

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektromagnetického pole



Bakalářská práce
Testovací platforma pro VLC
Testing Platform for VLC

Květen 2018

Vypracoval: Jakub Kanděra
Vedoucí práce: Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kanděra** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **457085**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Komunikační technika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Testovací platforma pro VLC

Název bakalářské práce anglicky:

Testing Platform for VLC

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte a implementujte testovací platformu pro Visible Light Communication (VLC), která bude využívat mikrokontrolér a výkonnou RGB LED. V rámci práce řešte následující úkoly:

1. Stanovte kritéria pro výběr vhodného mikrokontroléru.
2. Na vybraném mikrokontroléru implementujte ovládací software.
3. Navrhněte a implementujte rozhraní pro ovládání výkonné LED mikrokontrolérem.
4. Navrhněte a implementujte vhodný VLC přijímač. Dekódování signálu proveďte v programovém prostředí Matlab.
5. Proveďte měření demonstrující možnosti testovací platformy.

Seznam doporučené literatury:

- [1] CORBELLINI, Giorgio, et al. Connecting networks of toys and smartphones with visible light communication. IEEE Communications Magazine, 2014, 52.7: 72-78.
[2] VITEK, Stanislav, et al. Influence of Camera Setting on Vehicle-to-Vehicle VLC Employing Undersampled Phase Shift On-Off Keying. RADIOENGINEERING, 2017, 26.4: 947.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Stanislav Vitek, Ph.D., 13137

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **15.02.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **25.05.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

Ing. Stanislav Vitek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 25. května 2018

.....

Podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu prof. Ing. Stanislavu Vítkovi, Ph.D. za skvělé vedení a trpělivost v průběhu vypracování mé práce. I když se občas zrovna něco nedařilo, vždy byl ochoten se mnou daný problém konzultovat a poradit mi, jak ho vyřešit.

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem a realizací testovací platformy pro VLC komunikaci. V úvodu práce je probána problematika VLC systémů včetně souvisejícího hardwaru. Krátce nato je představen vlastní návrh VLC vysílače a přijímače. Na vysílači je provedeno měření některých jeho vlastností. V závěru práce je demonstrována funkčnost samotné testovací platformy.

Klíčová slova: Komunikace ve viditelném světle, VLC, mikrokontroler, RGB LED

Abstract

This thesis discusses the development and realization of a VLC testing platform. In the beginning principles and uses of VLC systems are brought and discussed. Shortly after own design of VLC transmitter and receiver is introduced. Some characteristics of the transmitter are measured. At the end the functionality of the VLC testing platform is demonstrated.

Keywords: Visible light communication, VLC, microcontroller, RGB LED

Obsah

1 Úvod	1
2 Hlavní možnosti využití VLC	3
2.1 Lokalizace uživatele a jeho sledování.....	3
2.2 Využití jako PAN (personal area network).....	3
2.3 Komunikace v oblasti dopravních prostředků.....	4
2.4 Místa s nemožností obsluhy pomocí rádiových frekvencí.....	5
3 Hardware využívaný ve VLC	7
3.1 LED diody.....	7
3.1.1 LED diody s konvertory vlnové délky	7
3.1.2 Vícechromatické LED.....	8
4 Modulace ve VLC	11
4.1 Modulace v časové doméně	11
4.1.1 On-off keying (OOK).....	11
4.1.2 Pulse position modulation (PPM).....	12
4.2 Color shift keying (CSK) modulace.....	14
5 Návrh VLC vysílače	15
5.1 Výběr vhodného mikrokontroleru.....	15
5.1.1 Mikrokontrolery obecně	15
5.1.2 Mikrokontrolery Arduino	15
5.2 Výběr komunikačního schéma VLC.....	17
5.2.1 Barevný prostor HSV	17
5.3 Teplota chromatičnosti vysílaného bílého světla	18
5.4 Výkonová RGB LED dioda	18
5.4.1 Měření vyzařovacích vlastností výkonové RGB LED diody	18
5.5 Návrh řízení výkonové RGB LED diody.....	21
5.6 Ovládací software vysílače	21
5.6.1 Funkce ovládacího softwaru.....	22
6 Návrh VLC přijímače	23
6.1 Snímač CMOS	23
6.1.1 Rolling shutter efekt	23
6.2 Kamera GoPro Hero 5	24
6.3 Nastavení parametrů přijímače	24
7 Demonstrace vyvinuté testovací platformy	25
7.1 Synchronizace a vyslání testovací posloupnosti	25
7.2 Zachycení testovací posloupnosti	26

7.3 Zjištěné nedostatky a možná vylepšení.....	27
8 Závěr	29
Dodatečné výsledky měření	33
Fotografie sestaveného VLC vysílače	34

Seznam obrázků

Obr. 2.1: Typická dopravní situace na dvouproudové silnici, převzato z [7].....	4
Obr. 3.1: Příklad spektra modré LED s fosforovým konvertorem vlnové délky, převzato z [9].....	8
Obr. 3.2: Typické vyzařovací spektrum RGB LED diody při pokojové teplotě, převzato z [9].....	9
Obr. 4.1: Příklad modulačního schéma OOK s implementací stmívání, převzato z [5].	11
Obr. 4.2: Příklad modulačního schéma PPM s naznačením možnosti stmívání, převzato z [5].....	12
Obr. 4.3: Příklad modulačního schéma IPPM s naznačením možného stmívání, převzato z [5].....	12
Obr. 4.4: Příklad modulačního schéma VPPM s naznačeným principem stmívání, převzato z [5].....	13
Obr. 5.1: Mikrokontroler Arduino Due, převzato z [12].	16
Obr. 5.2: Znázornění barevného prostoru HSV, převzato z [14].....	17
Obr. 5.3: Zobrazení naměřených barev chromatičnosti do diagramu CIE xy.	20
Obr. 5.4: Obvodové schéma zapojení navrženého řídicího členu pro výkonovou RGB LED.	21
Obr. 6.1: Struktura RGB Bayerovy mřížky, převzato z [15].	24
Obr. 7.1: Zakreslení konstelačního diagramu do prostoru HSV, podklad převzat z [17].	25
Obr. 7.2: Zobrazení dvou po sobě zachycených snímků VLC komunikace s označenými daty.	27

1 Úvod

S postupným rozvojem komunikační techniky jako celku a zejména se stále se zrychlujícím vývojem v oblasti mobilních sítí vyvstává mnoho otázek ohledně směru budoucího plánování. Tou nejdůležitější z nich je otázka přidělování stávajících i získávání nových frekvenčních spekter. Již mnoho let je zřejmé, že k dostupným frekvenčním spektrům je třeba nahlížet jako k nerostnému bohatství, jehož zásoby bezpochyby nejsou neomezené. Jedna z perspektivních technologií řešící tuto problematiku nese název *komunikace ve viditelném světle*, ve zkratce VLC z anglického *visible light communication*.

Tento standard využívá pro přenos či šíření informace vlnových délek viditelného světelného spektra od 380 do 780 nm. To odpovídá přibližně frekvencím 400–800 THz, a tedy potenciální šířce pásma kolem 400 THz, která momentálně není v podstatě nijak využívána. V tomto pásmu také v dnešní době neexistují žádné státní regulace [1].

Myšlenka komunikace ve viditelném spektru byla představena již v roce 1880 Alexanderem Grahamem Bellem s vynálezem tzv. fotofonu. Tento přístroj využíval zvukem rozvibrované zrcadlo k modulaci dopadajícího slunečního světla na straně vysílače a jiné zrcadlo k demodulaci a převodu zpět na zvukový signál na straně přijímače [2]. Koncept byl však na dlouhý čas pozapomenut a jeho další rozvoj začal až v nedávné době s významným pokrokem v oblasti LED (light emitting diode) technologií, jež umožnil zlevnění výroby a mnohonásobné zvýšení svítivosti v poměru k velikosti P-N přechodu a celkového dodávaného příkonu [3].

Přenos informací ve VLC systémech zastává zejména druhotnou funkci vnitřního, venkovního či signalizačního osvětlení a je tedy důležité při jejich vývoji a implementaci hledět i na správnou funkci osvětlení jako takového. V mnohých případech je však naopak možné modifikovat již zavedené systémy osvětlení, a tedy i výrazně snížit celkové náklady na instalaci VLC systémů.

2 Hlavní možnosti využití VLC

2.1 Lokalizace uživatele a jeho sledování

Prvním z možných perspektivních způsobů využití VLC technologie je lokalizace a sledování pohybu uživatele v místech, kde není možné využít žádné jiné stávající poziční systémy. To platí například pro systém GPS uvnitř větších budov či v hustší městské zástavbě, kdy je z důvodu průchodu přes velké množství materiálu, nebo mnohonásobného vícecestného šíření a následným interferencím signál vysílaný z pozičních satelitů jen velmi těžce interpretovatelný. Tato skutečnost může vést k pomalému, nepřesnému či zcela chybnému určení pozice uživatele.

Možná implementace vnitřního lokalizačního a sledovacího systému je převzata z článku [4]. Tento koncept počítá s využitím vnitřního osvětlení rozmístěného do pravidelné mřížky po celém stropě požadované místnosti. Jednotlivá světla poté mají funkci majáků vysílajících své unikátní kódy. Přijaté kódy jsou poté zachyceny na straně uživatele a s pomocí principu triangulace a předem známého rozmístění majáků po místnosti je možné velmi přesně určit jeho polohu. Lokalizační systémy na bázi VLC mohou dosáhnout přesnosti až několika centimetrů a překonávají tak přesnost desítek centimetrů až metrů systémů založených na RF [5].

