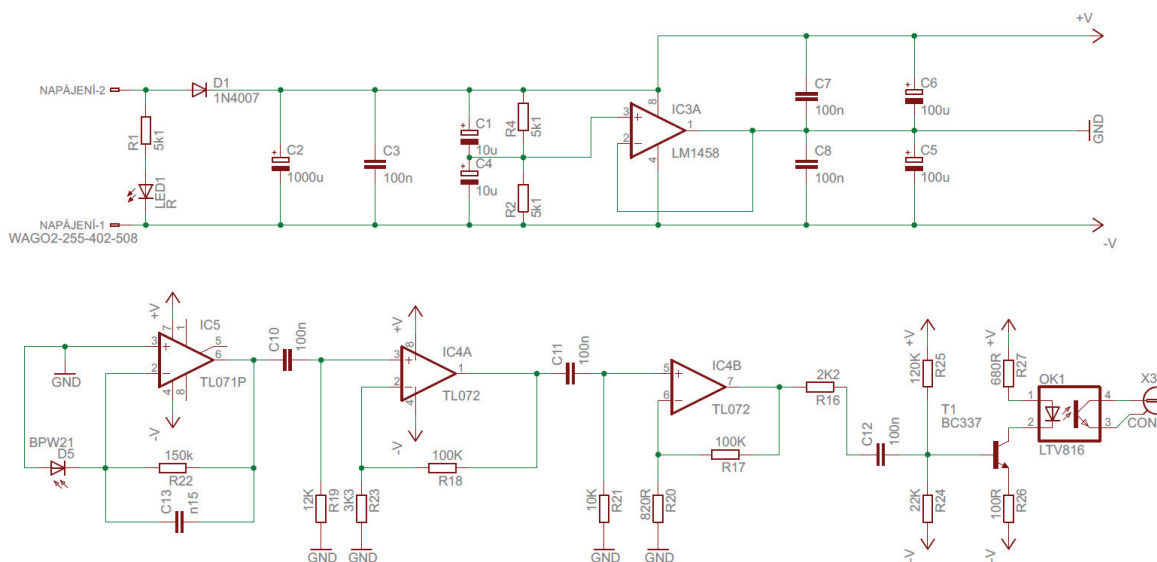
Pro oddělení stejnosměrné složky, která představuje vliv okolního osvětlení, je nezbytné použití kondenzátoru, který bude tvořit filtr minimálně ve formě horní propusti a bude tak blokovat většinu neúčinných signálů z okolí. Pokud budou jako zdroj rušení působit i vyšší frekvence, tak bude potřeba přistoupit k použití pásmové propusti, která omezí rušení i z vyšších frekvencí. Ve všech případech ale zůstává otázka ohledně způsobu zpracování přijímaného signálu. Přijímaný signál totiž bude řádově v jednotkách - desítkách milivoltů. V rámci fotodetektoru ho bude potřeba zesílit a regenerovat (obnovit jeho původní tvar). Zde je jedna z výhod OOK, protože pro regeneraci přijímaného signálu postačí přijímaný signál zesílit v koncovém stupni natolik, aby signál dosáhl saturace a opět tak získal obdélníkový průběh. Popis principu detekce signálu je znázorněn na obrázku 6.13.



Obr. 6.13: Průběh detekce signálu.

Napájení fotodetektoru a přijímací části s dekodérem, bude v nejpravděpodobnějším případě probíhat s jedním společným napájecím zdrojem. V ideálním případě budeme mít k dispozici síťový zdroj, kde symetrické napájení s dostatečnou výkonovou rezervou nebude problém. V případě napájení z baterií, nebo ze zdrojů bez schopnosti dodávat symetrické napájení bude potřeba vytvořit vlastní filtrovaný symetrický zdroj. A to pouze pro obvody fotodetektoru, protože tyto obvody pracují s malými signály a mohlo by docházet k rušení skrze napájecí napětí. Při vyhodnocování napěťových úrovní v jednotkách milivoltů totiž bude případně zvlnění napájecího napětí vnášet do signálu parazitní šum, který může snadno znemožnit obnovení signálu. Obvod fotodetektoru je tak nutno oddělit a precizně odfiltrovat od zbytků obvodů s dekodérem. Pro přenos zesíleného a obnoveného signálu do dekodéru použijeme optočlen, protože signál sice pochází ze společného zdroje, ale z důvodu různých napěťových potenciálů je potřeba tyto části galvanicky oddělit.

Schéma zapojení navrženého fotodetektoru, včetně zdroje symetrického napájení, je na obrázku 6.14.



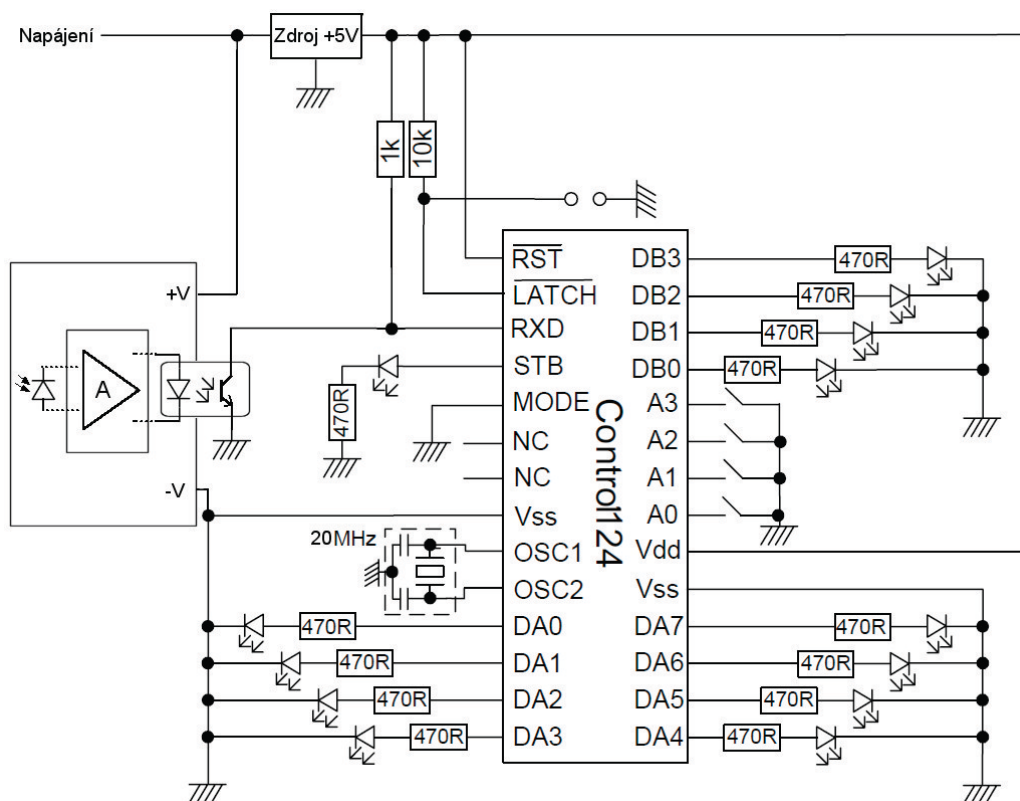
Obr. 6.14: Obvody navrženého fotodetektoru.

Pro obvody fotodetektoru byla použita křemíková fotodioda BPW21. Ta se vyznačuje pracovní oblastí upravenou právě pro viditelné spektrum v oblasti od 350 do 820 nm. Přičemž i její spektrální odezva se blíží citlivosti lidského oka. Této charakteristiky je ale dosaženo použitím filtru, takže odezva fotodiody ve viditelné části spektra je stále relativně nízká (pouze 0,34 A/W při 550 nm). Pro příjem malých signálů o nízkých frekvencích je ale stále nejlepší volbou, protože má široký pozorovací úhel ($\pm 55^\circ$) a velkou plochu PN přechodu (7,34 mm²). Pro potřeby zesílení signálu z fotodiody se ukázaly nejvhodnější operační zesilovače s FET vstupními obvody. Zesilovače s nižším vstupním odporem totiž odebíraly z fotodiody příliš mnoho energie a ovlivňovaly tak citlivost. Celkové zesílení

obvodů fotodetektoru je téměř 4000. Pro úspěšnou detekci tak teoreticky stačí, aby transimpedanční zesilovač s fotodiodou dodal alespoň 1 mV užitečného signálu. Pro obvody fotodetektoru lze dosáhnout i dalších vylepšení, například v podobě automatické regulace zesílení a obvodového řešení s menším šumem [61].

6.3.2 Výsledné zapojení přijímací části

Navržený fotodetektor nyní připojíme k obvodům dekodéru, který přijatá data dekoduje. Obvody dekodéru jsou zobrazeny na obrázku 6.15 a vychází opět z obvodu CTR124, který je pomocí vstupu MODE přepnut do dekodovacího režimu. Datové vstupy z obr. 6.11 jsou nyní přepnuty do funkce výstupů. Za předpokladu, že adresa nastavená na přijímači se shoduje s adresou vysílače a přijatá sekvence neobsahuje chyby, se zobrazují přijatá data. Propojení mezi rozdílnými potenciály u fotodetektoru a dekodéru je pak v tomto případě realizováno pomocí optočlenu. Ten oddělí napájecí potenciály a současně umožní převod signálu na úroveň logiky TTL. Pomocí nastavení vstupu LATCH si můžeme zvolit, jakým způsobem se mají přijímaná data zobrazovat, v případě přizemnění vstupu budou přijatá data zůstávat na výstupech až do doby, než bude přijat další platný paket. V opačném případě budou při ztrátě signálu data z výstupů odstraněny. Pro detekci správně přijímané komunikace slouží výstup STB, který signalizuje každou správně přijatou sekvenci pomocí 10 μ s impulsu.



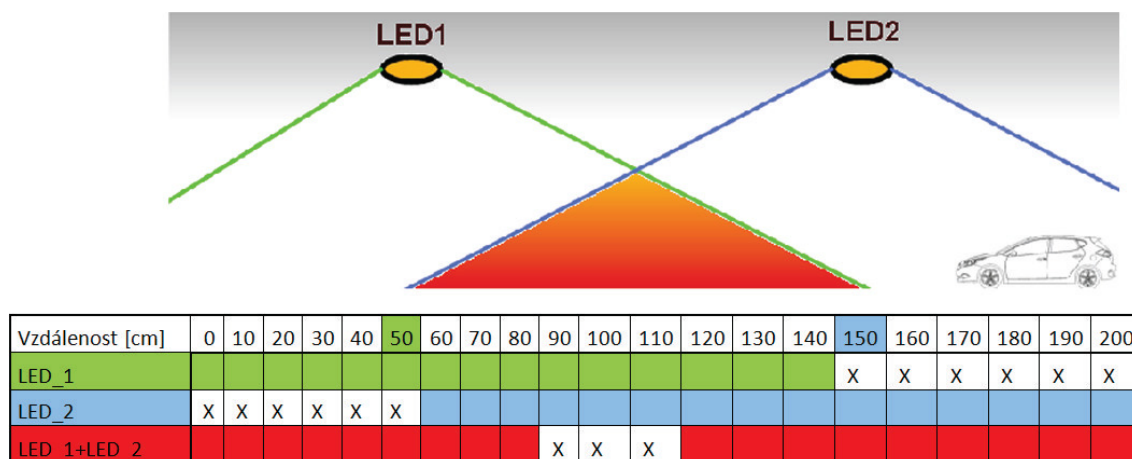
Obr. 6.15: Zapojení přijímací části navrhovaného systému.

7 TESTOVÁNÍ KOMUNIKAČNÍCH PARAMETRŮ

Poslední část této práce se zabývá ověřením možnosti nerušené komunikace na více vlnových délkách současně. S existencí vysílací i přijímací části systému lze jednoduše zjistit, respektive ověřit, jak se bude RGBY komunikační systém chovat v reálných podmínkách.

