

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta elektrotechnická

Katedra elektromagnetického pole
Studijní obor: Elektronika a komunikace



**Porovnání komunikací ve viditelném světle
s detekcí pomocí fotodetektoru a kamery**

**Comparison of visible light communications
with detection based on photodiode and
camera**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vedoucí práce:
Specialista:
Rok:

prof. Ing. Stanislav Zvánovec, Ph.D
Ing. Shivani Rajendra Teli
2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Slezák** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **483907**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Porovnání komunikací ve viditelném světle s detekcí pomocí fotodiodu a kamery

Název bakalářské práce anglicky:

Comparison of Visible Light Communications with Detection Based on Photodiode and Camera

Pokyny pro vypracování:

Zaměřte se na technologie využívající LED k přenosu dat, tzv. visible light communications (VLC). Navrhněte a realizujte dva komunikační VLC spoje, které k příjmu optického signálu využívají jak klasickou fotodiodu, tak optickou kameru. Charakterizujte je a otestujte jejich vlastnosti. Vyhodnotte výhody použití jednotlivých konceptů.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Z. Ghassemlooy, L. Nero Alves, S. Zvanovec and M. Ali Khalighi, Visible Light Communications: Theory and Applications, CRC Press, 2017.
- [2] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandari, Optical Wireless Communications System and Channel Modelling with MATLAB®, Second Edition, Taylor & Francis Group, 2019.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

prof. Ing. Stanislav Zvánovec, Ph.D., katedra elektromagnetického pole FEL

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

Ing. Shivani Rajendra Teli, katedra elektromagnetického pole FEL

Datum zadání bakalářské práce: **21.01.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **21.05.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2022**

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

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
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 zadanou bakalářskou 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

Podpis

Poděkování:

Velmi bych chtěl poděkovat profesoru Ing. Stanislavu Zvánovci, Ph.D za jeho odborné vedení práce, vstřícnost a rady při kompletaci celé práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Shivani Rajendra Teli, která mi byla nápomocna při měření v laboratoři.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se věnuje optickému přenosu dat ve volném prostoru, tzv. VLC (visible light communication). Práce je rozdělena na dvě části. V první části se věnuji teoretickému úvodu do celé problematiky a ve druhé části se věnuji rozboru měření a naměřených hodnot.

V teoretické části jsou popsány základní vztahy mezi jasem, svítivostí, intenzitou a účinností zdrojů světla. Mezi nejčastěji využívané zdroje světla u VLC se využívají LED a OLED pro jejich rychlou odezvu mezi stavy zapnuto a vypnuto (on-off keying) a nízkou pořizovací cenu. Modulací světla, která je popsána v následující kapitole, dosáhneme násobně vyššího využití potenciálu přenosu dat, nežli metodou zapnutí a vypnutí diody. Posledním velmi důležitým prvkem celého přenosu je nepochybně přijímač. Ten rozdělujeme podle způsobu detekce signálu na detekci pomocí kamery, nebo fotodiody. Na závěr jsou zde popsány standardy vyvinuté IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers).

První měření využívalo k detekci signálu kameru. Je to ukázkový příklad využití metody rolling shutter. Maximální bitový přenos byl naměřen 6 kbit / s. Datový přenos je omezen kvalitou kamery, ale přenos byl bezchybný. Druhé měření využívalo fotodiodu. Jednalo se o přenos 70 MHz s metodou modulace on/off keying (OOK).

Klíčová slova:

VLC, komunikace ve viditelném světle, LED, OLED, optický spoj, CMOS, CCD, OCC, OOK, fotodioda

Abstract

The bachelor thesis deals with optical data transmission in free space, so-called VLC (visible light communication). The thesis has two parts. In the first part, I deal with a theoretical introduction to the overall problem. In the second part, I deal with the analysis of measurements and measured values.