2.2 Využití jako PAN (personal area network)

Dalším velmi populárním uvažovaným způsobem využití VLC je vysokorychlostní bezdrátový přenos dat. Této VLC technologii se také po vzoru dnes již velmi rozšířené Wi-Fi (Wireless Fidelity) občas přezdívá komerčnějším názvem Li-Fi (Light-Fidelity) a počítá se u ní s využitím konceptu tzv. attobuněk, tedy buněk menších než pokrývaná místnost.

Komunikace ve viditelném, případně infračerveném nebo ultrafialovém světle se zároveň v jednom klíčovém aspektu liší od komunikace založené na rádiových frekvencích. Z důvodu velmi krátkých vlnových délek v oblastech stovek nm dochází k mnohem snazšímu pohlcení světelného signálu již při průchodu velmi tenkými materiály. Při správné implementaci VLC systému je tedy možné zásadně omezit

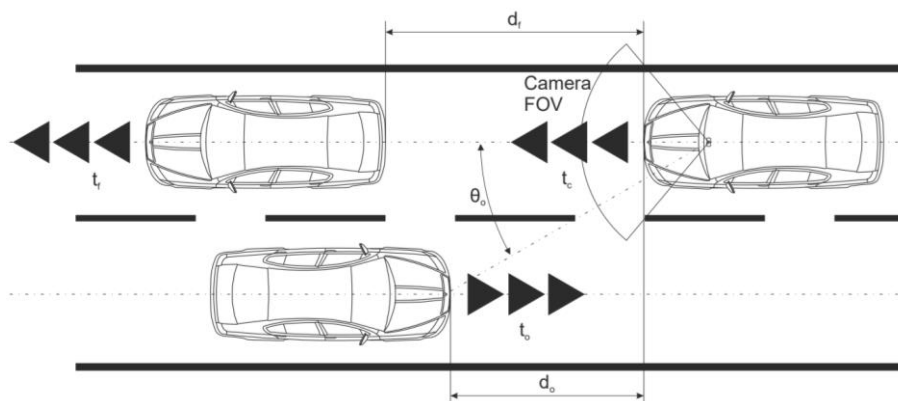
výsledné pronikání signálu mimo osobní PAN síť a tím výrazně zvýšit stupeň ochrany před cizím narušením zvenčí [6].

2.3 Komunikace v oblasti dopravních prostředků

Technologie LED osvětlení je stále častěji využívána i v automobilovém průmyslu, a tedy i zde se nabízí využití VLC komunikace pro přenos základních informací. Automobily vybavené VLC přijímači poté mohou během jízdy získávat pro bezpečnost velmi důležité informace o stavu vozovky nebo včasné varování o nehodách či jiných dopravních komplikacích.

Uvažovány jsou zejména dva koncepty komunikace označované pojmem VVLC (vehicular VLC). Koncept tzv. V2V (vehicle-to-vehicle) spočívá v získávání informací od protijedoucích i souběžně jedoucích vozidel s využitím vhodné modulace jejich čelních a zadních světlometů. V konceptu V2I (vehicle-to-infrastructure) mohou být informace získávány od předem vhodně rozmístěných dopravních návěstidel či například přímo od signalizačních světel na semaforech.

Roli přijímačů signálu mohou s výhodami zastávat čelní a zadní palubní kamery, které jsou již v dnešní době standardní výbavou téměř veškerých nových automobilů. Jelikož pro přenos základních dopravních informací není potřeba vysokého datového toku, nejsou nároky na použité kamery příliš vysoké a nemělo by tedy dojít k velkému nárůstu výrobní ceny automobilů. V praxi již byly úspěšně demonstrovány VVLC systémy využívající základních kamer s 30 snímků za sekundu a rozlišením 720p.



Obr. 2.1: Typická dopravní situace na dvoupruhové silnici, převzato z [7].

2.4 Místa s nemožností obsluhy pomocí rádiových frekvencí

Existuje mnoho míst, kde je z bezpečnostních nebo jiných důvodů nevhodné, či přímo zakázané využívat zařízení vysílající signál na rádiových frekvencích. Mezi takovéto lokace lze zařadit například některé nemocnice, továrny pracující s nebezpečnými a hořlavými látkami a také například letadla při startu a přistání [8]. Je oprávněné se obávat, že silné RF vysílání by zde mohlo narušit správnou funkci některých citlivých přístrojů nebo způsobit vznícení těkavých látek. Nasazení VLC systémů v těchto místech může přinést vhodné řešení jak z pohledu umožnění bezdrátové komunikace, tak z pohledu dodržení zadaných bezpečnostních standardů.

3 Hardware využívaný ve VLC

3.1 LED diody

Jak již bylo zmíněno v úvodu, zdokonalení a zlevnění LED technologie hrálo velkou roli ve vlastním vývoji VLC systémů. LED diody přináší mnoho výhod oproti dříve široce využívaným zářivkám a vláknovým žárovkám. Mezi ně patří zejména možnost jejich rychlého spínání, dlouhá životnost a také vysoká účinnost vedoucí ke znatelnému snížení celkové spotřeby elektrické energie využité pro osvětlení, a tedy i k pozitivnímu ekologickému dopadu. V následujícím textu budou uvedeny jednotlivé typy LED diod, se kterými je počítáno pro využití ve VLC technice a uvedeny jejich přednosti a nevýhody.

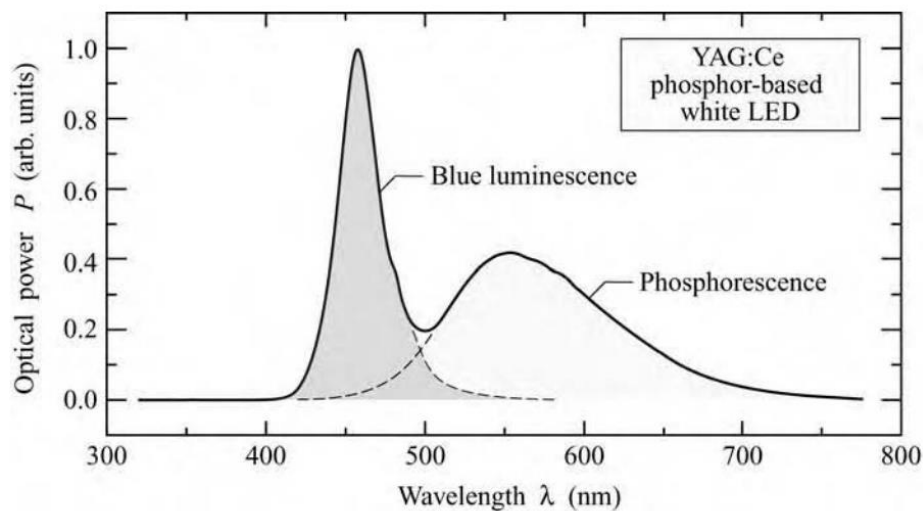
3.1.1 LED diody s konvertory vlnové délky

Pro úspěšnou implementaci VLC systémů, jejichž primární funkcí je vnitřní osvětlení, je požadováno, aby použité LED diody dokázaly věrně napodobovat vlastnosti slunečního světla. Jedná se zejména o schopnost vyzářit bílé světlo s takovým spektrálním složením, aby bylo zachováno přirozené podání barev osvětlených předmětů. K těmto účelům se dnes nejčastěji využívají tzv. LED s konvertory vlnové délky.

Tyto LED se skládají z polovodičové části vyzařující nejčastěji na vlnových délkách mezi ultrafialovým a modrým světlem. Polovodičová dioda je poté obklopena vhodným fosforem (luminoforem). Po dopadu modrého světla na luminofor dojde k jeho pohlcení a excitaci atomu luminoforu na vyšší energetickou hladinu. Při následné relaxaci zpět na nižší energetickou úroveň dojde k vyzáření fotonu s delší vlnovou délkou. Výsledné spektrum se poté skládá z poměrně široce rozprostřených vlnových délek vyzářených fosforem a části původního modrého světla. Příklad takového spektra pro nejčastěji používanou InGaN modrou diodu s YAG fosforem dopovaným ceriem je uveden na obr. 3.1.

LED diody s konvertory vlnové délky jsou jedněmi z nejrozšířenějších na celosvětovém trhu zejména kvůli své vysoké efektivitě. Pro implementaci VLC systémů s velmi rychlými bitovými toky však mají ze své podstaty jednu zásadní nevýhodu. Relativně pomalá fotoluminiscenční reakce fosforové vrstvy totiž snižuje celkovou

maximální rychlost modulace daného světla z desítek MHz dosažitelných u polovodičových diod na pouhé jednotky MHz. Některé experimenty ukázaly, že lze tento negativní jev částečně potlačit s využitím modrého filtru na straně přijímače, avšak za cenu snížení celkového přijímaného světelného výkonu, a tedy i snížení výsledného SNR [5]



Obr. 3.1: Příklad spektra modré LED s fosforovým konvertorem vlnové délky, převzato z [9].

3.1.2 Vícechromatické LED

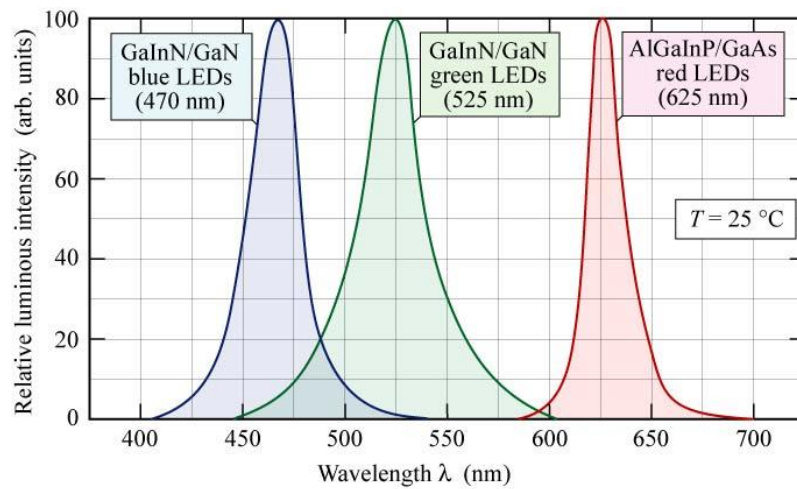
Získání bílého světla je možné i pomocí tzv. vícechromatických LED diod. Nejčastěji se lze setkat s tzv. dichromatickými, trichromatickými či tetrachromatickými soustavami, jejichž název udává počet distinktních vlnových délek tvořících výsledné bílé světlo. Každá vlnová délka je vyzařována vlastní aktivní svítivou diodou.