7.1 Interference komunikačních kanálů na shodné vlnové délce

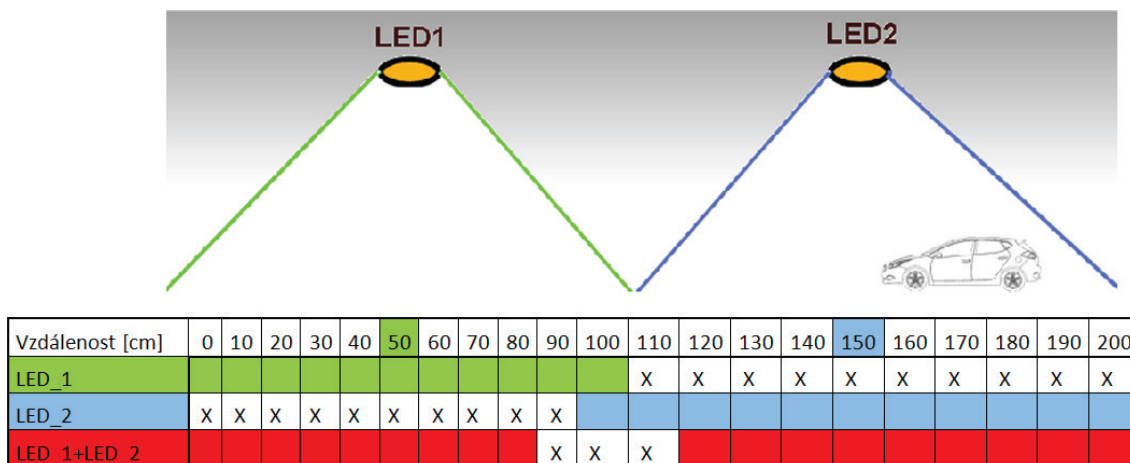
Pro zhodnocení případného rušení je vhodné začít případem, kdy budou vedle sebe komunikační kanály o shodné vlnové délce a přitom bude každý kanál vysílat různé sekvence dat. Pokud máme v jednom prostoru více shodných zdrojů komunikace, můžeme automaticky předpokládat vznik rušení. Na rozdíl od rádiových sítí, které mohou způsobovat rušení i přes zdi a jiné pevné překážky, jsou v tomto ohledu optické sítě mnohem výhodnější. Ve větších prostorách ale existuje možnost, že z nějakého důvodu vznikne situace, kdy se vedle sebe ocitnou 2 shodné zdroje (v našem případě 2 stejné barvy) optického signálu. V tom případě dojde ke vzniku rušení, protože na straně fotodetektoru se neuplatní vstupní filtrace v optickém spektru. Fotodetektor pak jednoduše převádí všechny dopadající optické signály do elektrické oblasti bez ohledu na jejich původ. U osvětlovacích soustav je pravděpodobné, že světlo z jednotlivých zdrojů nebude dostatečně směrově odděleno, takže vždy k nějakému překryvu dojde. V následující části této kapitoly je tak popsáno, jak bude v tomto případě vypadat výsledný komunikační dosah a jak se bude toto rušení projevovat.



Obr. 7.1: Příklad komunikace s překryvem pokrývaných oblastí.

V případě situace podle obrázku 7.1 pokrývá první zdroj záření (LED1) tak velkou oblast, že komunikace dosahuje za hranice sousedních oblastí (většina instalací s více svítidly). Součástí obrázku 7.1 je i tabulka dat ze zmenšeného modelu, kdy jsou na 2 metrové trase umístěny 2 svítidla (LED1 a LED2) ve vzdálenosti 50 a 150 cm. Signál jednotlivých svítidel je dostatečně silný, aby jednotlivá svítidla pokryla oblast o poloměru 1 metru,

takže se pokrývané oblasti překrývají. Každá LED vysílá jiná data a přijímač je nastaven tak, aby rozlišoval, ze které LED aktuálně přijímá platná data. Pokud se podíváme na výsledek komunikace, tak komunikace fungovala téměř v celé oblasti. Výjimkou byla oblast 30 cm, nacházející se přesně na hranici mezi buňkami.



Obr. 7.2: Příklad komunikace bez překryvu pokrývaných oblastí.

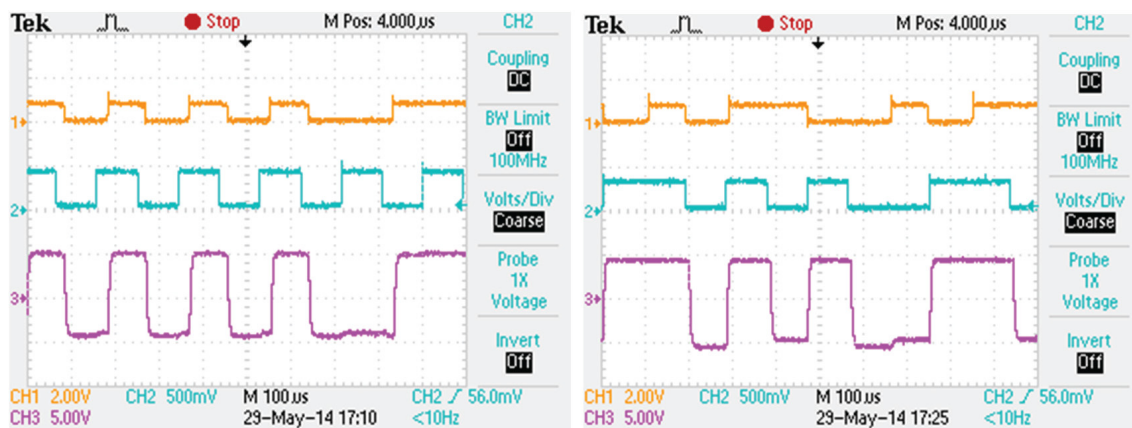
V druhém případě (obr. 7.2) byla situace odlišná v tom, že vysílací výkon byly nastaveny tak, aby jednotlivá svítidla komunikovala do vzdálenosti o poloměru 0,5 m. Jednotlivé hranice tak končily ve vzdálenosti 100 cm. V tomto případě by se dalo očekávat, že bude problém vyřešen, nicméně následující tabulka ukazuje výsledky, podle kterých probíhala komunikace úplně stejně, jako v předchozím případě (obr. 7.1). A to i přes změnu ve vysílacích výkonech jednotlivých zdrojů záření.

Nevýhodou v těchto případech je totiž fakt, že světelné záření stále dopadá i do okolí, ačkoliv jeho výkon už není dostatečný pro úspěšnou detekci. Díky tomu je komunikace rušena stejným způsobem, jako v případě, že se buňky překrývají při vyšším výkonu. Na druhou stranu se vlastně jedná o dobrou zprávu, protože jednotlivé vysílače si mohou ponechat dostatečné výkonové rezervy a přitom nedojde ke zhoršení podmínek pro komunikaci.

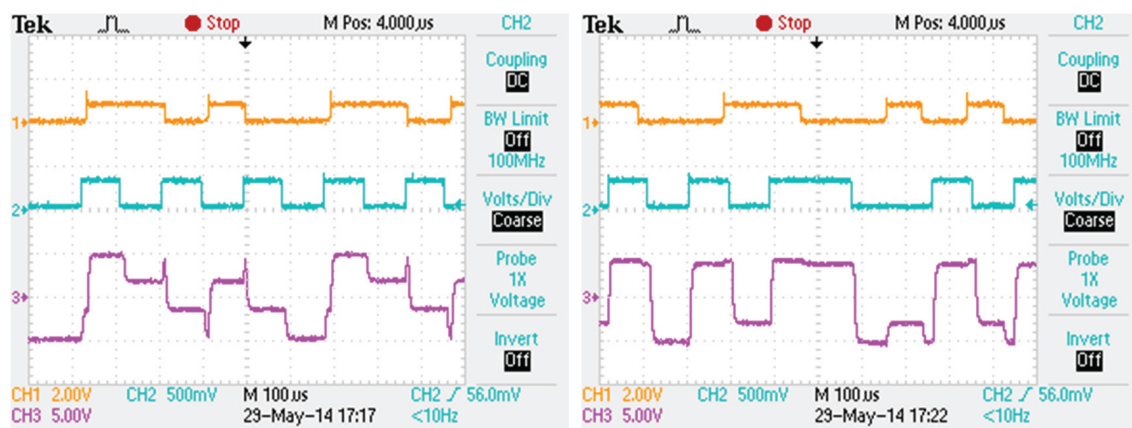
Obrázek 7.3 ukazuje průběhy signálu na fotodetektoru pod jednotlivými vysílači, ve vzdálenostech 50 a 150cm.

Na obrázku 7.3 je vidět, že ve vzdálenosti 50 cm odpovídá detekovaný signál (na kanálu 3) vysílanému signálu na kanálu 1. A stejně tak na 150cm odpovídá detekovaný signál průběhu kanálu 2. S postupným přibližováním ke středu pokrývané oblasti se začnou jednotlivé kanály postupně prolínat a vytvářet tak průběhy, které už jsou na detekci náročnější (obr. 7.4). Všechno nyní závisí na fotodetektoru a jeho rozhodovacích úrovních, tedy od jaké úrovně napětí označí signál za "1", nebo "0".

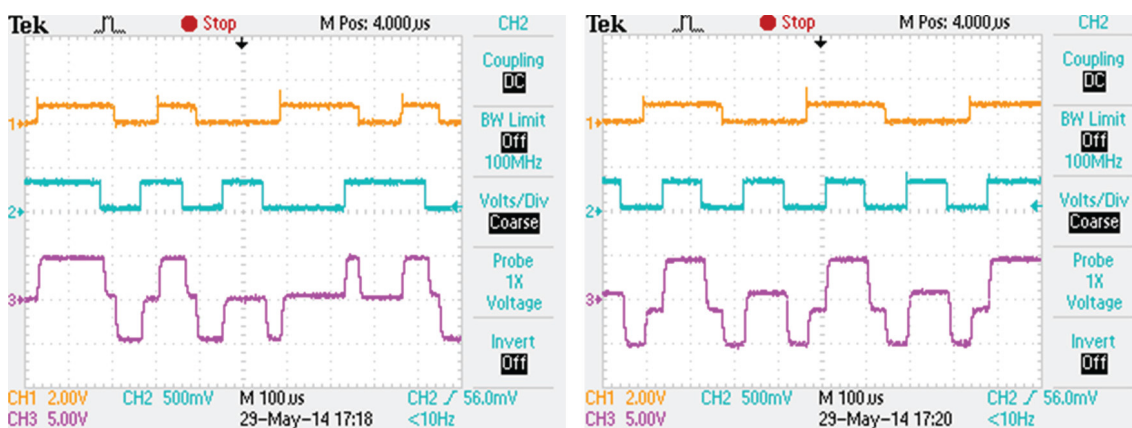
V případě, že se podíváme na signály uprostřed pokrývané oblasti (obr. 7.5), tak už od sebe signály nelze rozeznat a signál z fotodetektoru tak nelze zpracovat. Zde je ještě



Obr. 7.3: Detekovaný signál pro 50 a 150 cm. (Kanál1,2 = LED1,2; K.3 = Fotodetektor).



Obr. 7.4: Detekovaný signál pro 80 a 120 cm. (Kanál1,2 = LED1,2; K.3 = Fotodetektor).



Obr. 7.5: Detekovaný signál pro 90 a 100 cm. (Kanál1,2 = LED1,2; K.3 = Fotodetektor).

nutno zdůraznit, že toto měření probíhalo v zatemněné místnosti bez okolního rušení, takže průběhy jsou ve své podstatě téměř ideální. Může se tedy zdát, že na vzdálenostech blízko hranice jsou průběhy ještě čitelné, v reálných podmínkách tomu tak ale nebude.

Výsledek měření interferencí pro shodné vlnové délky lze interpretovat tak, že pro pokrytí prostoru můžeme využít vyššího výkonu a buňky překrýt (se stejným výsledkem jako při složitějším nastavení). Mobilní zařízení pak bude mít přinejmenším výkonovou rezervu na straně přijímače a bude moci komunikovat i při zhoršených podmínkách (např. pohyb osob v prostoru mezi přijímačem a vysílačem, nebo vyšší šum z okolního osvětlení).