The theoretical part describes the basic relationships between brightness, luminosity, intensity, and efficiency of light sources. Among the most commonly used light sources in VLC are LEDs, and OLEDs, widely used for their short response between on and off states (on-off keying). By modulating the light, which I am describing in the following chapter, we achieve a much higher utilization of the data transmission potential than just by a method of only switching the diode on and off. The last element and also very important of the whole transmission is undoubtedly the receiver. We divide it according to the method of signal detection into detection by a camera or photodiode. The thesis ends with the standard description developed by the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

The first measurement used a camera to detect the signal. By this method, we provided an example of using the rolling shutter. We measure a maximum bitrate at 6 kbit / s. The response time limits only the camera quality, but the transmission was errorless. The second measurement used a photodiode. It was a 70 MHz transmission with the on-off keying (OOK) modulation method.

Key words:

VLC, visible light communication, LED, OLED, optical link, CMOS, CCD, OCC, OOK, photodiode

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Komunikace ve viditelném světle (VLC)	4
2.1	Historie.....	4
2.2	Základní fotometrické veličiny	4
2.3	Zdroje světla.....	7
2.3.1	LED.....	7
2.3.2	OLED	8
2.3.3	PLED	9
2.4	Modulace optického signálu	9
2.5	Přijímače světelných signálů	14
2.5.1	Fotodioda	14
2.5.2	Komunikace pomocí kamery (OCC).....	15
2.6	Standardy přenosu.....	17
2.6.1	IEEE 802.15.7.....	18
2.6.2	IEEE 802.11 Light Communication (LC).....	19
2.6.3	IEEE 802.15.13.....	19
2.7	Blokové schéma systému VLC.....	20
3	Měření.....	21
3.1	OCC.....	21
3.2	Měření s fotodiódou.....	28
4	Závěr.....	32
5	Použitá literatura	34

Seznam použitých zkratek

ACO-OFDM - Asymmetrically clipped optical OFDM

CCD – Charge Coupled Device

CMOS – Complementary Metal Oxide Semiconductor

CSK – Color-Shift keying

DC – Direct Current

DCO-OFDM – direct current biased optical – OFDM

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers

IM / DD - Intensity Modulation / Direct Detection

IM / DD – Intensity Modulation / Direct Detection

ISI - Intersymbol Interference

LASER - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

LC – Light Communicatio

LED - Light-Emitting Diode

Li-Fi - Light Fidelity

MAC – Medium Access Control

MIMO – Multiple-Input Multiple-Output

OCC – Optical camera communication

OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OLED – Organic Light Emitting Diodes

OOK - On-OFF Keying

PAM - Pulse Amplitude Modulation

PD - Photodetector

PHY – Physical layer

PLED – Polymer Light Emitting Diode

PPM - Pulse Position Modulation

RF – Radio Frequency

RGB - Red, Green, Blue

VLC – Visible Light Communication

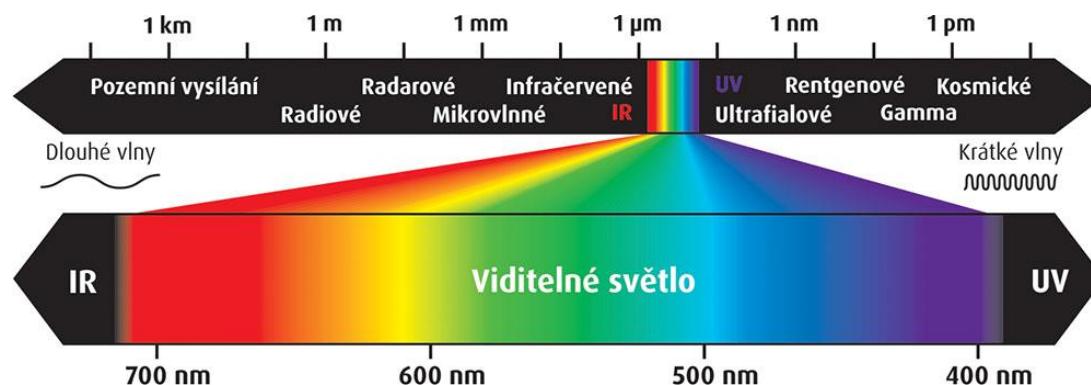
VPPM – Variable Pulz Pozition Modulation