Jednou z nejvíce používaných technologií vícechromatických LED jsou trichromatické RGB LED. Tyto diody se skládají ze tří základních barev o vlnových délkách přibližně (620–645) nm pro červené, (520–550) nm pro zelené a (460–490) nm pro modré světlo (viz obr. 3.2). Řízením intenzity vyzařování jednotlivých barev lze upravovat barevnou teplotu (teplotu chromatičnosti) výsledného bílého světla.

Tato technologie však přináší i řadu nevýhod. I když se díky fyziologii lidského oka může zdát vnímané světlo jako bílé, stále je složeno jen z několika dominantních vlnových délek. Vykreslování barev předmětů pod tímto osvětlením tedy nemusí být zcela věrné. Například některé oranžové předměty mohou být vnímány s pozměněnou barvou a poněkud tmavěji než na slunečním světle, jelikož ve spektru dopadajícího světla

chybí vlnové délky, jež běžně odrážejí. Dalším zásadním problémem je drift intenzity vyzařování jednotlivých barevných LED s rostoucí teplotou čipu a případně i jeho stářím. Tento jev může vést k nežádoucím posunům v barevné teplotě vyzařovaného bílého světla. V některých případech je však možné tyto změny kompenzovat s využitím zpětné vazby [10].

Pro využití ve VLC systémech přináší RGB diody řadu výhod. Jejich šířka pásma modulace se může pohybovat od desítek MHz až ke stovkám MHz podle použité polovodičové technologie [9]. Diody je navíc možné provozovat i nad 3 dB modulačním pásmem s využitím vhodně implementované ekvalizace. Kompozice z několika samostatných LED o různých dominantních vlnových délkách také umožňuje využití vlnového multiplexu (WDM), kdy je každá dioda modulována nezávisle na ostatních a přenášená informace je poté vydělena ze společného kanálu například pomocí vhodných filtrů v přijímači. Možnost řídit jednotlivé diody nezávisle na sobě je využívána také u vícetavových barevných modulací CSK (viz- kapitola 4.2).



Obr. 3.2: Typické vyzařovací spektrum RGB LED diody při pokojové teplotě, převzato z [9].

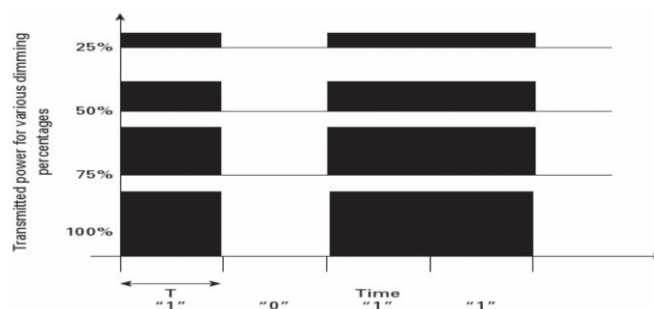
4 Modulace ve VLC

4.1 Modulace v časové doméně

Jedná se o základní a nejjednodušeji implementovatelné schéma komunikace využitelné ve VLC systémech. Oproti klasickým komunikačním kanálům mimo spektrum viditelného světla zde ovšem existuje několik rozdílů a omezení. Za těmi nejzásadnějšími stojí skutečnost, že je přenos informace prováděn ve spektru, na které je lidské oko schopno reagovat. Při implementaci VLC systému je tedy důležité dbát na bezpečnostní a zdravotní doporučení. Ačkoli je možné s pomocí LED diod realizovat modulační pásmo od jednotek Hz po stovky MHz, většina lidí není schopna rozeznat změny v intenzitě či barvě světla až od (60-100) Hz a při rychlém pohybu vůči zdroji světla až přibližně od 200 Hz. Využití frekvencí modulace pod těmito hranicemi může u některých osob vyvolávat nepříjemné vjemy, či dokonce způsobit vážné zdravotní problémy [11].

4.1.1 On-off keying (OOK)

Tato modulace spočívá ve střídání stavů „zapnuto“ reprezentujících bitovou informaci „1“ a „vypnuto“ reprezentujících bitovou informaci „0“. Perioda T obou dvou stavů je stejně dlouhá a samotnou modulaci lze implementovat jednoduše rozsvěcením a zhasínáním LED diody. Při pomalejších bitových rychlostech je třeba dbát na přibližně rovnoměrné rozložení stavů „0“ a „1“, aby nedocházelo k zaznamenaným změnám v intenzitě vyzařovaného světla. Toho lze dosáhnout například použitím vhodného scrambleru či Huffmanova kódování na straně vysílače [5]. Dále je možné implementovat i techniku stmívání osvětlení snížením hladiny intenzity pro stav log „1“ (viz - Obr. 4.1).

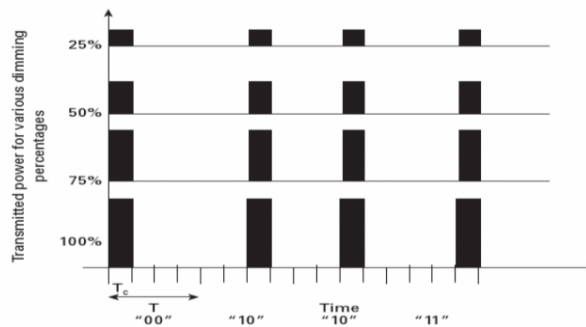


Obr. 4.1: Příklad modulačního schéma OOK s implementací stmívání, převzato z [5].

4.1.2 Pulse position modulation (PPM)

Základním principem této modulace je využití jednotkového pulsu o době trvání $T_C = \frac{T}{2^M}$ sekund do jednoho z 2^M možných časových slotů. T značí celkovou dobu jedné periody opakování tohoto schématu a M náleží přirozeným číslům. Celkový vysílaný bitový tok je poté $C = \frac{M}{T}$ bitů/s. Je však nutno zmínit, že se zvyšujícím se M se zvyšují i nároky na přesnost a stabilitu časování ve vysílačích a přijímačích zajišťujících potřebnou synchronizaci.

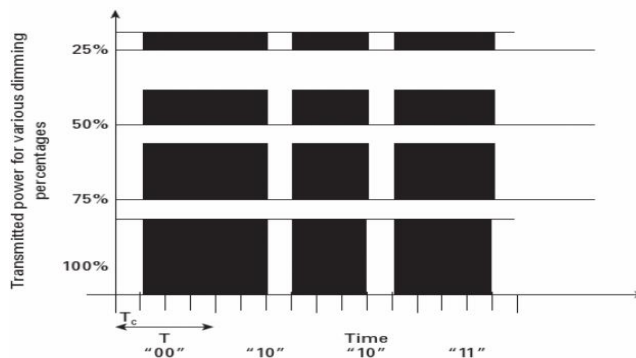
Toto modulační schéma umožňuje implementovat možnost stmívání osvětlení stejným způsobem, jako bylo uvedeno u OOK modulace. Avšak se zvyšujícím se počtem stavů 2^M dochází ke zmenšení celkové šířky signálu a je tedy možné, že po snížení hladiny úrovně log „1“ na straně vysílače může dojít k výraznému zhoršení SNR na straně přijímače.



Obr. 4.2: Příklad modulačního schéma PPM s naznačením možnosti stmívání, převzato z [5].

Inverse pulse position modulation (IPPM)

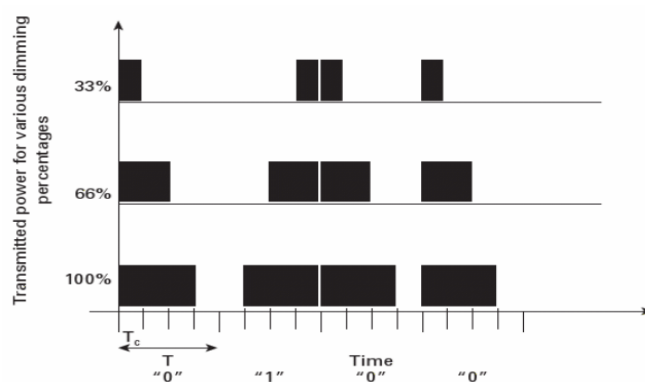
Princip inverzní PPM tzv. IPPM spočívá v obrácení stavů log „1“ a log „0“. V době jedné periody T opakování schématu je tedy primárně vysílán světelný tok a do příslušného časového slotu o periodě T_C symbolu IPPM je vložena „díra“. Možnost stmívání je řešena stejným způsobem jako u PPM modulace.



Obr. 4.3: Příklad modulačního schéma IPPM s naznačením možného stmívání, převzato z [5].

Variable pulse position modulation (VPPM)

Schéma této modulace vychází z kombinace PPM a PWM (pulse width modulation) modulací. Binární hodnota symbolu je stejně jako u PPM modulace určena pozicí pulsu v jedné periodě trvání symbolu. Stmívání osvětlení je zde však prováděno pomocí změny šířky samotného pulsu. Výhodou této modulace je konstantní intenzita vyzařování pro hladinu log „1“ a tedy i v některých případech snazší implementace systému bez nutnosti řízení proudu protékaného LED diodou. Příklad tohoto schéma pro různé úrovně stmívání je uveden na obrázku 4.4.