Tyto výsledky jsou také jedním z hlavních důvodů, proč je systém RGBY výhodnější pro pokrývání větších prostor. Díky potenciálu buňkové struktury je totiž schopen překrývat buňky a i když interferenci zabránit nedokáže, tak daný zarušený prostor jednoduše pokryje signálem jiné vlnové délky.

7.2 Komunikace při pohybu přijímače

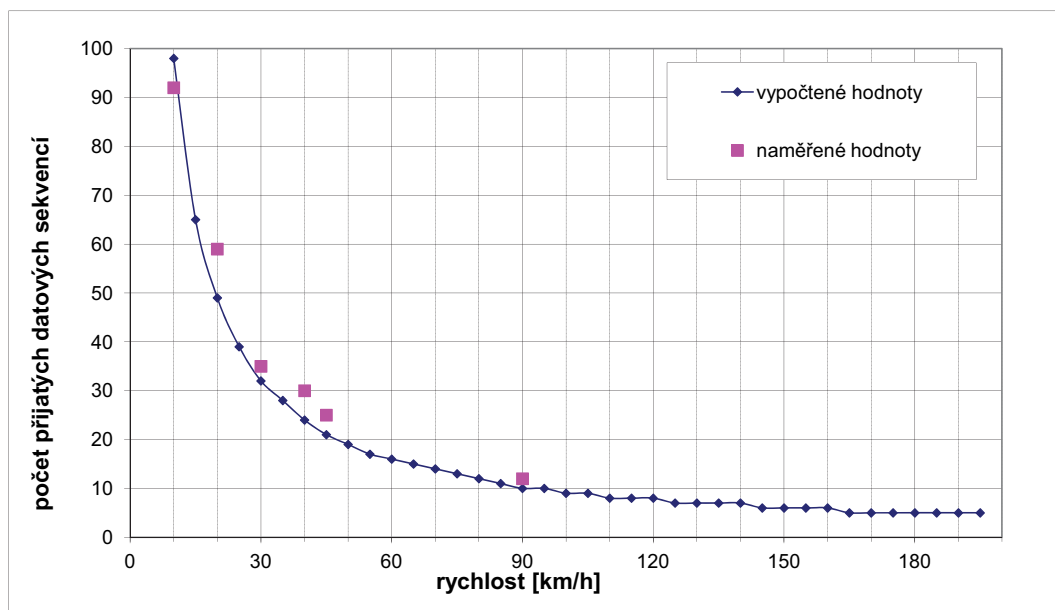
Při pohybu v pokrývaném prostoru bude vždy docházet k menším, či větším, výpadkům signálu. Menší výpadky, kdy se z komunikace budou ztrácet jednotlivé bity, jsme schopni jednoduše kompenzovat například některými ze samoopravných kódů. Při větších ztrátách už je ale oprava téměř nemožná a je potřeba s ní během návrhu počítat. I když bude v rámci pokrývané oblasti vše spolehlivě fungovat, tak při pohybu přijímače dříve či později k výpadku komunikace pravděpodobně dojde. Opuštěním pokrývaného prostoru dojde k výpadku komunikace, který nelze jednoduše kompenzovat. Z konstrukčního hlediska navíc navrhovanému RGBY komunikačnímu systému nic nebrání v použití například pro venkovní komunikaci mezi infrastrukturou s vozidly (I2V). Například pro přenos dat o dopravě pomocí LED informačních tabulí, nebo LED svítidel veřejného osvětlení.

V následujícím příkladu je popsán případ, kdy se mobilní stanice pohybuje napříč pokrývaným prostorem různými rychlostmi. Přijímač byl během měření umístěn za čelním sklem automobilu, vysílač byl umístěn v blízkosti vozovky a plnil funkci inteligentního dopravního značení.

Vzhledem k tomu, že doba trvání datové sekvence je u použitého vysílače 11 ms, tak pro možnost příjmu musí na fotodetektor dopadat signál minimálně po tuto dobu. Reálně pak ještě o něco déle, protože je pravděpodobné, že první sekvence nebude přijata od začátku a bude tak potřeba čekat na další. Plocha pokrývané oblasti byla nastavená na 3 metry. Během pohybu skrze tuto oblast detekuje fotodetektor přijímače data ze stacionární vysílací části a všechny bezchybně přijaté datové sekvence jsou zaznamenány. Jejich počet je pak v závislosti na rychlosti pohybu vyneseno do grafu na obrázku 7.6. Spolu s naměřenými daty je do grafu současně vynesena i teoreticky vypočtená hodnota počtu správně přijatých datových sekvencí. K tomu můžeme použít následující vzorec:

$$n_{seq} = \frac{s_{pok} \cdot 3,6}{v \cdot t_{seq}}, \quad (7.1)$$

kde n_{seq} je počet přijatých datových sekvencí, plocha pokrývané oblasti vyjádřena jako s_{pok} [m], v je rychlost pohybu mobilní stanice [km/h] a t_{seq} je doba trvání jedné sekvence [s].



Obr. 7.6: Vypočtené a naměřené hodnoty pro pokrývanou oblast.

Z průběhů hodnot na obrázku 7.6 je patrné, jak strmý je pokles přijatých paketů při nižších rychlostech a jak nízký je počet přijatých sekvencí při vysokých rychlostech. V obou případech je vidět, že při přenosu většího množství dat bude rychlost pohybu kritická a to nejen pro použití v automobilech. Při rostoucích rychlostech, případně při zmenšování buněk v pokrývané oblasti, se totiž bude zkracovat doba, po kterou je signál k dispozici. To způsobí, že objem přijatých dat v rámci jedné buňky bude limitován.

7.3 Filtry

Vzhledem k tomu, že komunikace může probíhat na více vlnových délkách současně a fotodiody pracuje v plném rozsahu používaných vlnových délek, tak bude příjem signálu představovat problém. Každá fotodiody funguje v určitém rozsahu spektra, pro viditelné spektrum je nejvýhodnější použití křemíkové fotodiody, která reaguje na viditelnou oblast spektra a nejvyšší citlivostí dosahuje v blízkém IR spektru. Pokud je přijímaný signál ve funkčním rozsahu vlnových délek, tak jej fotodiody jednoduše převede na fotoproud. Pokud na ní tedy dopadnou signály z více kanálů najednou, tak se signály z jednotlivých kanálů sečtou, a to znemožní jejich další zpracování. Pro oddělení signálu z více kanálů je tak nutné provést filtraci v optickém spektru ještě před dopadem na fotodiody. Na PN přechod tak v ideálním případě dopadnou pouze fotony o požadované vlnové délce a ty už jsou poté snadno zpracovány.

Optické filtry fungují tak, že pohltí všechny vlnové délky s výjimkou určité části spektra, které propustí skrz. Podobně jako u filtrů pro elektronické signály, lze i optické filtry konstruovat do různých konfigurací:

- Horní propust - propouští vlnové délky, které jsou delší než nominální hodnota.
- Dolní propust - propouští vlnové délky, které jsou kratší než nominální hodnota.
- Pásmová zádrž (Notch filtr) - Pohltí určitou část spektra.
- Pásmová propust - propustí jen určitou část spektra.

Složitější filtry se většinou tvoří skládáním různých filtrů na sebe. V případě potřeby tak lze vytvářet i filtry, které plní více funkcí najednou, nebo fungují pouze v omezené části spektra. Vlastnosti filtrů pak také závisí na použitém materiálu.

Pro potřeby oddělení jednotlivých vlnových délek v RGBY systému je zapotřebí filtrů, které budou plnit funkci pásmové propusti. Pro tento účel se nabízí hned několik materiálů, které na první pohled potřebné požadavky splňují. Při testování se ale ukázalo, že vlastnosti materiálů nelze posoudit bez podrobnějších znalostí jejich spektrálních charakteristik. Vzhledem k množství možných kombinací pro měření jednotlivých filtrů pro různé vlnové délky, je výhodné nejprve změřit jejich spektrální charakteristiky pomocí spektrometru.

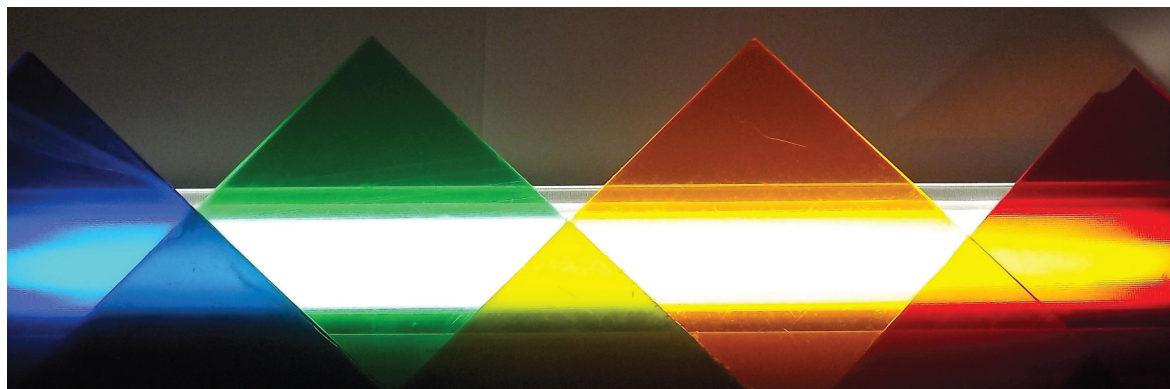
Měření spektrálních vlastností jednotlivých materiálů probíhalo vždy ve dvou krocích:

- V prvním kroku měření je použito širokospektrálního zdroje světelného záření, jehož hodnoty jsou zaznamenány jako reference. Poté jsou mezi širokospektrální zdroj a spektrometr vkládány jednotlivé filtry a vyhodnocuje se relativní úbytek výkonu na jednotlivých vlnových délkách. Tím získáme relativní propustnosti filtrů.
- V druhém kroku je postupováno stejně, nicméně tentokrát se jako reference použije RGBY vysílací jednotka. Poté jsou opět vkládány jednotlivé filtry a zaznamenává se amplituda měřených spekter. Tím získáme údaj o velikosti rušení v jednotlivých částech RGBY spektra.

7.3.1 Filtry z akrylátového skla

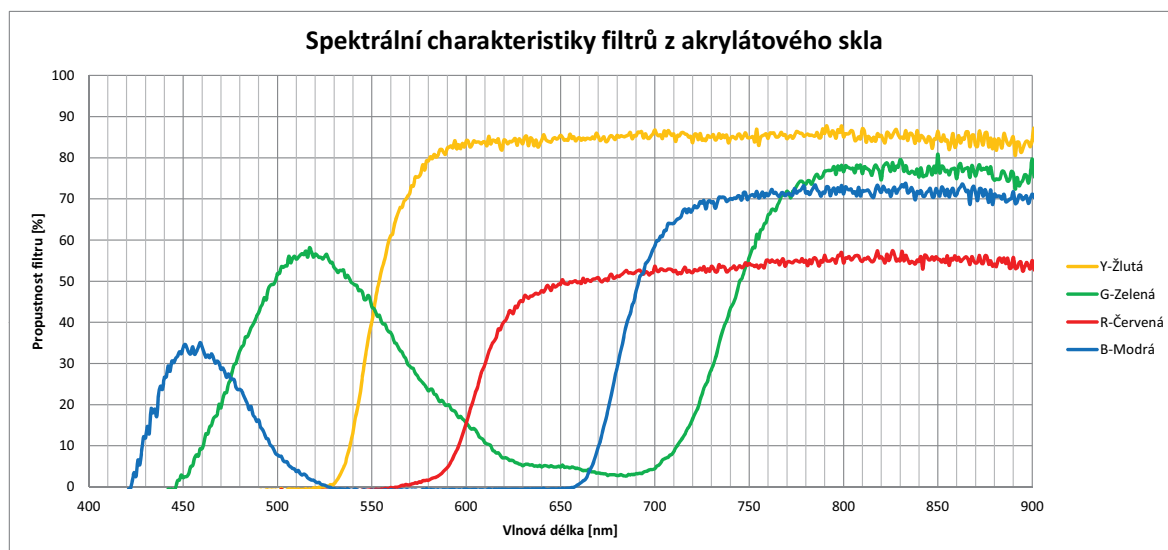
Vzhledem k nízké ceně a snadné dostupnosti byl pro potřeby filtrace nejprve zvolen barevný Polymethylmetakrylát (známý také jako "plexisklo"). Naneštěstí má toto řešení určitou nevýhodu. Filtry tohoto typu totiž nejsou ve všech případech příliš precizní a nedokážou vždy pohlcovat nežádoucí části spektra. Pro splnění funkce totiž musí být užitečný signál větší, než součet všech zbývajících nežádoucích signálů z ostatních částí spektra. Ty, v některých případech, těmito filtry projdou díky nižším filtračním schopnostem. Pro testování byly použity filtry z Polymethylmetakrylátu Acrylcolor o tloušťce 3 mm v barvách nejbližších odpovídajících požadovaným vlnovým délkám (modrá, zelená, oranžová a červená).