WiFi - Wireless Ethernet Compatibility Alliance

1 Úvod

V dnešní době jsme svědky vysokého nárůstu elektronických zařízení, modernizace a technologického vývoje. Pro lepší a rychlejší funkčnost zařízení, usnadnění života, zlepšení kvality výroby a mnoha dalších využití je důležitá propojenost jednotlivých zařízení mezi sebou. Vyšší propojenost a modernizace zařízení vedou k rostoucí poptávce po rychlejších přenosu dat. Tyto požadavky jsou zatím řešeny pomocí metalického, popřípadě optického vedení. V případě mobilních zařízení jde o přenos pomocí rádiových vln. Rostoucí počet mobilních zařízení a rozvoj sociálních, streamovacích a dalších služeb a sítí, zapříčiňuje nárůst datového provozu. Postupem času se setkáváme s nedostatkem spektra v bezdrátové radiové komunikaci a s navyšujícím se vzájemným rušením jednotlivých zařízení. Rušení zpomaluje datový provoz a zvyšuje tak naši nespokojenost. Jedno z řešení by bylo rozšířit vysílané spektrum. Ačkoli se vždy posuneme o kousek dále, tak do nekonečna to nepůjde. Proto je nezbytné navrhnout zcela nové komunikační řešení a technologie.

Visible light communication (VLC), nebo-li komunikace ve viditelném světle využívá pro komunikaci spektrum viditelného světla od 380 nm do 750 nm. V přepočtu se jedná o šířku pásma od 430 THz do 790 THz. Jeho nespornou výhodou je velká šířka pásma, pro porovnání více než 10 000 krát větší šířka pásma než u aktuálně využívaného vysokofrekvenčního (RF) spektra [2], znázorněno na obr.1. To ale není jedinou výhodou, jelikož k přenosu dat se převážně využívají elektroluminiscenční (světlo vyzařující) diody (LED) a organické LED (OLED) zdroje světla, kterých je na světě několik miliard. To je několik miliard potenciálních vysílačů signálu, které jsou velmi úsporné a všudypřítomné. LED je využíváno od pouličního osvětlení přes světla u aut až po běžné osvětlení doma.



Obrázek 1 – Spektrum vlnových délek [3]

Budoucnost využití:

Jednoznačná využití aplikace VLC budou v prostředích, která jsou neustále osvětlována, jakými jsou například veřejná doprava, lékařské prostory anebo v průmyslných budovách či obchodních centrech. VLC se považuje za vhodnou alternativu bezdrátového vysokorychlostního datového spojení i pro oblasti, kde je nežádoucí, nebo nedostatečný rádiový přenos. Příkladem jsou operační sály, kabiny letadel a další prostory s citlivými přístroji na rádiový signál. Aplikace VLC bude často souviset s bezpečností přenosu dat. Příkladem jsou finanční sektory s vysokými nároky na důvěryhodnost k ochraně soukromých informací před odposlechem.



Obrázek 2 – Ukázka využití světla k propojení elektroniky [4]

Zatím nejvíce rozšířeným je vývoj aplikace VLC pro vnitřní lokalizace a navigaci, zejména ve velkých budovách, jakými jsou obchodní centra, nemocnice, nádraží a nákupní centra. GPS signál uvnitř budov nezachytíte, zatímco všudypřítomné osvětlení nás dokáže lokalizovat vysíláním signálu s rozlišením na několik centimetrů. Je tomu docíleno využitím několika svítidel v kombinaci s přijímací technikou, kterou může být kamera v chytrém telefonu, nebo fotodioda v jakémkoli jiném zařízení [5]. Jednou ze zajímavých využití je i navigační systém pro zrakově postižené uvnitř budov, viz [6].

Ulice, která jsou plná pouličního osvětlení, reklamních displejů a semaforů, by mohla zajišťovat posílání jednoduchých zpráv a reklam. Stejným způsobem by mohla být rozšířena muzea, výstavy a galerie, kde by vám u jednotlivých exponátů byla poslána informace přímo vám na míru, podle toho, co zrovna sledujete viz [7].