Obr. 4.4: Příklad modulačního schéma VPPM s naznačeným principem stmívání, převzato z [5].

4.2 Color shift keying (CSK) modulace

Princip modulace CSK spočívá ve změně intenzity (IM) barevných složek vysílaného světla. Jelikož jsou příspěvky jednotlivých složek (nejčastěji RGB) aditivně sčítány, tvoří jejich kombinace širokou škálu možných barev. Při použití vhodného modulačního signálu je možné velmi rychle měnit jednotlivé barevné stavy. do každého stavu odpovídajícímu součtu intenzit z příspěvkových vlnových délek je poté možná zakódovat jeden symbol vícestavové CSK modulace.

Podmínkou správné implementace této modulace je využití modulačních frekvencí dostatečně vysoko nad hranicí lidského vnímání. Poté je možné vysílat data i s pomocí velmi rychle se měnících chromatičností symbolů, aniž by bylo možné tyto změny zareagovat. Důležité pro potlačení nežádoucího efektu blikání je také zachování co nejkonstantnějšího celkového světelného toku vyzářeného vysílačem.

5 Návrh VLC vysílače

5.1 Výběr vhodného mikrokontroleru

Při výběru vhodného mikrokontroleru pro použití jako vysílače ve VLC je třeba dbát na několik základních parametrů. Mezi ně patří zejména taktovací frekvence vlastního mikroprocesoru a rychlost a rozlišení D/A a A/D převodníků. Důležitá je také velikost paměti pro uložení dat a programu. Je dobré přihlížet také k hladině napětí, na níž daný mikrokontroler pracuje.

5.1.1 Mikrokontrolery obecně

Pojmem mikrokontroler se většinou rozumí jednočipový počítač či monolitický integrovaný obvod obsahující mikroprocesor. Jejich největší přednosti spočívají v jednoduchosti, spolehlivosti a kompaktnosti. Jsou využívány pro jednoúčelové aplikace v oblastech řízení, regulace a zpracování dat.

Architektura mikrokontroleru zahrnuje veškeré potřebné součásti umožňující jeho funkci bez přídavných podpůrných obvodů. Jedná se o paměť pro uložení programů ve formě FLASH, EEPROM či ROM a operační paměť RAM pro uložení využívaných proměnných a zásobníků. Mezi nejčastější podpůrné obvody poté patří zejména digitálně analogové (DAC) a analogově digitální (ADC) převodníky umožňující zpracování vstupních dat a řízení výstupů.

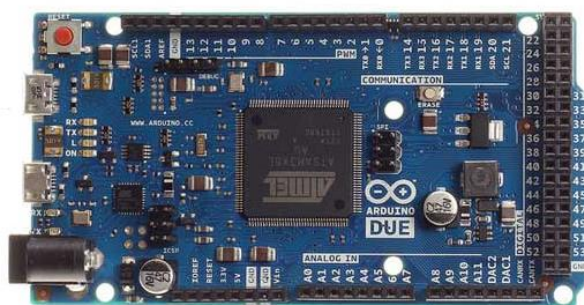
5.1.2 Mikrokontrolery Arduino

Mikrokontrolery značky Arduino se v posledních letech těší velké oblibě. Jejich univerzálnost umožňuje jednoduché uplatnění v širokém spektru řešených problémů. Veškerý hardware a software Arduina je postaven na principu open-source licencovaných systémů a je tedy možné je jednoduše modifikovat pro vlastní potřebu. Sortiment mikrokontrolerů od Arduina zahrnuje širokou škálu možností od nejjednodušších desek Arduino Nano, přes nejrozšířenější Arduino UNO až po sofistikovanější Arduino DUE. Přednostmi těchto desek jsou zejména jejich flexibilita, interkompatibilita a v neposlední řadě také poměrně nízká cena v porovnání s ostatními mikrokontrolery.

Arduino Due

K účelům realizace testovací platformy pro VLC byl vybrán mikrokontroler Arduino Due. Tento mikrokontroler obsahuje procesor Atmel SAM3X8E postavený na 32-bitové architektuře ARM Cortex-M3. Taktovací frekvence procesoru činí 84 MHz, což představuje dostatečný výkon pro zpracování dat v reálném čase a následnou realizaci VLC vysílače. Mimo možnosti využít 12-bitové ADC a DAC převodníky je také na pinech 2-13 možné využít přímého analogového výstupu ve formě PWM.

Deska může být napájena z USB portu napětím 5 V anebo z externího napájení s napětím 7-12 V. Při jejím používání je však třeba přihlížet ke skutečnosti, že I/O porty pracují na napětí 3.3 V a při přímém připojení na jiný mikrokontroler s úrovní napětí 5 V tak může dojít k jejich nenávratnému poškození. USB porty také obsahují sériově paralelní převodníky (ISP) důležité pro správnou komunikaci a programování s pomocí PC. Pro uložení dat a programového kódu je k dispozici 512 kB FLASH paměti, což je pro většinu aplikací zcela dostačující. Výstupní porty Arduina Due mohou v závislosti na podmínkách bezpečně dodávat mezi 9-15 mA.



Obr. 5.1: Mikrokontroler Arduino Due, převzato z [12].

Arduino IDE

Open-source vývojové prostředí Arduino IDE je k dispozici volně ke stažení na oficiální stránce www.arduino.cc. Program obsahuje poměrně jednoduchý textový editor, který však postrádá pokročilejší programátorské funkce a nehodí se tedy pro psaní rozsáhlejších a složitějších kódů. Na druhou stranu ale nabízí aktuální ovladače pro většinu i neoriginálních desek založených na procesorech Atmel a ARM a také velmi užitečnou funkci komunikace se sériovou linkou Arduina. Přes ni je možné zadávat příkazy, získávat data a také je velmi důležitá při celkovém debuggingu psaného programu.

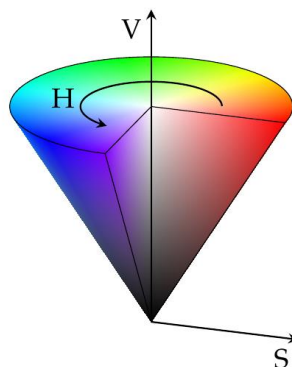
5.2 Výběr komunikačního schéma VLC

Z důvodu uvažovaného využití výkonové RGB LED diody na straně vysílače bylo zvoleno modulační schéma VLC volně vycházející ze standardizovaného modelu CSK dle doporučení IEEE 802.15.7, jež je shrnuto v [13]. Pro testovací účely a ověření funkčnosti byla zvolena 4-stavová modulace.

5.2.1 Barevný prostor HSV

Jak již bylo zmíněno výše, pokud má komunikace ve VLC systémech zastávat druhotnou funkci vnitřního osvětlení, je žádoucí, aby výsledné světlo složené z jednotlivých RGB složek bylo vnímáno jako konstantní bílá barva bez časových změn v intenzitě či chromatičnosti. K docílení této podmínky lze s výhodou využít barevného prostoru HSV. Název tohoto prostoru je odvozen od anglických slov pro odstín (hue), sytost (saturation) a hodnotu jasu (value) barev a jeho rozložení je nejčastěji zobrazováno pomocí kuželu. Sytost H odpovídá úhlu rotace kolem osy kuželu a může tedy nabývat hodnot od 0 do 360° . Odstín S odpovídá vzdálenosti od osy kuželu a může nabývat hodnot od 0 do 1. Hodnota jasu V poté odpovídá vzdálenosti od vrcholu kuželu směrem k jeho podstavě a může nabývat hodnot od 0 do 1.

Kuželovitý souřadný systém tohoto prostoru je získán transformací z ortogonálního souřadného systému RGB. Transformaci si ve zjednodušené formě lze představit tím, že postavíme krychli barevného prostoru RGB na vrchol odpovídající černé barvě. Vrchol odpovídající bílé barvě je poté přenesen do roviny konstantní chromatičnosti odpovídající rovině vrcholů R, G a B. V posledním kroku je získaná šestiúhelníková podstava jehlanu transformována do kruhového obvodu a je získán výsledný jehlan prostoru HSV.



Obr. 5.2: Znárodnění barevného prostoru HSV, převzato z [14].

5.3 Teplota chromatičnosti vysílaného bílého světla

Použití trichromatických RGB LED diod pro implementaci VLC vysílače přináší mimo umožnění vícestavové CSK modulace i možnost změny barevné teploty osvětlení. Ekvivalentní teplota chromatičnosti vyzařovaného světla obecně odpovídá barvě ideálního černého tělesa o stejné teplotě a udává se v Kelvinech. Jedná se o subjektivní veličinu, jejíž vnímání a účinky se u jednotlivých osob mohou lišit. Lidský mozek je do jisté míry schopný změny ve vnímané barevné teplotě osvětlení kompenzovat na základě již dříve získaných poznatků o podstatě pozorovaného předmětu. V oblasti digitální fotografie však barevná teplota osvětlení či správné nastavení použitého snímače hrají velkou roli.

Bílé světlo s nízkou teplotou chromatičnosti v rozmezí od 2700 do 3000 K je často označováno pojmem „teplé“. Světlo s teplotou chromatičnosti přesahující 5000 K naopak pojmem „studené“. I přes subjektivní charakter vnímání je možné vyvodit společné účinky na lidskou psychiku. Studené světlo spektrálně odpovídající slunečnímu záření kolem poledních hodin přispívá zejména k lepšímu soustředění a pozornosti. Teplé světlo odpovídající slunečnímu záření v odpoledních a večerních hodinách naopak přináší účinky únavy a je vhodnější pro relaxační účely.