Na obrázku 7.7 je vidět, že v částech, kde se jednotlivé filtry překrývají, může stále procházet část spektra. Už na pohled je tedy jasné, že filtry budou plnit svou funkci pouze částečně. Pokud by se totiž spektra nepřekrývaly, tak by v místech překryvu žádné světlo neprocházelo. Na následujícím grafu (obr. 7.8) jsou znázorněny naměřené průběhy propustností světelného spektra pro jednotlivé filtry. Z průběhů je patrné, že systém bude pravděpodobně fungovat pouze s červeným filtrem. Červený filtr zde totiž jako jediný



Obr. 7.7: Filtry z akrylátového skla.

dostatečně omezil vlnové délky ostatních použitých LED diod (obr. 5.1). U modrého filtru by se taky dalo uvažovat o použitelných vlastnostech, ale můžeme také vidět, že na okraji se již blíží k zelené části spektra (hranice 525 nm). Zelený a žlutý filtr v tomto případě propouští příliš okolního rušení a nedovolí tak signály bezpečně oddělit. Především žlutý filtr totiž funguje pouze jako horní propust a od cca 550 nm propustí žlutou i červenou. Zajímavou částí charakteristik je ale chování těchto filtrů v IR oblasti. Použitý materiál je totiž pro infračervenou oblast téměř transparentní. Pokud by tedy tento materiál byl použit pro konstrukci krytu zařízení, tak by tato vlastnost umožňovala jednoduše schovat IR vysílač do těla přístroje.



Obr. 7.8: Spektrální charakteristiky filtrů z akrylátového skla.

Obrázek 7.9 představuje spektrální vlastnosti jednotlivých filtrů při použití RGBY zdroje záření.

V případě těchto filtrů je vidět (obr. 7.9), že modrý filtr plní svou funkci a úroveň propuštěné části zeleného spektra je zanedbatelná. Zelený filtr už ale na povrch fotode-

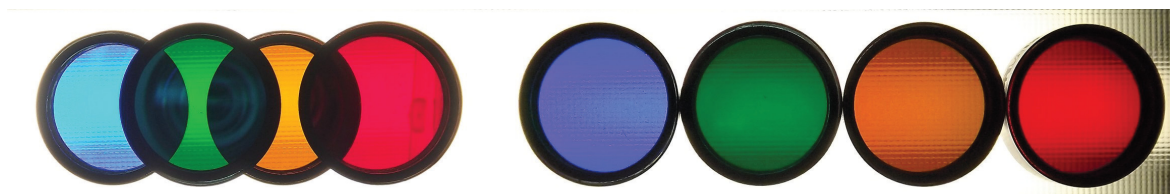


Obr. 7.9: Filtrační vlastnosti akrylátového skla pro RGBY model.

tektoru propustí značné množství energie z modrého kanálu a v omezené míře i malou část žluté a červené. Ve výsledku pak pravděpodobně bude tento kanál fungovat pouze u aplikací, kterým nevadí nižší odstupy signálu od šumu. Žlutý filtr pak, dle předpokladů, propustí spolu se žlutou složkou i červenou, takže tento kanál v tomto případě funkční nebude. Červený filtr je, podobně jako modrý filtr, také v pořádku. Zde prochází přes filtr pouze nepatrná část žluté, která nebude signál výrazně ovlivňovat.

7.3.2 Dielektrické filtry

Pro profesionální aplikace jsou dostupné mnohem preciznější, dielektrikem potahované, filtry od firmy Thorlabs (obr. 7.10). Pro měření na straně fotodetektoru byly zvoleny pásmové propusti, u kterých vlnové délky co nejlépe odpovídaly jednotlivým barvám na vysílací straně (FB590-10, FL532-10, FB650-40 a FB450-40). FWHM jednotlivých filtrů

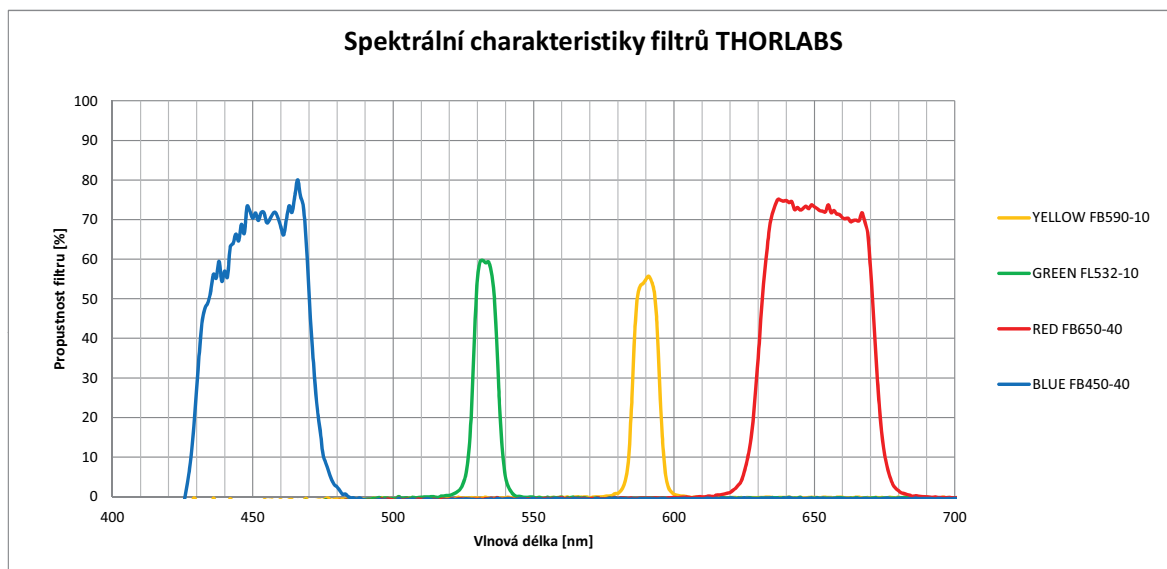


Obr. 7.10: Dielektrické filtry Thorlabs. (FB590-10, FL532-10, FB650-40 a FB450-40).

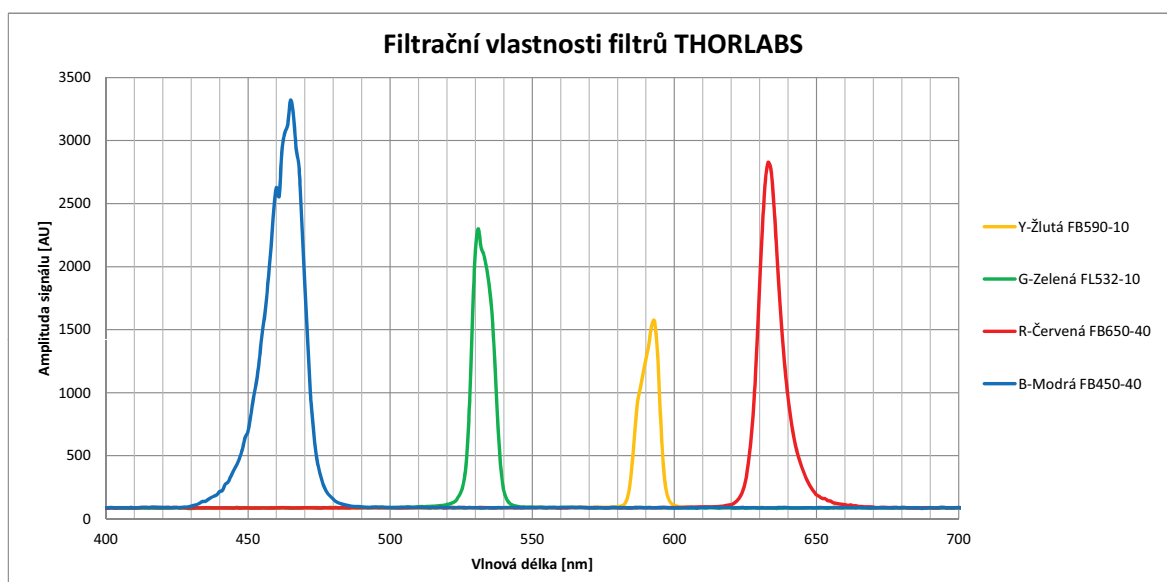
byla volena co možná nejširší, aby došlo k přenosu co největší části energie. Naneštěstí na daných vlnových délkách nebyly vždy požadované šířky spektrálních čar k dispozici, takže v případě žluté a zelené byly zvoleny filtry s hodnotou FWHM pouze 10 nm. V tomto

případě tak dojde k omezení výkonu, které by však mělo být částečně kompenzováno spektrálními charakteristikami použité fotodiody (BPW 21).

Již při pouhém náhledu na chování těchto filtrů je vidět, že se jednotlivá spektra nijak nepřekrývají, protože na hranici, kde se filtry překryjí, neprochází světlo. Toto chování potvrzují i naměřené spektrální charakteristiky, které můžeme vidět na obrázku 7.11.



Obr. 7.11: Spektrální charakteristiky filtrů Thorlabs.



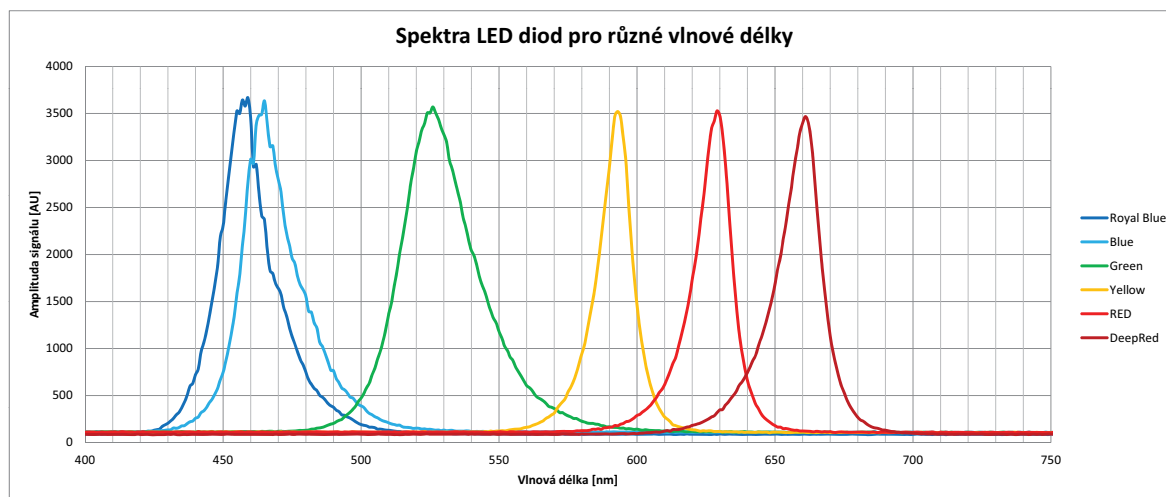
Obr. 7.12: Filtreační vlastnosti filtrů THORLABS pro model RGBY.