5.4 Výkonová RGB LED dioda

Na straně VLC vysílače byla použita výkonová RGB LED dioda Alustar LEDx. Při použití doporučeného napájecího napětí 24 V činí její příkon 3 W. Vyzařovací plocha diody je tvořena třemi pásy do série zapojených LED diod a každý pás odpovídá jedné barvě. Výrobce udává vyzařovací úhel 140° a vyzařované vlnové délky 623 nm pro červenou, 525 nm pro zelenou a 470 nm pro modrou barvu. Celý čip diody je zalit pryskyřicí do hliníkového pouzdra, které zaručuje dobré chlazení a vodotěsnost dle certifikace IP67.

5.4.1 Měření vyzařovacích vlastností výkonové RGB LED diody

Spektrální složení

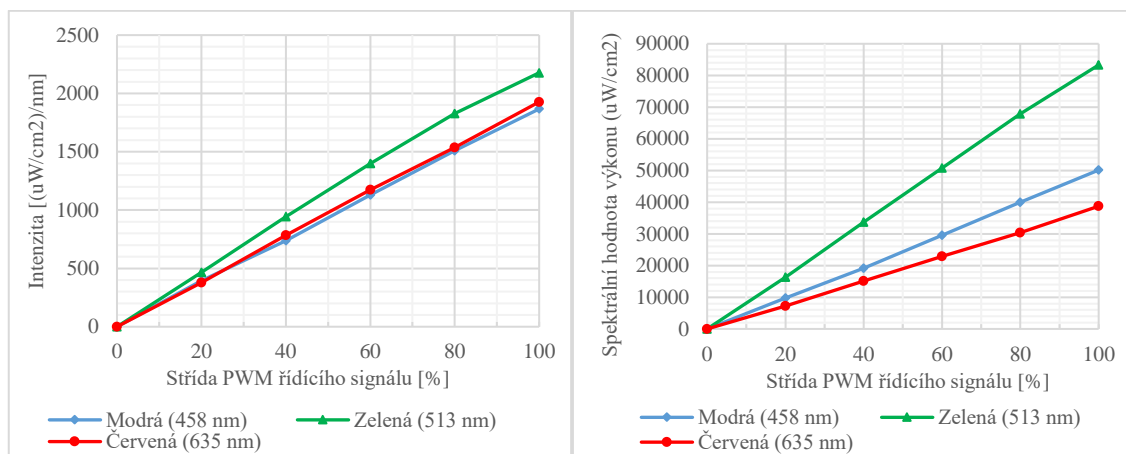
Pro přesné určení vyzařovaných vlnových délek jednotlivých barev RGB LED diod a jejich spektrálního výkonu bylo provedeno měření na digitálním optickém spektrálním analyzátoru. Mezi RGB LED diodu a sondu spektrálního analyzátoru byl umístěn difúzní materiál ve snaze eliminovat chyby v měření spektrálního výkonu. Tyto chyby by mohly

být způsobeny nerovnoměrným rozložením jednotlivých barevných LED diod na ploše čipu a nesprávným nasměrováním sondy optického spektrálního analyzátoru. Výsledkem měření je tabulka Tab. 5.1, ukazující skutečné naměřené hodnoty vlnových délek pro jednotlivé barevné složky RGB LED diody v porovnání s údaji udávanými výrobcem.

Barva	Modrá	Zelená	Červená
Naměřená vlnová délka [nm]	458	513	635
Vlnová délka deklarovaná výrobcem [nm]	470	525	623
Odchylka vůči deklarované vlnové délce [%]	-2,6	-2.3	-1.8

Tab. 5.1: Porovnání naměřených vlnových délek barev. složek RGB LED diody s údaji od výrobce.

Tabulka A.1 v příloze obsahuje naměřené hodnoty intenzity a spektrálního výkonu jednotlivých barev v závislosti na nastavené hodnotě střidy řídicího signálu PWM od mikrokontroleru. Tyto závislosti jsou vyobrazeny v grafu 5.1.



Graf 5.1: Intenzita a spektrální výkon vyzařování výkonové RGB LED diody v závislosti na střídě řídicího PWM signálu.

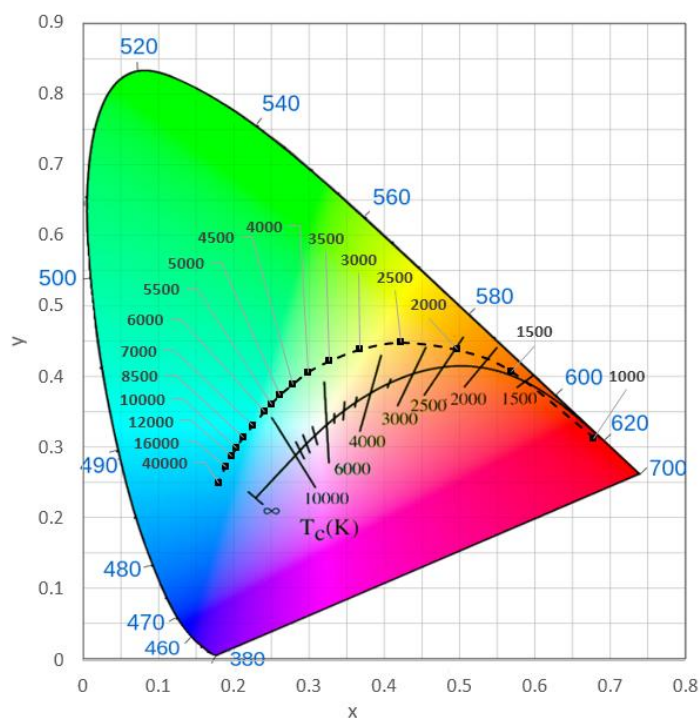
Z těchto dat je patrné, že vyzařovaný spektrální výkon jednotlivých barev není stejný. Zelená barva je vyzařována s přibližně o 15% vyšší vrcholovou intenzitou a její spektrum obsahuje více přilehlých vlnových délek a je tedy širší. Důsledkem je vyšší vyzařovaný spektrální výkon než u modré a červené barvy (viz - graf 5.1). Tato nerovnoměrnost vyzařovaných výkonů může vést k nežádoucímu posuvu v chromatičnosti vyzařovaného světla. Pokud by tato změna činila problémy s dekódováním VLC signálu, je nutné ji vhodným způsobem hardwarově či softwarově kompenzovat.

Diagram CIE xy pro různé teploty chromatičnosti

Z důvodu uvažované implementace nastavení teploty chromatičnosti na straně vysílače VLC bylo provedeno i měření chromatických koeficientů barevného prostoru CIE xy. Naměřené hodnoty pro různé nastavené teploty chromatičnosti lze najít v Tab. 5.2. Pro lepší přehlednost bylo provedeno zakreslení získaných dat do diagramu CIE xy v porovnání s průběhem křivky ideálně černého tělesa (viz - obrázek Obr. 5.3). Z grafu je patrný posuv naměřené křivky směrem do horní oblasti diagramu. To odpovídá již výše zmíněné nerovnoměrnosti ve vyzařovaném spektrálním výkonu jednotlivých barev RGB LED diody a zejména převaze zelené barvy.

teplota chromatičnosti [K]	x	y	teplota chromatičnosti [K]	x	y
1000	0.6786	0.3137	5500	0.2506	0.3614
1500	0.5681	0.4083	6000	0.2411	0.3503
2000	0.4964	0.4383	7000	0.2265	0.3314
2500	0.4217	0.4485	8500	0.2128	0.3138
3000	0.3679	0.4386	10000	0.2045	0.2998
3500	0.3275	0.4221	12000	0.1978	0.2884
4000	0.2993	0.4065	16000	0.1902	0.2738
4500	0.2784	0.3886	40000	0.1803	0.2502
5000	0.2624	0.3746	-	-	-

Tab. 5.2: Naměřené koeficienty chromatičnosti CIE xy v závislosti na nastavené barevné teplotě

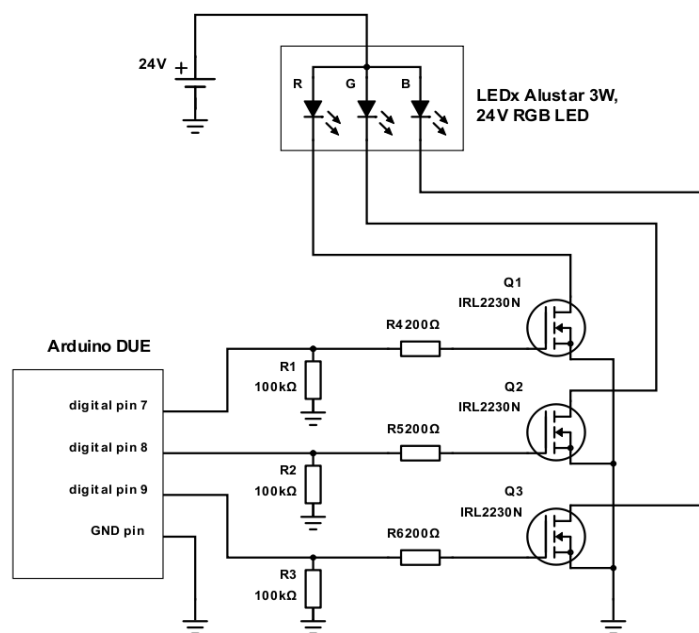


Obr. 5.3: Zobrazení naměřených barev chromatičnosti do diagramu CIE xy.

5.5 Návrh řízení výkonové RGB LED diody

Jak již bylo zmíněno v 5.1.2, Arduino Due umožňuje na svých výstupních pinech nastavit napětí maximálně 3,3V a bez rizika poškození dodávat proud do hodnoty 15 mA. Použitá výkonová RGB LED dioda pro svou správnou funkčnost vyžaduje napětí okolo 24 V a při plném výkonu odebírá proud v řádu 100–200 mA. Tuto diodu tedy není možno řídit pomocí mikrokontroleru Arduino Due napřímo.

Z tohoto důvodu byl navržen a realizován řídicí člen. Použity byly tři logické tranzistory IRL2230N technologie MOSFET s obohacovaným kanálem typu N. Tyto tranzistory umožňují plné sepnutí již při nízkých napětích U_{GS} a jsou tedy vhodné pro použití ve výkonovém řízení pomocí mikrokontrolerů. Maximální napětí U_{DS} zvolených tranzistorů činí 30 V, což je hodnota dostačující pro řízení LED diody napájené z 24 V zdroje. Obvodové schéma kompletního zapojení i včetně mikrokontroleru je zobrazeno na Obr. 5.4.



Obr. 5.4: Obvodové schéma zapojení navrženého řídicího členu pro výkonovou RGB LED.

5.6 Ovládací software vysílače

Z důvodu zvolení mikrokontroleru Arduino Due řídicím prvkem vysílače VLC byl ovládací software napsán v programovacím jazyce „Arduino“ vycházejícího z kombinace jazyka Wiring a jazyka C++.

5.6.1 Funkce ovládacího softwaru

Navržený software umožňuje nastavení řady parametrů komunikačního systému VLC. Parametry jsou zadávány přes sériovou linku z připojeného počítače ve tvaru „název_příkazu hodnota“. Potvrzení správného přijetí příkazu je odesláno z mikrokontroleru zpět po sériové lince do počítače a zobrazeno v sériovém monitoru programu Arduino IDE. Základní příkazy a jejich očekávané hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.3.

Funkce příkazu	Název příkazu	Očekávaný datový typ	Očekávané hodnoty		Poznámka
			min	max	
Nastavení periody T_s trvání jednoho symbolu [μs]	symbolPeriod	int	4	10^6	-
Zadání testovací bitové posloupnosti	testSequence	string	0	1	Bitová posloupnost je zde brána jako string
Nastavení počtu bitů hlavičky rámce	headLength	int	0	16	Pouze sudá čísla
Nastavení počtu bitů v jednom rámci	frameLength	int	2	32	Pouze sudá čísla
Nastavení počtu opakování jednoho rámce	frameRepeat	int	0	4	-
Zapnutí sériového výpisu s informacemi o vysílaných symbolech	serialOutput	int	0	1	0 - Vypnuto 1 - Zapnuto

Tab. 5.3: Výpis příkazů použitelných pro řízený mikrokontroler Arduino Due jako VLC vysílače.

Mezi nejdůležitější příkazy ovládací funkce VLC vysílače patří nastavení periody trvání jednoho symbolu v mikrosekundách a zadání testovací bitové posloupnosti. Dalšími příkazy lze měnit například počet bitů v jednom rámci, počet opakování jednoho rámce a počet bitů hlavičky rámce. Pro případ debugingu je možné zapnutí sériového výpisu obsahujícího informace o momentálně vysílaných symbolech. Poslední důležitý příkaz umožňuje nastavovat teplotu chromatičnosti bílého světla v krocích 100 K od 1000 K do 40 000 K.

6 Návrh VLC přijímače

Úkolem VLC přijímače je zachycení vysílaného signálu a jeho převod z viditelného spektra zpět do elektrické podoby. K tomuto účelu mohou posloužit speciální fotodiody či přímo samotné svítivé LED diody. Z důvodu použití trichromatické RGB LED diody a vícestavové barevné modulace na straně vysílače byl však v tomto případě zvolen pro opto-elektrický převod snímač CMOS.

6.1 Snímač CMOS

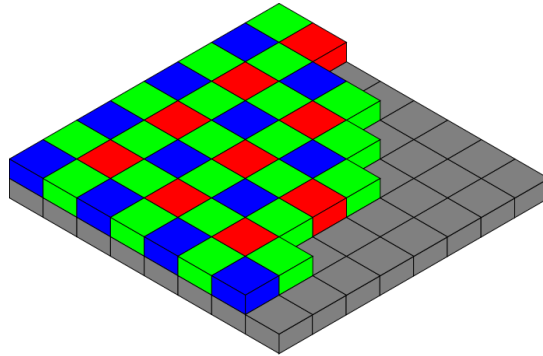
Snímače CMOS (z anglického Complementary Metal Oxide Semiconductor) se skládají z velkého množství miniaturních fotodiód uspořádaných do mřížky podle takzvané Bayerovy masky. Tato maska se skládá ze tří rozdílných typů filtrů propouštějících vždy jen jednu vlnovou délku základní barvy. Nejčastěji se využívá složení z filtrů propouštějících červenou, zelenou a modrou barvu. Bodů propouštějících zelenou barvu je z důvodu vyšší citlivosti lidského zraku na tuto barvu 2x více než ostatních. Uspořádání struktury CMOS snímače s RGB Bayerovou mřížkou je vyobrazeno na obrázku Obr. 6.1.

Detekcí tří základních barev a porovnáním jejich vzájemné intenzity je možné snímačem CMOS zachytit velké množství barevných odstínů. To lze s výhodou využít při dekódování zachyceného signálu VLC s vícestavovou barevnou modulací. Nevýhodou dnes běžně dostupných kamer a fotoaparátů s CMOS snímačem je však poměrně pomalá snímací frekvence pohybující se od 30 do 240 snímků za sekundu. Aby mohla být dodržena základní vzorkovací podmínka dle Nyquistova teorému a nedošlo při vzorkování k aliasingu, nesměla by nejvyšší modulační frekvence na straně vysílače překročit hranici 15 Hz pro rychlost snímání 30 fps a 120 Hz pro rychlost snímání 240 fps.

6.1.1 Rolling shutter efekt

Výrazně zvýšit použitou modulační rychlost na straně vysílače umožňuje použití tzv. efektu rolující spouště (anglicky rolling shutter). Ten je vyvolán u snímačů CMOS, jenž využívají postupného opto-elektrického převodu a ukládání dat po jednotlivých

řádcích. Výsledný získaný obraz tedy neodpovídá jednomu časovému okamžiku a je v něm vyobrazen postupný průběh zachycených řádků v době trvání jednoho snímku. Pro získání obrazového snímku ve vysokém rozlišení musí být frekvence snímání jednotlivých řádků výrazně vyšší než výsledný framerate kamery. S využitím efektu rolující spouště je tedy možné bez nechtěného aliasingu zachytit signál modulovaný frekvencí převyšující vlastní snímkovou frekvenci použité kamery.



Obr. 6.1: Struktura RGB Bayerovy mřížky, převzato z [15].

6.2 Kamera GoPro Hero 5

K zachycení vysílaných dat byla použita akční kamera GoPro Hero 5 Black s 12Mpix CMOS snímačem. Tato kamera umožňuje nahrávání videa s rozlišením 4K, avšak pouze s rychlostí snímání 30 snímků za sekundu. Při snížení nahrávaného rozlišení na 1080p je možné získat rychlost snímání až 120 snímků a při snížení na 720p až 240 snímků za sekundu.

6.3 Nastavení parametrů přijímače

Z nabízených rozlišení bylo po vytvoření a porovnání několika zkušebních nahrávek vybráno rozlišení 1080p a snímkovací frekvence kamery byla nastavena na maximálních podporovaných 120 snímků za sekundu. Při použití rychlejšího režimu podporujícího 240 snímků za vteřinu docházelo k problémům s nastavením expozice a nepodařilo se získat dekódovatelný obraz.

7 Demontrace vyvinuté testovací platformy

7.1 Synchronizace a vyslání testovací posloupnosti

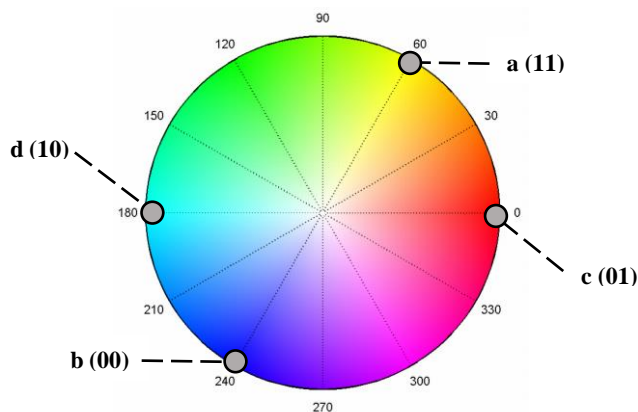
Pro ověření funkčnosti testovací platformy byla vygenerována pseudonáhodná bitová posloupnost o délce 8 bytů. S použitím volně dostupného softwaru [16] umožňujícího použít zvukovou kartu počítače jako jednoduchý osciloskop byla synchronizována frekvence vysílače na přibližně celočíselný násobek snímací frekvence kamery. Doba trvání jednoho vyslaného symbolu v tomto případě činila 260 μ s. Každý rámeček byl složen z osmibitové hlavičky tvořené bitovou posloupností „11111111“ a z 16 bitů užitečných dat. Byla použita barevná modulace s počtem stavů $M = 4$. Počet bitů n odpovídající jednomu symbolu je možné vypočítat pomocí vztahu:

$$n = \log_2 M = \log_2 4 = 2 \text{ bit}$$

Použité přidělení symbolů je možno najít v tabulce 7.1 a jejich zakreslení do konstelačního diagramu v prostoru HSV na obrázku Obr. 7.1.

Označení symbolu	Přidělená 2-bitová hodnota	Hodnoty barevného prostoru HSV		
		Hue [°]	Saturation [-]	Value [-]
a	11	60	1	1
b	00	240	1	1
c	01	0	1	1
d	10	180	1	1

Tab. 7.1: Přidělení symbolů komunikačního protokolu HSV



Obr. 7.1: Zakreslení konstelačního diagramu do prostoru HSV, podklad převzat z [17].