Pokud jde o filtrační vlastnosti těchto filtrů (obr. 7.12), tak nyní jsou všechny kanály správně filtrovány a jednotlivými filtry tak prochází pouze požadované vlnové délky. V případě žlutého filtru FB590-10 se naneštěstí projevuje drobný nesoulad mezi vlnovou

délkou filtru s maximem mezi 585–595 nm a vlnovou délkou žluté LED s maximem v 593 nm. Při tak úzkém FWHM sice filtr propustí většinu užitečného výkonu, ale v tomto případě by bylo ideální mít raději filtr s rozsahem kolem 20 nm. Pro případy vytváření teplejších odstínů pomocí dalších žlutých LED ale výkon naroste, takže problém platí pouze pro teploty barev kolem 6000 K. V případě zelené barvy je sice problém s 10 nm šířkou filtru také, nicméně zelená LED má spektrum mnohem širší, takže má stále dostatek energie i v okrajových částech.

U modrého a červeného filtru je vidět, že okraje propouštěného spektra také viditelně zasahují do signálu, protože i zde se centrální vlnové délky LED nalézají na okrajích filtrovaného pásma. Nicméně i přesto vykazují, díky větší šířce spektra, lepších parametrů na výstupu.

Výběr těchto filtrů byl ovlivněn také uvažovanou konstrukcí RGBY systému s modrou a červenou LED na vnějších okrajích viditelného spektra (modrá 440 nm a červená 660 nm). V rámci experimentů tak bylo možné jednotlivé LED lépe spektrálně oddělit a pro měření stále bylo možno použít stejné filtry. Nutnost lepšího oddělení spekter se ale při měřeních neukázala jako nezbytná (obr. 7.13), takže konstrukce mohla zůstat s běžně dostupnými LED diodami na společném čipu. Při měření se rovněž ukázalo, že avizovaná hodnota 440 nm se ve skutečnosti pohybovala pouze kolem 457 nm. Takže k nijak výraznému posunu, oproti používané LED s 465 nm, v tomto případě nedošlo. S posunutím červené na 660 nm se ale v podstatě otevřel prostor pro další použitelný kanál, protože se s použitou LED (630 nm) spektra překrývaly pouze minimálně. Spektra jednotlivých LED diod, které byly při experimentech použity, jsou pro ukázkou znázorněny na následujícím obrázku.



Obr. 7.13: Spektra LED diod měřených pro možnost použití v RGBY modelu.

7.3.3 Podmínky nerušené komunikace

Nerušená komunikace bude záviset na vysílací i přijímací části systému.

- Vysílací část - nesmí docházet k překrývání komunikačních spekter jednotlivých LED diod.
- Přijímací část - jednotlivé vlnové délky musí být správně filtrovány.

Pro fungující systém jsou nezbytné kvalitní filtry, které před fotodetektozem bezpečně oddělí signály z jednotlivých LED diod. Filtry zároveň slouží k tomu, že omezují šum z okolního osvětlení, protože absorbují nejen ostatní komunikační kanály, ale i nepotřebné světlo z okolí. Fotodetektor tak není tolik přetěžován okolním osvětlením a lépe se tak vyhneme jeho saturaci (např. na přímém slunečním světle).

Navzdory tomu, že použité filtry fungovaly, tak díky svým parametrům systém limitovaly, protože zbytečně pohlcovaly i část užitečného výkonu. Pro případné využití tohoto systému se ukazuje potřeba lepšího využití komunikačního výkonu. Šířky spekter jednotlivých filtrů jsou ideální na hodnotách 40 nm, protože pokryjí většinu signálových částí a vzájemně se nebudou překrývat.

Centrální vlnové délky pro ideální využití systému pak jsou:

- 470 nm (FWHM 40 nm: 450 - 490 nm).
- 530 nm (FWHM 40 nm: 510 - 550 nm).
- 590 nm (FWHM 40 nm: 570 - 610 nm).
- 640 nm (FWHM 40 nm: 620 - 660 nm).

Nabídka skladových zásob výrobců je ale v dnešní době naneštěstí omezena, takže v tomto případě by v podstatě šlo o zakázkovou výrobu.

7.4 Komunikační vzdálenosti

V aktuálním případě systém sice potvrdil svou funkčnost a použitelnost, nicméně díky méně ideálním nastavením filtrů jsou hodnoty výkonů přijímané fotodetektozem nižší. Tím došlo k omezení komunikačních vzdáleností. Toto zjištění vede k otázce, jak vlastně tento systém vnímá samotná fotodiody na obvodech fotodetektoru.

7.4.1 Napěťové úrovně na fotodetektoru

Z principu konstrukce se citlivost fotodiody mění s vlnovou délkou a úroveň signálu tak nemusí nutně odpovídat výsledkům laboratorních měření na spektrometru.

V první fázi experimentu je použit fotodetektor THORLABS PDA36A-EC s nastavitelným zesílením a pracovními vlnovými délkami 350–1100 nm. Před něj byly postupně vkládány jednotlivé filtry a poté se měřily výstupní úrovně napětí, tedy signál, který bude v reálném případě nutno zpracovávat. V následující tabulce jsou uvedeny naměřené hodnoty pro jednotlivé LED bez filtrů a s odpovídajícími filtry.

Tab. 7.1: Naměřené hodnoty z fotodetektoru PDA36A-EC.

Amplituda signálu [mV]	Modrá (filtr FB450-40)	Zelená (filtr FL532-10)	Žlutá (filtr FB590-10)	Červená (filtr FB650-40)
Bez filtru	156	146	100	258
S filtrem	68	14	14	68

Z naměřených hodnot je patrné, jak velkou část signálu po průchodech jednotlivými filtry ztratíme. Použití filtrů s FWHM 40 nm je tedy pro praktické využití nezbytné. Zajímavé jsou i hodnoty u jednotlivých filtrů, protože naměřené hodnoty se v tomto případě zdají závislé spíše na FWHM, než na výkonech jednotlivých LED.

V případě fotodiody BPW21 použité při konstrukci přijímače se napěťové úrovně na výstupu prvního zesilovacího stupně mírně lišily. BPW21 má totiž upravenou charakteristiku pro viditelné spektrum, takže na rozdíl od klasické křemíkové fotodiody lépe reaguje na modrou část spektra. V červené části spektra je ale umístěn filtr, který pro přizpůsobení k citlivosti lidského oka omezuje červenou část spektra a IR část pak nepropouští vůbec.

Tab. 7.2: Naměřené hodnoty z fotodiody BPW21.

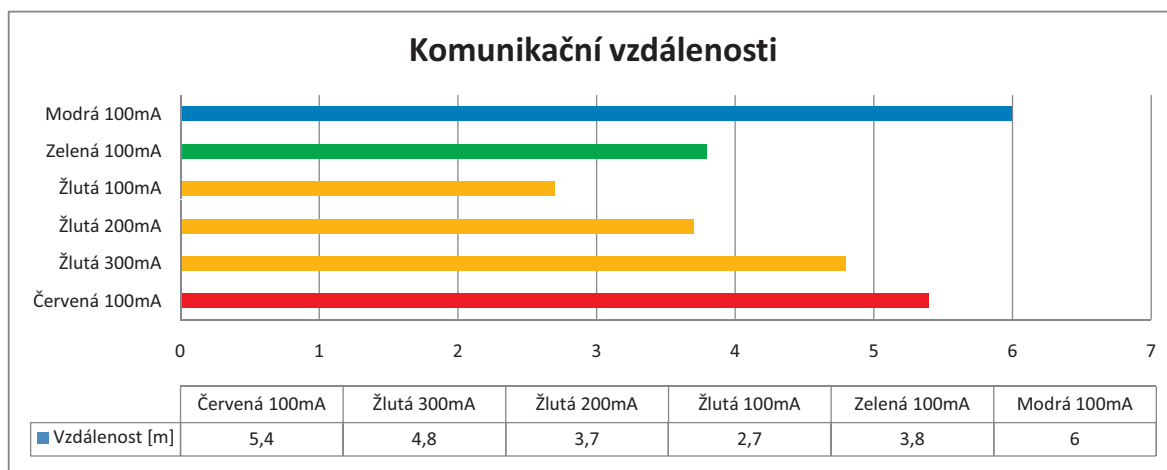
Amplituda signálu [mV]	Modrá (filtr FB450-40)	Zelená (filtr FL532-10)	Žlutá (filtr FB590-10)	Červená (filtr FB650-40)
Bez filtru	1430	1120	600	1120
S filtrem	800	280	200	400

V případě žluté je pravděpodobné, že bude v rámci svítidla nastavena minimálně na 200 % výkonu. Tím bude dosaženo barevných teplot kolem 4400 K, což je v dnešní době pro uživatele příjemnější teplota oproti 6000 K. Úrovně pro žlutou se tak zvýší a i přes užší FWHM žlutého filtru se úrovně jednotlivých barev více vyrovnají. Pro zelenou barvu ale nezbyvá nic jiného, než použití vhodnějšího filtru, protože hodnoty na výstupu ze svítidla jsou v pořádku a zvyšováním výkonu bychom ztratili bílou.

7.4.2 Komunikační vzdálenosti

Protože filtry pohlcují značnou část komunikačního výkonu, tato ztráta se logicky projeví i na komunikační vzdálenosti. Omezujícím faktorem pro dostupnost všech 4 kanálů bude vzdálenost pro barvu s nejslabší intenzitou. Pro pokrytí prostoru je také třeba vzít v úvahu, že závislost vzdálenosti a výkonu jde s druhou mocninou, takže pro zdvojnásobení dosahu je potřeba zvýšit výkon na čtyřnásobek.

Nejkratší vzdálenost při budících proudech 100 mA byla 2,7 m. Což je vzdálenost, která snadno pokryje například pokoj v rodinném domku. Přidáváním výkonu pro úpravu na teplejší barvy se vzdálenost pro žlutou barvu postupně zvyšuje až na 4,8 metru při výkonu pod 1W. Tyto hodnoty jsou platné pro systém dle popisovaného zapojení a pro

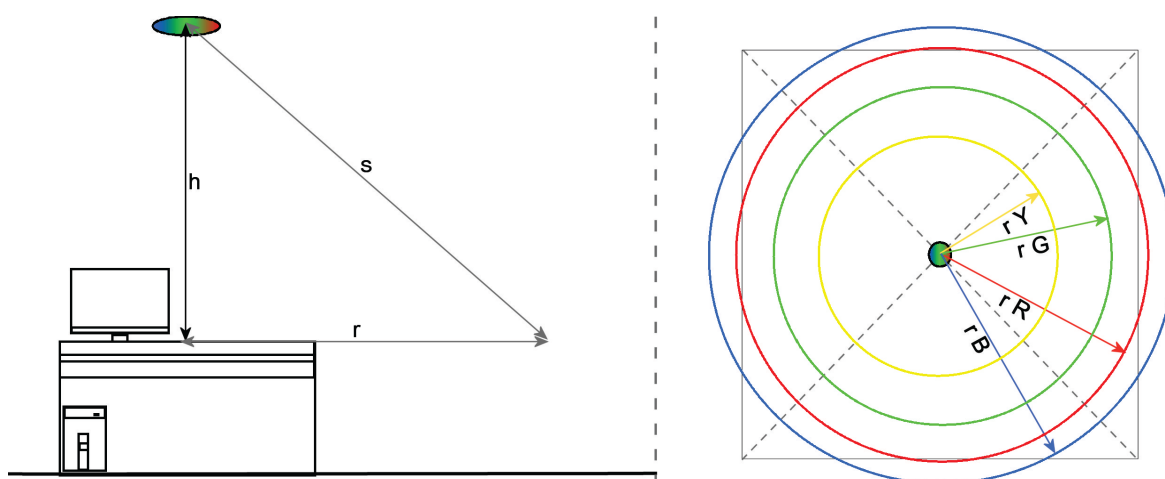


Obr. 7.14: Vyhodnocení komunikačních vzdáleností pro jednotlivé filtry Thorlabs.

vyšší frekvence budou dosahované vzdálenosti nižší a bude tak potřeba zvyšovat vysílací výkon.

S ohledem na geometrii většiny místností (obr. 7.15) lze spočítat, jaký prostor jsou odpovídající LED diody schopny pokrýt. Za předpokladu, že svítidlo určené pro komunikaci je umístěno na stropě uprostřed místnosti a přijímač bude umístěn v určité výšce h nad podlahou. Komunikační vzdálenost s tak vytvoří přeponu pravoúhlého trojúhelníku a pro výpočet tak můžeme použít Pythagorovu větu. Vypočtená vzdálenost r pak bude představovat poloměr kruhu, ve kterém se může přijímač pohybovat.