Bitová rychlost vysílače může být vypočtena dle následujícího vzorce:

$$b_v = s \cdot n = (3,85 \cdot 10^3) \cdot 2 = 7,7 \text{ kbit/s} ,$$

kde s odpovídá symbolové rychlosti a n počtu bitů na jeden symbol. Symbolovou rychlost lze vypočíst z doby trvání jednoho symbolu T_s pomocí vzorce:

$$s = \frac{1}{T_s} = \frac{1}{260 \cdot 10^{-6}} = 3,85 \text{ kBd}.$$

Vyslaný rámeček byl vždy jednou opakován, aby nedošlo ke ztrátě dat v přijímači při přechodu na další snímek. Celková užitečná přenosová bitová rychlost může být s přihlédnutím k 8 bitové hlavičce rámce a jeho jedním opakováním vypočtena dle vzorce:

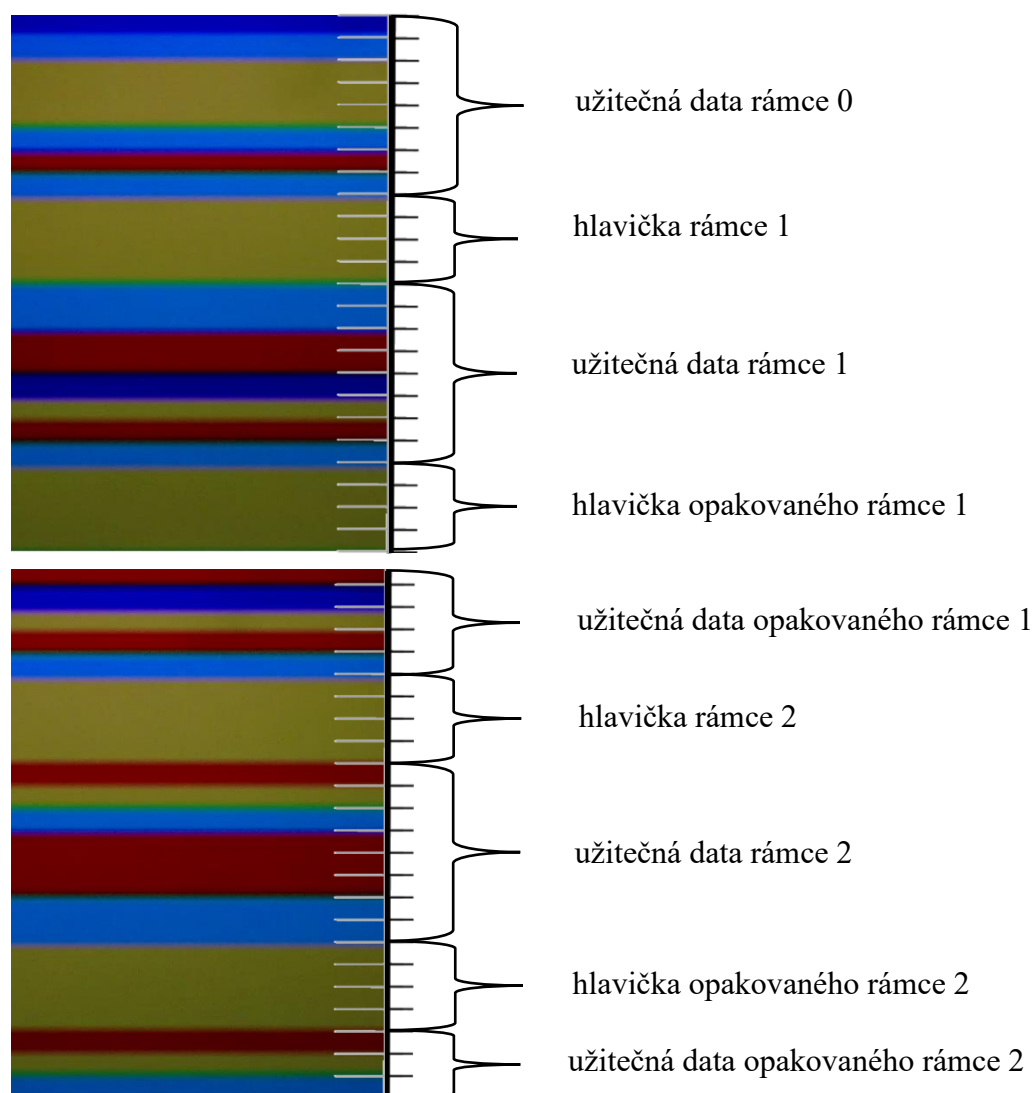
$$b_u = \frac{1}{2} \cdot \frac{16}{24} \cdot b_v = \frac{1}{3} \cdot b_v = 2,57 \text{ kbit/s}.$$

7.2 Zachycení testovací posloupnosti

Vyslaná testovací posloupnost byla nahrána na video o rozlišení 1080p a snímkové frekvencí 120 fps. Z důvodu nerovnoměrnosti rozložení barev na čipu výkonové RGB LED diody nebyl vysílač umístěn v přímé linii s přijímačem (LOS). Vyslaný signál byl odražen od bílé plochy a až poté byl zachycen senzorem CMOS kamery GoPro. Tento typ šíření signálu mezi vysílačem a přijímačem se nazývá N-LOS (z anglického non - line - of - sight).

Ze zachyceného signálu bylo možné správně dekodovat veškeré vyslané symboly a získat tak původní vyslanou testovací bitovou posloupnost. Na obrázku 7.2 jsou zobrazeny dva po sobě následující snímky z nahraného videa. Každý barevný pruh vytvořený efektem rolující spouště odpovídá jednomu symbolu zvolené barevné konstelace s dobou trvání 260 μ s. Je zde možné vidět celý rámeček složený ze čtyř žlutých symbolů hlavičky a osmi barevných symbolů užitečných dat.

Na konci snímku 1 (z pohledu rolující spouště - dolní hrana obrázku) je vidět zachycený konec hlavičky opakovaného rámce 1. Druhý snímek však začíná až od zhruba poloviny čtvrtého užitečného symbolu v opakovaném rámci 1. To přibližně odpovídá již výše zmíněné době 1 ms, kterou kamera GoPro potřebuje na zpracování a uložení dat jednoho zachyceného snímku v rozlišení 1080p. Je zde také patrné, že díky opakování vyslaného rámce nebyla kvůli tomuto přechodu ztracena žádná užitečná data.



Obr. 7.2: Zobrazení dvou po sobě zachycených snímků VLC komunikace s označenými daty.

7.3 Zjištěné nedostatky a možná vylepšení

Při pokusech o zachycení a dekodování testovací posloupnosti se ukázalo, že kamera GoPro Hero 5 není pro tento účel zcela nejvhodnější. I přes schopnost snímat video v rozlišení 720p při 240 snímcích za sekundu nenabízí v tomto režimu řadu důležitých nastavení expozice obrazu. Nesprávné nastavení expozice poté vedlo k přexponování a rozmazání zachycených barevných pruhů. Nebylo tedy možné ze zachyceného obrazu správně dekodovat vyslané symboly.

V režimu 1080p a 120 snímcích za vteřinu je možné provádět základní nastavení expozice, avšak výsledná kvalita nahraného obrazu stálení není zcela optimální. Kamera měla mimo jiné i poměrně velké problémy zaostřit na rychle se měnící barevný signál. Do budoucna by tedy bylo vhodné na straně testovacího přijímače použít například

digitální zrcadlovku, která by umožňovala mnohem rozsáhleji a detailněji měnit jednotlivá nastavení zachycovaného obrazu a případné použití rozdílných objektivů.

8 Závěr

Úkolem této práce bylo navrhnout a vhodně implementovat testovací platformu VLC pro komunikaci ve viditelném světle. Na straně vysílače byla použita výkonová RGB LED dioda, pro kterou byl v rámci práce navržen a sestrojen řídicí člen. Tento řídicí člen poté umožňoval ovládání intenzity jednotlivých barevných složek RGB LED diody přímo z výstupních pinů použitého mikrokontroleru Arduino Due.

Pro zmíněný mikrokontroler byl poté navržen software umožňující jeho použití jako vysílače v testovacím komunikačním kanálu VLC: S jeho pomocí bylo možné přes příkazy po sériové lince mezi mikrokontrolerem a počítačem nastavovat nejdůležitější parametry vysílaného signálu. Na straně přijímače byla použita akční kamera GoPro Hero 5 se senzorem CMOS v režimu snímání 120 snímků za sekundu a rozlišením 1080p.

Požítí senzoru CMOS mělo za účel provést zachycení signálu s vícestavovou barevnou modulací vysílaného pomocí výkonové RGB LED diody. Umožnilo však také díky využití efektu rolující spouště mnohonásobně zvýšit maximální možnou modulační rychlost vysílače bez hrozby aliasingu při vzorkování signálu v přijímači. "

Bylo provedeno také měření spektrálního složení světla vyzařovaného výkonovou RGB LED diodou. Při něm bylo zjištěno, že vyzařované spektrální výkony jednotlivých RGB složek nejsou stejné. U všech hodnot nastavení střídavy PWM řídicího signálu z mikrokontroleru o několik procent převládal vyzařovaný spektrální výkon zelené složky. Z důvodu možnosti nastavení teploty chromatičnosti vyzařovaného světla pomocí softwaru mikrokontroleru bylo provedeno měření skutečných hodnot chromatických koeficientů v závislosti teplotě barvy nastavené mikrokontrolerem. Naměřená křivka byla vynesena do diagramu CIE xy a porovnána s křivkou ideálního černého tělesa. I zde se potvrdil posuv vyzařované barvy směrem k zelené části diagramu.

Na závěr byla provedena demonstrace možností vyvinuté VLC testovací platformy včetně úspěšného vyslání, přijetí i dekódování testovací bitové posloupnosti. Celková bitová přenosová rychlost činila 7,7 kbit/s a byla použita 4-stavová barevná modulace s modulační rychlostí 3,85 kBd/s. Výsledná užitečná přenosová bitová rychlost poté vyšla 2.57 kbit/s.

Literatura

- [1] *Vyhláška č. 423/2017 Sb., podle § 150 odst. 2 zákona č. 127/2005 Sb., o elektronických komunikacích a o změně některých souvisejících zákonů.* In: . Sbíрка zákonů Česká republika, b.r. ISSN 1211-1244.
- [2] BELLIS, Mary. Alexander Graham Bell's Photophone Was An Invention Ahead of Its Time. In: *ThoughtCo*. [online]. 2017 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.thoughtco.com/alexander-graham-bells-photophone-1992318>
- [3] STEIGERWALD, D.A., J.C. BHAT, D. COLLINS, R.M. FLETCHER, M.O. HOLCOMB, M.J. LUDOWISE, P.S. MARTIN a S.L. RUDAZ. Illumination with solid state lighting technology. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* [online]. 2002, **8**(2), 310-320 [cit. 2018-05-17]. DOI: 10.1109/2944.999186. ISSN 1077260X. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/999186/>
- [4] PHAM, Anh, Truong THANG, Julian VILLEGAS a Michael COHEN. VLC-based smart supermarket (SMARTKet): Key concepts and enabling technologies. In: *2017 IEEE 6th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)* [online]. IEEE, 2017, s. 1-2 [cit. 2018-05-18]. DOI: 10.1109/GCCE.2017.8229248. ISBN 978-1-5090-4045-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8229248/>
- [5] ARNON, Shlomi. *Visible light communication*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2015. ISBN 9781107061552.
- [6] DARSHITH, T. a Chandana BHATT. Prototyping of a Li-Fi communication system. In: *2017 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)* [online]. IEEE, 2017, s. 1804-1807 [cit. 2018-05-18]. DOI: 10.1109/WiSPNET.2017.8300072. ISBN 978-1-5090-4442-9. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8300072/>
- [7] VITEK, S., J. LIBICH, P. LUO, S. ZVANOVEC, Z. GHASSEMLOOY a N. HASSAN. Radioengineering Journal. *Influence of Camera Setting on Vehicle-to-Vehicle VLC Employing Undersampled Phase Shift On-Off Keying* [online]. 2017, **26**(4), 946-953 [cit. 2018-05-18]. DOI: 10.13164/re.2017.0946. ISSN 1805-9600. Dostupné z: <https://www.pablikado.cz/dokument/Y3IabovUkr0TymfF>

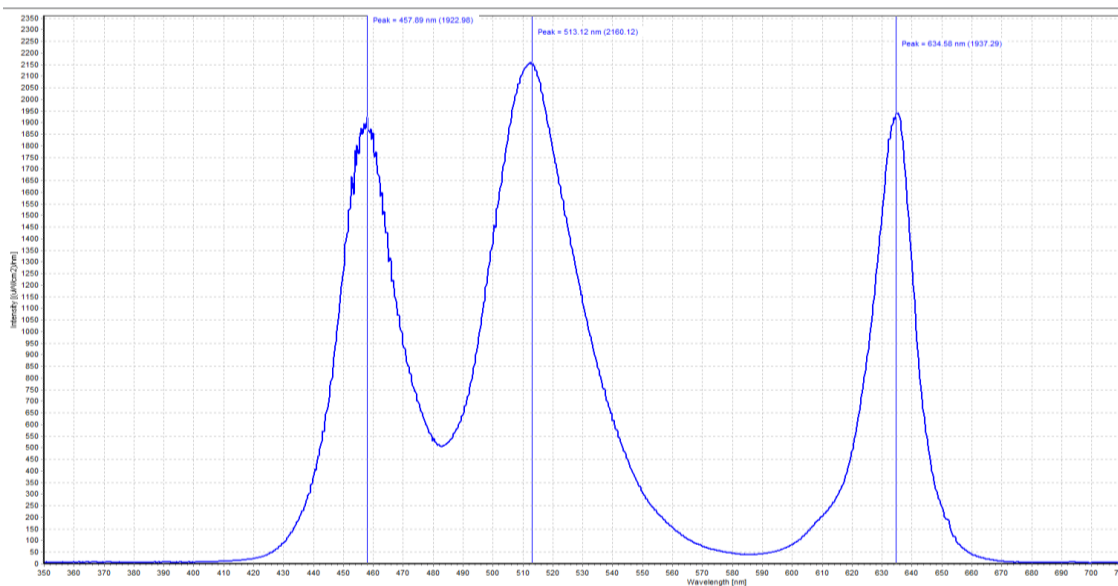
- [8] VLCC: *Visible Light Communications Consortium* [online]. 2007 [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <http://www.vlcc.net/>
- [9] SCHUBERT, E. *Light-emitting diodes*. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2006. ISBN 9780521865388.
- [10] *LED professional: Sensors and Feedback Control of Multi-Color LED Systems* [online]. 2012, (34) [cit. 2018-05-20]. ISSN 1993-890X. Dostupné z: www.led-professional.com
- [11] DENNER, Kerrie. *Lighting flicker health concerns* [online]. In: . 21.11. 2013 [cit. 2018-05-20].
- [12] *OpenKits* [online]. In: . b.r. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://innovo-lb.com/openkits/product/arduino-due/>
- [13] ROBERTS, Richard, Sridhar RAJAGOPAL a Sang-Kyu LIM. IEEE 802.15.7 physical layer summary. In: 2011 IEEE GLOBECOM Workshops (*GC Wkshps*) [online]. IEEE, 2011, s. 772-776 [cit. 2018-05-14]. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2011.6162558. ISBN 978-1-4673-0040-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6162558/>
- [14] Tex: Stack Exchange [online]. In: . b.r. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <https://tex.stackexchange.com/questions/330233/correct-use-of-axis-cs>
- [15] *Bayer filter*. In: Wikipedia [online]. b.r. [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Bayer_filter#/media/File:Bayer_pattern_on_sensor.svg
- [16] ZEITNITZ, Christian. *SoundCardScope* [online]. b.r. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://www.zeitnitz.eu/scope_en
- [17] *GitHub* [online]. In: . b.r. [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: <https://github.com/mpolednik/script.kodi.hue.ambilight/issues/65>

Příloha A

Dodatečné výsledky měření

	Střída řídicího PWM signálu [%]	Barva (vlnová délka [nm])		
		Modrá (458 nm)	Zelená (513 nm)	Červená (635 nm)
Intenzita [($\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$) $\cdot\text{nm}^{-1}$]	0	0	0	0
	20	395	466	379
	40	738	943	783
	60	1131	1398	1173
	80	1510	1826	1537
	100	1867	2177	1927
Spektrální hodnota výkonu [$\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$]	0	0	0	0
	20	9743	16344	7248
	40	19196	33712	15147
	60	29538	50769	22870
	80	39988	67875	30405
	100	50142	83318	38733

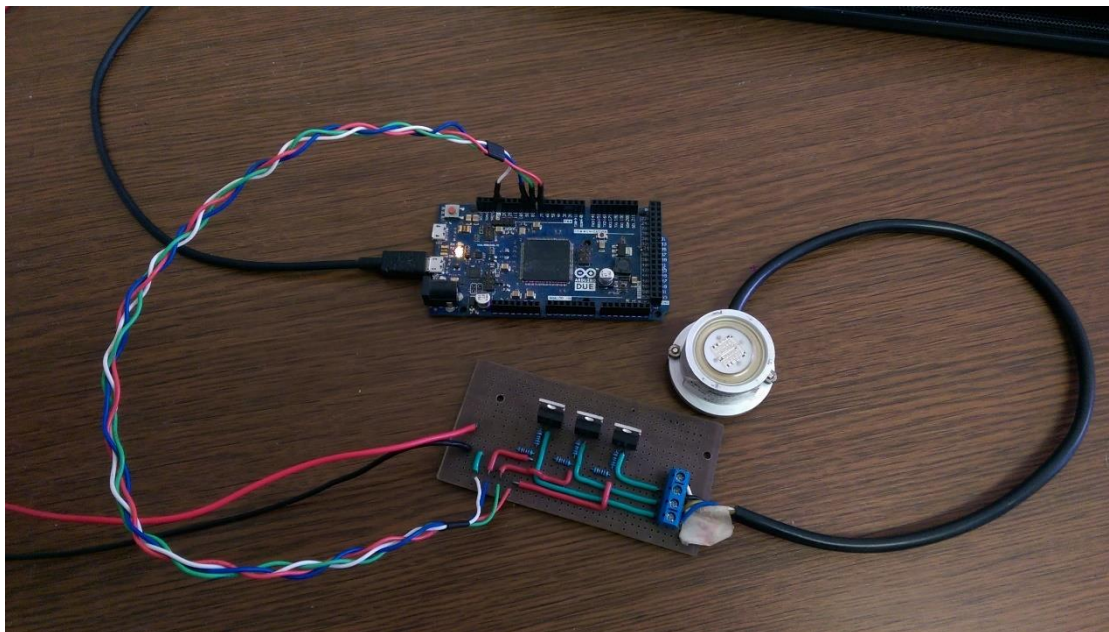
Tab. A.1: Naměřené hodnoty intenzity a spektrální hodnoty výkonu barevných složek RGB LED diody



Obr. A.1: Naměřené spektrální složení výkonové RGB LED se třemi vrcholy odpovídajícími dominantním vlnovým délkám barevných složek RGB - modrá (458 nm), zelená (513 nm) a červená (635 nm).

Příloha B

Fotografie sestaveného VLC vysílače



Obr. B.1: Fotografie sestaveného navrženého vysílače VLC.