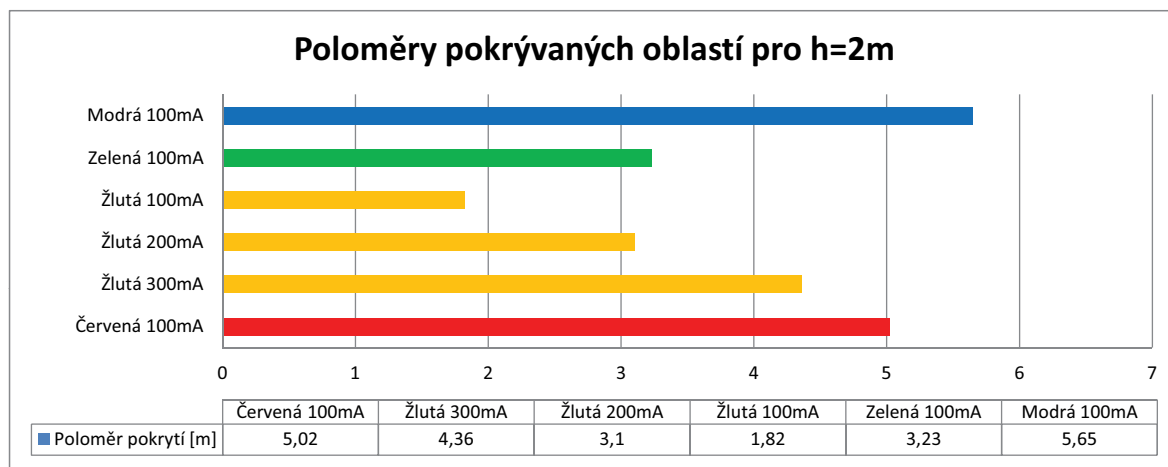
$$r = \sqrt{s^2 - h^2}. \quad (7.2)$$



Obr. 7.15: Geometrie komunikační vzdálenosti a pokrytého prostoru.

Při vzdálenosti mezi svítidlem a deskou pracovního stolu $h = 2$ metry a zdrojem signálu shodným z obrázku 7.14, budou poloměry kruhů vymežující komunikační prostor

odpovídat hodnotám z následujícího grafu 7.16.



Obr. 7.16: Poloměry pokrývaných oblastí pro RGBY LED.

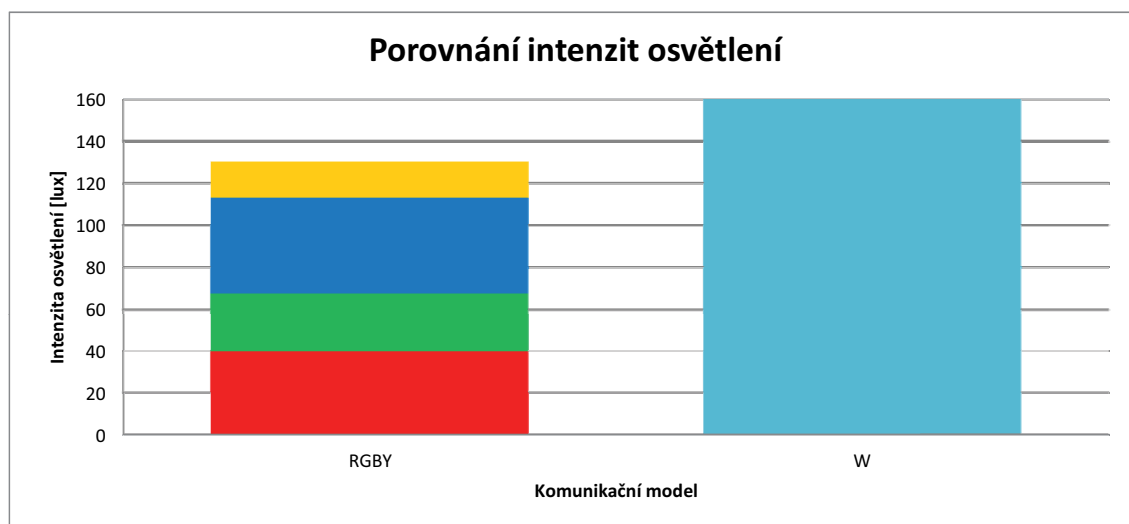
7.4.3 Výkonová bilance

Výše uváděné výsledky pro RGBY LED čip byly většinou při pracovních proudech kolem 100 mA na každý jednotlivý čip. Při plných výkonech na proudech 500 mA/čip, pokrýval signál používané laboratoře tak, že pro detekci signálu stačily i pouhé odrazy od zdí. Při nižších proudech tak byly vlastnosti systému lépe pozorovatelné. Při plném výkonu se vzdálenosti z obrázku 7.14, oproti hodnotám na 100 mA, zdvojnásobily. Poloměry pokrývaných oblastí s jedinou 8 W RGBY LED tak začínaly na 5 metrech pro žlutou a končily za hranicí 10 metrů pro modrou. V případě přidání dalšího žlutého čipu se pak minimální hranice posunula z 5 metrů na cca 6,5 metru. Pro pokrytí běžné místnosti tak v tomto případě teoreticky postačí jediný vysílač. Pokud by namísto používaných filtrů byly použity výše popisované filtry s lepším přizpůsobením pracovním vlnovým délkám (470, 530, 590 a 640 nm při FWHM 40 nm), tak by se teoreticky měly komunikační vzdálenosti zvětšit a více vzájemně přiblížit.

Druhým bodem týkajícím se výkonu je účinnost RGBY modelu v porovnání s bílou LED diodou. Oproti použití bílé LED jako jediného kanálu jsou detekované výkony u RGBY modelu čtvrtinové. Komunikační vzdálenost by tak v porovnání s jednou bílou LED měla být poloviční. Pro nižší frekvence navíc nepotřebujeme používat filtry, protože například filtr u BPW21 je pro viditelné spektrum dostatečný. Přijímaný výkon s použitím pouze bílé LED tak bude ještě vyšší. Současně ale vzroste i okolní rušení v podobě šumů z okolního osvětlení a přetěžování obvodů fotodetektoru. Získaný výkon je tak využitelný spíše pro zvyšování přenosové rychlosti.

Posledním bodem ohledně výkonu je porovnání intenzity osvětlení při použití RGBY a bílé LED. Účinnosti dnešních bílých LED diod se totiž pohybují za hranicí kolem

100 lm/W. Což je hodnota, které dle informací od výrobce u RGBY modelu nedosáhneme. Otázkou tedy je, zda jsme opravdu schopni nahradit stávající osvětlení. Při porovnání výsledných intenzit osvětlení pro oba systémy (obr. 7.17), je vidět, že intenzita osvětlení u bílé LED opravdu dosahuje vyšších hodnot. Navzdory předpokladům ale není rozdíl nijak velký, takže obavy z malé účinnosti RGBY systému pro potřeby osvětlování se nepotvrdily. Při použití účinnějšího čipu pro žlutou barvu by se měly rozdíly snížit na minimum.



Obr. 7.17: Porovnání intenzit osvětlení pro RGBY a bílou LED (W).

8 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo vytvoření VLC vysílače s použitím RGBY barevného modelu, který tak bude schopen komunikovat na několika vlnových délkách současně a přitom si zachová osvětlovací funkci. A to od vyřešení způsobu konstrukce vysílače/svítidla tak, aby výstupní světlo odpovídalo bílé barvě, až po ověření možnosti oddělit jednotlivé komunikační kanály na straně přijímače a otestování výsledných vlastností.

První část se zabývá teoretickým úvodem do problematiky bezvláknových optických systémů, jako jsou způsoby pokrytí prostoru, přehled aktuálních způsobů řešení bezvláknových optických systémů, standardem IEEE 802.15.7 a okrajově také vlivem atmosféry jakožto přenosového média. Následuje část pokrývající součástkovou základnu systému, která popisuje problematiku zdrojů optického záření a také fotodetektorů potřebných pro jeho detekci. Třetí část se zabývá popisem navrhovaného RGBY systému z teoretického hlediska, srovnáním s ostatními VLC systémy a také porovnáním předpokládaných spolehlivostí systému, protože navrhovaný systém v podstatě kombinuje větší počet vysílačů v jednom zařízení a to bude mít logicky vliv i na bezporuchovost systému. Poté následuje část úvodních měření a simulací pokrytí prostoru. Konstrukční část se věnuje vytvoření bílé barvy při různých způsobech konstrukce vysílače/svítidla a testovací elektronice. Poslední část se pak zabývá ověřením nerušené komunikace na jednotlivých vlnových délkách a dosaženými komunikačními vzdálenostmi.

Navržený systém je plně funkční jak z pohledu osvětlování, tak z pohledu komunikace. Pokud jde o pokrytí prostoru, tak při testovacích přenosových rychlostech byla bez problémů možná i komunikace mimo LOS (bez přímé viditelnosti mezi vysílačem a přijímačem) díky odrazům od stěn a překážek. Zde je ale nutno podotknout, že použité přenosové rychlosti v řádech několika kb/s jsou vhodné spíše pro přenos telemetrie. V případě přenosových rychlostí v řádech Mbit/s je existence LOS nutností, protože pro něj bude potřeba mnohem více energie. Podobně tomu bude i v případě IR komunikace pro přenos dat pro uplink, pro vlnové délky kolem 950 nm je sice okolní rušení minimální, ale výstupní část od případného mobilního zařízení bude z konstrukčního hlediska mnohem více výkonově omezena. Ať už z pohledu napájení, nebo chlazení.

Konstrukce vysílací části byla provedena dvěma způsoby, v první fázi byly jednotlivé LED vzájemně odděleny pro lepší přizpůsobitelnost při testování. V druhé fázi pak byla použita LED dioda, která obsahovala potřebné barvy (RGBY) na společném čipu. Toto řešení se ukázalo jako nejvýhodnější, protože vytvořené bílé světlo je, při použití difuzoru, lidským okem doslova nerozeznatelné od "klasických" bílých LED. Jedinou nevýhodou byla v tomto případě nízká účinnost žluté LED, která byla v rámci společného čipu použita. V reálném případě totiž bude nejjednodušší variantou nechat svítit všechny LED na maximální výkon. Účinnost žluté LED byla ale v tomto případě zhruba poloviční, takže bez kompenzace byly naměřené výsledky stále ve studených odstínech kolem 6000 K. Oproti RGB konstrukci byla sice barva mnohem příjemnější, nicméně po kompenzaci

výkonu na žlutém kanálu došlo k posunu teplot na hodnoty kolem 4400 K. Při tomto měření se ukázalo, že barevnou teplotu lze jednoduše nastavovat tak, že při konstantních hodnotách RGB části pouze měníme výkon v části Y. Toto zjištění bezpochyby přispívá k většímu potenciálu systému, protože zjednodušuje případný výrobní proces a odstraňuje potřebu zdlouhavého "ladění".

Přijímací část systému závisí z velké části na filtrech, které mají za úkol rozdělit jednotlivé barevné složky zpět k fotodetektorům. Bez pečlivého rozdělení na jednotlivé části spektra bude systém nepoužitelný. Poslední a překvapivě nejdůležitější částí systému, kterou je fotodetektor. Upravovat komunikační vzdálenost zvyšováním výstupního výkonu LED je totiž velmi nevhodné a rychle při něm narazíme na omezení, protože pro každé zdvojnásobení vzdálenosti musíme zvýšit výkon čtyřnásobně. Parametry systému tak vždy závisí hlavně na citlivosti a rychlosti fotodetektoru, což platí všeobecně pro všechny druhy bezvláknových, ale i vláknových optických komunikačních systémů.

LITERATURA

- [1] ČTU. *vyhláška o přidělování kmitočtových pásem 105-2010 sb038-10* [online]. 2010. Dostupné z: http://www.ctu.cz/cs/download/kmitoctova_tabulka/vyhlaska_105-2010_sb038-10.pdf.
- [2] IEEE 802.15.7. *Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light*. New York, USA: IEEE Computer Society, 2011. Dostupné z: <https://standards.ieee.org/develop/project/802.15.7.html>.
- [3] VAVOULAS, A., H. G. SANDALIDIS, T. A. TSIFTSIS a N. VAIPOULOS. Coverage Aspects of Indoor VLC Networks. *Journal of Lightwave Technology*. 2015, roč. 33, č. 23, s. 4915–4921. ISSN 0733-8724. DOI: 10.1109/JLT.2015.2492420.
- [4] WANG, J. Y., N. Y. ZOU, D. WANG, K. IRIE, Z. IHA a Y. NAMIHIRA. Experimental study on visible light communication based on LED. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*. 2012, s. 197–200. ISSN 1005-8885. DOI: 10.1016/S1005-8885(11)60422-6.
- [5] GRUBOR, J., S. C. J. LEE, K. D. LANGER, T. KOONEN a J. W. WALEWSKI. Wireless High-Speed Data Transmission with Phosphorescent White-Light LEDs. *European Conference and exhibition of Optical Communication*. Berlin: 2007, pp. 1-2. ISBN 978-3-8007-3059-9.
- [6] ZENG, L., H. L. MINH, D. O'Brien, G. FAULKNER, K. LEE, D. JUNG a Y. OH. Equalisation for High-Speed Visible Light Communications using White-LEDs. *6th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing*. 2008, pp. 170–173. DOI: 10.1109/CSNDSP.2008.4610760.
- [7] ZHAN, Z., M. ZHANG, D. HAN, P. LUO, X. TANG, Z. GHASSEMLOOY a L. LANG. 1.2 Gbps non-imaging MIMO-OFDM scheme based VLC over indoor lighting LED arrangements. *Opto-Electronics and Communications Conference (OECC)*. 2015, pp. 1–3. DOI: 10.1109/OECC.2015.7340270.
- [8] PISEK, E., S. RAJAGOPAL a S. ABU-SURRA. Gigabit rate mobile connectivity through visible light communication. *(ICC), 2012 IEEE International Conference on Communications*. Ottawa: 2012, s. 3122-3127. ISBN 978-1-4577-2052-9. DOI: 10.1109/ICC.2012.6363739.
- [9] ELGALA, H., R. MESLEH a H. HAAS. Predistortion in Optical Wireless Transmission using OFDM. *International Conference on Hybrid Intelligent Systems*. Shenyang: IEEE, 2009, s. 184–189. ISBN 978-0-7695-3745-0. DOI: 10.1109/HIS.2009.321.
- [10] HUANG, X., Z. WANG, J. SHI, Y. WANG a N. CHI. 1.6 Gbit/s phosphorescent white LED based VLC transmission using a cascaded pre-equalization circuit and a differential outputs PIN receiver. *Optics Express*. 2015, roč. 23, č. 17, s. 1–9. DOI:10.1364/OE.23.022034.

-
- [11] DAS, A. K., A. GHOSH, A. M. VIRBIN a S. PRINCE. Underwater communication system for deep sea divers using visible light. *Photonics global conference*. 2012, s. 1—3. DOI: 10.1109/PGC.2012.6458054.
- [12] GFELLER, F. R. a U. BAPST. Wireless in-House Data Communication via Diffuse Infrared Radiation. *IEEE*. 1979, r. 67, č. 11, s. 1474-1486. ISSN 0018-9219.
- [13] RAMIREZ-INIGUEZ, R., S. M. IDRUS a Z. SUN. Optical wireless communications: IR for wireless connectivity. New York : CRCPress, 2007. ISBN 0-8493-7209-7.
- [14] RAJBHANDARI, S., Z. GHASSEMLOOY, J. PEREZ, H. LE-MINH, M. IJAZ, E. LEITGEB, G. KANDUS a V. KVICERA, V. On the study of the FSO link performance under controlled turbulence and fog atmospheric conditions. (*ConTEL*), *11th International Conference on Telecommunications*. 2011, s. 223–226.
- [15] PEREZ, J., Z. GHASSEMLOOY, S. RAJBHANDARI, M. IJAZ a H. L. MINH. Ethernet FSO Communications Link Performance Study Under a Controlled Fog Environment. *Communications Letters*. IEEE, 2012. vol. 16, no. 3, s. 408—410. DOI: 10.1109/LCOMM.2012.012412.112072.
- [16] MIHAESCU, A. a P. BESNARD. Indoor wireless optical communications. (*COMM*), *2010 8th International Conference on Communications*. Bucharest: 2010, s. 359–362. ISBN 978-1-4244-6360-2. DOI: 10.1109/ICCOMM.2010.5509017.
- [17] AKELLA, J., C. LIU, D. PARTYKA, M. YUKSEL, S. KALYANARAMAN a P. DUTTA. Building Blocks for Mobile Free-Space-Optical Networks. *International Conference on Wireless and Optical Communications Networks*. Dubai: 2005, s. 164–168. ISBN 0-7803-9019-9. DOI: 10.1109/WOCN.2005.1436011.
- [18] VITASEK, J., P. KOUDELKA, J. LATAL, F. DOSTAL a K. SOKANSKY. Indoor optical free space networks - reflectivity of light on building materials. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2011, vol. 87, iss. 4, s. 41–44. ISSN 0033-2097.
- [19] TANG, J. L., a Y. W. CHANG. Design of an Omnidirectional Multibeam Transmitter for High-Speed Indoor Wireless Communication. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. 2010. DOI: 10.1155/2010/728468.
- [20] BURTON, A. H. L. MINH, Z. GHASSEMLOOY a S. RAJBHANDARI. A study of LED lumination uniformity with mobility for visible light communications. (*IWOW*), *2012 International Workshop on Optical Wireless Communication*. 2012. s. 1—3. DOI: 10.1109/IWOW.2012.6349686.
- [21] JUNGNICHEL, V., V. POHL, S. NOENNING a C. von HELMOLT. A physical model of the wireless infrared communication channel. *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*. 2002. s. 631—640. ISSN 0733-8716. DOI: 10.1109/49.995522.

- [22] LUCACIU, R., A. MIHAESCU a C. VLADANU. Dynamic OCDMA coding for indoor wireless optical communications. (*COMM*), *2010 8th International Conference on Communications*. Bucharest: 2010. s. 347–350. ISBN 978-1-4244-6360-2. DOI: 10.1109/ICCOMM.2010.5509009.
- [23] BATES, R. J., M. SEBIRE a G. SEBIRE. *GSM/Edge: evolution and performance*. Hoboken, N. J.: Wiley, 2010. ISBN 978-0-470-74685-1.
- [24] SESIA, S., I. TOUFIK a M. BAKER. *LTE—the UMTS long term evolution: from theory to practice*. Hoboken, N. J.: Wiley, 2011. ISBN 978-0-470-66025-6.
- [25] IEEE STANDARD ASSOCIATION. *IEEE 802.11: WIRELESS LOCAL AREA NETWORKS* [online]. 2012. Dostupné z: <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.11.html>.
- [26] IEEE STANDARD ASSOCIATION. *IEEE 802.11: WIRELESS LOCAL AREA NETWORKS* [online]. 2012. Dostupné z: <http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.15.1-2005.html>.
- [27] WIKIPEDIA. *Světlo - Barva a vlnová délka*. [online]. 2017. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Světlo#/media/File:Srgbspectrum.png>.
- [28] WIKIPEDIA. *Fotofon*. [online]. 2015. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Fotofon>.
- [29] PANG, G., T. KWAN, H. LIU a C.-H. CHAN. Optical wireless based on high brightness visible LEDs. *IAS Industry Applications Conference*. 1999, IEEE. s. 1693–1699. ISBN 0-7803-5589-X. DOI: 10.1109/IAS.1999.805968.
- [30] LINER, A., M. PAPES, J. VITASEK, P. KOUDELKA, J. LATAL, J. CUBIK a V. VASINEK. The optical power distribution in a dark room. In: *Czech-Polish-Slovak Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics*. Ostrava: SPIE, 2012, č. 8697. ISBN 978-081949481-8. DOI: 10.1117/12.2003929.
- [31] YANG, S. H., H. S. KIM, Y. H. SON a S. K. HAN. Reduction of optical Interference by Wavelength Filtering in RGB-LED Based Indoor VLC System. *16th Opto-Electronics and Communications Conference*. Kaoshiung: 2011, IEEE. ISBN: 978-986-02-8974-9.
- [32] CIE (1932). *Commission internationale de l'Eclairage proceedings*. 1931. Cambridge: Cambridge University Press.
- [33] WU, Z. a T. LITTLE. Network solutions for the LOS problem of new indoor free space optical system. *7th International Symposium on Communication Systems Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)*. 2010. s. 582–587.
- [34] LITTLE, T. D. C., P. DIB, K. SHAH, N. BARRAFORD a B. GALLAGHER. Using LED Lighting for Ubiquitous Indoor Wireless Networking. *4th IEEE International*

- Conference on Wireless & Mobile Computing, Networking and Communication*. Avignon: 2008, s. 373–378. ISBN 978-0-7695-3393-3. DOI: 10.1109/WiMob.2008.57.
- [35] VROŽINA, M. a J. DAVID. *Spolehlivost a diagnostika*. 2010. VŠB-TU Ostrava. ISBN: 978-80-248-2595-3.
- [36] WANG, Y., X. WU a H. HAAS. Fuzzy logic based dynamic handover scheme for indoor Li-Fi and RF hybrid network. *IEEE International Conference on Communications (ICC)*. 2016. S. 1–6. ISBN: 978-1-4799-6664-6. DOI: 10.1109/ICC.2016.7510823.
- [37] CHEN, Z., D. A. BASNAYAKA a H. HAAS. Space division multiple access in optical attocell networks. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. 2016. S. 1–5. ISBN: 978-1-4673-9814-5. DOI: 10.1109/WCNC.2016.7564675.
- [38] pureLiFi. 2017. Dostupné z: <http://purelifi.com/lifi-products/>.
- [39] TAKAI, I., T. HARADA, M. ANDOH, K. YASUTOMI, K. KAGAWA a S. KAWAHITO. Optical Vehicle-to-Vehicle Communication System Using LED Transmitter and Camera Receiver. *IEEE Photonics Journal*. 2014. s. 1–14. ISSN 1943-0655. DOI: 10.1109/jphot.2014.2352620.
- [40] CHEN, J., S. H. LEE a S. H. HWANG. Adaptive data rate transmission for V2I communication. *International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*. 2016. s. 244–246. ISBN: 978-1-5090-1325-8. DOI: 10.1109/ICTC.2016.7763477.
- [41] ZHANG, W., M. I. S. CHOWDHURY a M. KAVEHRAD. Asynchronous indoor positioning system based on visible light communications. *Optical Engineering*. 2014. DOI:10.1117/1.OE.53.4.045105.
- [42] IEEE STANDARD ASSOCIATION. *IEEE 802.15: WIRELESS PERSONAL AREA NETWORKS* [online]. 2012. Dostupné z: <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.15.html>.
- [43] ROBERTS, R. D., S. RAJAGOPAL a S. K. LIM. IEEE 802.15.7 physical layer summary. *GLOBECOM Workshops*. 2011, IEEE. s.772–776. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2011.6162558.
- [44] WILFERT, O. *Fotonika a optické komunikace*. Brno: MJ servis spol. s. r. o, 2007. ISBN 978-80-214-3537-7.
- [45] DONATI, S. *Photodetectors: Devices, Circuits and Applications*. New Jersey: Prentice-Hall, 2000. ISBN: 0-13-020337-8.
- [46] SCHUBERT, E. F. *Light-Emitting Diodes*. Cambridge university press, 2003, ISBN 0-521-53351-1.
- [47] KAHN, J. M. a J. R. BARRY. *Wireless Infrared Communications. Proceedings of the IEEE*. 1997, roč. 85, č. 2, s. 265–298. ISSN 0018-9219. DOI: 10.1109/5.554222.

- [48] HAO, N., M. ZHANG a Y. ZHANG. An OOK based visible light communication system for short distance. *7th International ICST Conference on Communications and Networking in China*. 2012. ISBN: 978-1-4673-2699-5. DOI: 10.1109/ChinaCom.2012.6417496.
- [49] Weibull.com. *Bellcore/Telcordia Reliability Prediction in Lambda Predict* [online]. 2017. Dostupné z: <http://www.weibull.com/hotwire/issue152/hottopics152.htm>.
- [50] MEAN WELL *LPC-20 series, datasheet* [online]. 2015. Dostupné z: <http://www.meanwell.com/productPdf.aspx?i=205>.
- [51] Cree LED Components *IES LM-80-2008 Testing Results* [online]. 2016. Dostupné z: http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED%20Components%20and%20Modules/XLamp/XLamp%20Application%20Notes/LM80_Results.pdf.
- [52] RADIOMETRIX *CTR124, datasheet* [online]. 2016. Dostupné z: <http://www.radiometrix.com/files/additional/ctr124.pdf>.

Vlastní publikace související s tématem disertační práce

- [53] VITASEK, J., J. LATAL, S. HEJDUK, J. BOCHEZA, P. KOUDELKA, P. SISKÁ, J. SKAPA a V. VASINEK, V., Fog attenuation influence on Bit Error Ratio of Free Space Optics link. In: *Knowledge in Telecommunication Technologies and Optics*. 2011. 1st edition. Ostrava: VSB-Technical University of Ostrava.
- [54] HEJDUK, S., V. VASINEK, J. BOCHEZA, J., VITASEK, J., LATAL a A. GANIYEV. Noise analysis of dark rooms and their evaluation. In: *Knowledge in Telecommunication Technologies and Optics*. 2011. Ostrava: VSB-TU Ostrava.
- [55] HEJDUK, S. J. BOCHEZA a J. VITASEK. Mobile FSO Remote Controlled Model. In: *WOFEX 2011: PhD Workshop*. Ostrava : VSB-Technical University of Ostrava, 2011. s. 614–618. ISBN 978-80-248-2449-9.
- [56] VITASEK, J., J. LATAL, S. HEJDUK, J. BOCHEZA, P. KOUDELKA, J. SKAPA, P. SISKÁ a V. VASINEK. Atmospheric turbulences in Free Space Optics channel. In: *TSP 2011: Proceedings*. Budapešť: IEEE, 2011. s. 104–107. ISBN 978-1-4577-1409-2. DOI: 10.1109/TSP.2011.6043763.
- [57] VITASEK, J., S. HEJDUK, J. BOCHEZA a A. GANIYEV. Modulations in Free Space Optical Links. In: *13th International Conference on Research in Telecommunication Technologies*. 2011. Těchov: Brno University of Technology, s. 60–62. ISBN 978-80-214-4283-2.
- [58] HEJDUK, S. J. BOCHEZA, J. VITASEK a K. WITAS. Comparison of communication via IR and visible light spectrum in mobile indoor FSO networks. In: *WOFEX*

- 2012: *PhD Workshop*. Ostrava: VSB-TU Ostrava, 2012. s. 476–481. ISBN 978-80-248-2769-8.
- [59] VITASEK, J., J. LATAL, V. VASINEK, S. HEJDUK, A. LINER, M. PAPES, P. KOUDELKA a A. GANIYEV. The fog influence on bit error ratio, In: *Proc. SPIE. 8697, 18th Czech-Polish-Slovak Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics 86970L*. 2012. DOI: 10.1117/12.2001748.
- [60] VASINEK, V., J. LATAL, P. KOUDELKA, J. VITASEK, K. WITAS a S. HEJDUK. Simulation of fog influence on laser beam distribution in atmosphere. In: *Proc. SPIE. 8540, Unmanned/Unattended Sensors and Sensor Networks IX 85400Y*. 2012. DOI: 10.1117/12.977617.
- [61] WITAS, K., S. HEJDUK, V. VASINEK, J. VITASEK a J. LATAL. Low noise omnidirectional optical receiver for mobile FSO network. In: *Proc. SPIE. 8774, Optical Sensors 2013 87741Q*. 2003. DOI: 10.1117/12.2017086.
- [62] HEJDUK, S., J. BOCHEZA, K. WITAS a A. GANIYEV. Visible Light Communication with Four Wavelengths Division Access. In: *WOFEX 2013: PhD Workshop*. Ostrava: VSB-Technical University of Ostrava, 2013. s. 409–415. ISBN 978-80-248-3073-5.
- [63] HEJDUK, S., K. WITAS, J. LATAL, J. VITASEK, J. BOCHEZA a V. VASINEK. Simple and Universal Current Modulator Circuit for Indoor Mobile Free-Space-Optical Communications Testing. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 2014. Vol. 12, No. 1. pp. 66-74. ISSN 1804-3119. DOI: 10.15598/aeec.v12i1.845.
- [64] VITASEK, J., E. LEIGEB, T. DAVID, J. LATAL a S. HEJDUK. Misalignment loss of Free Space Optic link. *16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. 2014. s. 1–5. ISBN: 978-1-4799-5601-2. DOI: 10.1109/ICTON.2014.6876494.
- [65] HEJDUK, S., K. WITAS, J. LATAL, J. VITASEK a J. BOCHEZA. Use of the RGBY Model for Indoor Mobile Visible Light Communication. *16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. 2014. s. 1–4. ISBN: 978-1-4799-5601-2. DOI: 10.1109/ICTON.2014.6876490.
- [66] 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. *SPIE 9450, Photonics, Devices and Systems*. 2015. DOI: 10.1117/12.2073495.
- [67] VITASEK, J., J. LATAL, M. BOJKO, A. VANDERKA, L. HAJEK a S. HEJDUK. Measurement and modelling of thermal turbulence effects on FSO optical beams. *18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. 2016. s. 1–4. ISBN: 978-1-5090-1467-5. DOI: 10.1109/ICTON.2016.7550484.

- [68] VANDERKA, A., L. HAJEK, J. LATAL, J. VITASEK, S. HEJDUK a V. VASINEK. Testing resistance modulation formats for FSO communication in turbulent environment, with used simulation box. *SPIE 9514 – Laser Communication and Propagation Through the Atmosphere and Oceans*. 2015. DOI: 10.1117/12.2180335.

Vlastní publikace nesouvisející s tématem disertační práce

- [69] LATAL, J., P. KOUDELKA, P. SISKÁ, J. SKAPA, F. HANACEK, V. VASINEK, J. VITASEK, S. HEJDUK a J. BOCHEZA. Fiber-optic DTS system application in the research of accumulation possibilities of thermal energy in the rock mass. In: *Optical Sensors 2011; and Photonic Crystal Fibers V*. 2011, SPIE. DOI: 10.1117/12.887082.
- [70] BOCHEZA, J. S. HEJDUK a J. VITÁSEK. Conducting Polymers - Polyaniline. In: *WOFEX 2011: PhD Workshop*. Ostrava: VSB-Technical University of Ostrava, 2011. s. 603–608. ISBN 978-80-248-2449-9.
- [71] VASINEK, V., J. BOCHEZA, S. HEJDUK, J. LATAL, P. KOUDELKA a J. VITASEK. Polyaniline nanofilms as a base for novel optical sensor structures. In: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2011, vol. 8102. ISBN 978-081948712-4. DOI: 10.1117/12.893085.
- [72] VASINEK, V., J. VITASEK, S. HEJDUK, J. BOCHEZA, J. LATAL a P. KOUDELKA. Interference fiber ring perimeter with FFT analysis. In: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2011, vol. 8186. ISBN 978-081948814-5. DOI: 10.1117/12.898076.
- [73] VITASEK, J., J. LATAL, P. KOUDELKA, V. VASINEK, J. BOCHEZA a S. HEJDUK. Spectral characteristics of fiber couplers for FTTx network. In: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2012, vol. 8436. ISBN 978-081949128-2. DOI: 10.1117/12.922003.
- [74] VITASEK, J., J. LATAL, P. KOUDELKA, V. VASINEK, J. BOCHEZA a S. HEJDUK. Spectral characteristics of fiber couplers for FTTx network. In: *Proc. SPIE. 8436, Optics, Photonics, and Digital Technologies for Multimedia Applications II 843614*. 2012. DOI: 10.1117/12.922003.
- [75] BOCHEZA, J. a S. HEJDUK. Polyaniline – Electrical Resistance. In: *WOFEX 2012: PhD Workshop*. Ostrava: VSB-Technical University of Ostrava, 2012. s. 453–457. ISBN 978-80-248-2769-8.
- [76] LATAL, J., J. VITASEK, P. KOUDELKA, P. SISKÁ, A. LINER, M. PAPES, 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: *Proc. SPIE. 8774, Optical Sensors 2013 877416*. 2013. DOI: 10.1117/12.2017241.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

η	účinnost
λ	vlnová délka
$\lambda(t)$	intenzita poruch [1/hod]
μ	průměrná hodnota Gaussova rozložení
Ω	prostorový úhel
Φ	světelný tok [lm]
ϕ	úhel od normály vyzařovací plochy zdroje optického záření
Ψ	mezní úhel příjmu
ψ	úhel mezi normálou k přijímací oblasti fotodetektoru
σ	citlivost fotodetektoru [A/W]
θ	vyzařovací úhel
A_R	plocha oblasti příjmu fotodiody
BW	šířka pásma
c	rychlost světla
D_d	vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem
e	elementární náboj
E	intenzita osvětlení [lx]
E_g	energie zakázaného pásu PN přechodu
$f(t)$	hustota pravděpodobnosti
$F(t)$	pravděpodobnost poruchy
h	Planckova konstanta
I_0	temný (klidový) proud fotodiody
I_e	zářivost [$W \cdot sr^{-1}$]
i_I^2	kvantový (výstřelový) šum
I_{ph}	fotoproud fotodiody v přijímači
i_R^2	Johnsonův (teplotní) šum
P	výkon
$R(t)$	bezporuchovost
t	čas [s]
V_{th}	prahové napětí
Bias-Tee	napájecí výhybka
BOS	bezláknové optické sítě
CC	konvoluční samoopravný kód
CIE	mezinárodní komise pro osvětlení
COB	technologie Chip-On-Board (více čipů na malé ploše)
CSK	modulační technologie založena na změně optického spektra
DC	stejnoseměrný proud
EDGE	mobilní datová síť 2,75G

FIR	daleké infračervené spektrum (od cca 50 μm)
FOV	zorné pole oblasti příjmu fotodiody
FWHM	šířka spektrální čáry v polovině amplitudy
GPRS	mobilní datová síť 2,5G
GPS	globální systém pro určování polohy
IEEE	institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství
IR	infračervené záření
IrDA	Standard pro optickou bezvláknovou komunikaci infračervené oblasti
ITU-T	mezinárodní telekomunikační unie
LED	světlo emitující dioda
LiFi	systém pro síťovou komunikaci pomocí světla
LOS	přímá viditelnost
LTE	UMTS Release 8, 3,9 generace mobilní datové sítě
MAC	jedinečný identifikátor síťového zařízení (2. vrstva RM-OSI)
MIR	střední infračervená oblast (3 - 50 μm)
MTBF	střední doba mezi poruchami
NLOS	nepřímá viditelnost
OCDMA	optický kódově dělený mnohonásobný přístup
OOK	modulace využívající amplitudového klíčování ASK
PHY	fyzická vrstva
PPM	pulzně polohová modulace
RF	radiofrekvenční systém
RGB	kombinace červené, zelené a modré barvy
RGBY	kombinace červené, zelené, modré a žluté barvy
RS	Reed-Solomonovy samoopravné kódy
SMD	součástka pro povrchovou montáž
TTL	tranzistorová logika (0 až +5V)
UV	ultra-fialové spektrum
V2V	komunikace mezi vozidly
V2I	komunikace mezi vozidly a infrastrukturou
VLC	optický bezvláknový komunikační systém
VPPM	variabilní pulzně polohová modulace
VUV	vzdálená UV oblast spektra (10-200nm)
WiFi	bezdrátová technologie přenosu dat dle standardu IEEE 802.11
WPAN	bezdrátová technologie přenosu dat dle standardu IEEE 802.15