Další výjimečnou aplikací může být komunikace pod vodou na krátké vzdálenosti. Zde je to z vysoké části ovlivněno viditelností a útlumem světla vodou. Využívají se zde zdroje světla s modrozeleným spektrem barev. Tímto způsobem by mohlo být jednou docíleno komunikace mezi potápěči, roboty, nebo dokonce ponorkami viz [8].

Cílem mé práce je měření rychlosti přenosu dat ve VLC s porovnáním přijímačů fotodiody nebo kamery, jako senzoru pro příchozí světlo. Dále vás seznámím se zdroji světla, principy senzorů, modulací a také IEEE standardy.

2 Komunikace ve viditelném světle (VLC)

2.1 Historie

Již od starověku se využívaly různé metody pro přenos zpráv na velké vzdálenosti, jako byly například velké ohně, indiáni využívali kouřové signály, Římané pak leštěné kovové desky pro odraz slunečního svitu. Převážně se jednalo o výstražné signály, které měly značit nějaké nebezpečí. Krásným příkladem i v dnešní době je využívání výstražného světla majáku. První maják byl postaven ve 2. století n. l. a světlo z majáku bylo viditelné na vzdálenost desítek kilometrů, aby varoval námořníky na případné útesy.

Koncept komunikace přenášené pomocí světla pochází již z roku 1880, tedy 4 roky před vynálezem rádiového přenosu. Poprvé jej použil A. Graham Bell, když vynalezl takzvaný fotofon (photophone). Přenášela se jím řeč na dlouhé vzdálenosti pomocí modulovaného slunečního světla. Tato myšlenka se ale neuplatňovala z důvodu nedostatku potřebné technologie. Jednalo se o nadčasovou myšlenku. Až roku 2003 byl v Nakagawa Laboratory v Japonsku uskutečněn přenos dat pomocí světla [9].

V roce 2011 Harald Haas zavedl nový termín Light Fidelity (Li-Fi), což představuje vysokorychlostní obousměrný bezdrátový komunikační systém ve viditelném světle. Li-Fi by mělo nahradit Wi-Fi v oblastech kde by mohlo docházet k rušení různých vysokofrekvenčních zařízení.

2.2 Základní fotometrické veličiny

Nejdříve si popíšeme světlo, abychom mohli pokračovat k jeho využívání. Jedním z oborů zabývajícím se světlem, převážně však působením světla na lidský zrak se nazývá fotometrie.. Zabývá se studiem a měřením světla z hlediska působení a vnímání lidským okem.

Světelný tok

Světelný tok neboli světelný výkon, měří sílu vnímaného světla. Načež radiální tok je celkový výkon vyzařovaného světla. Rozdíl mezi nimi je ten, že světelný tok bere v úvahu citlivost oka na jednotlivé vlnové délky světla, ale radiační tok měří veškeré emitované elektromagnetické

záření (včetně infračerveného a ultrafialového). Základní jednotkou je lumen (lm). Lumen je definován jako jednotka světelného toku vyzařovaného ze zdroje, který vyzařuje o světelné intenzitě 1 kandela (cd) v plném úhlu 1 steradián (lumen = kandela na steradián). Steradián je jednotkou prostorového úhlu, který vymezení ze středu jednotkové koule jednotkovou plochu na plášti. Světelný tok může být dán rovnicí

$$\Phi = \int P(\lambda) * V(\lambda)d\lambda, \quad (1)$$

kde λ je vlnová délka, $P(\lambda)$ je funkce radiálního toku závislého na vlnové délce. $V(\lambda)$ je spektrální světelná účinnost (citlivost oka/přijímače) [10].

Intenzita osvětlení

Osvětlení, neboli úroveň světla je hustota světelného toku dopadajícího na jednotku plochy. Základní jednotka je lux (lx), který se rovná lumenů na metr čtvereční. Z toho důvodu je při výběru osvětlení do místnosti důležitější fakt, kolik luxů daný zdroj má, než kolik lumenů vyzáří. Jelikož pro dané místnosti o různých rozměrech se můžou zdát zdroje o stejném světelném toku rozdílné. Platí rovnice

$$E = \frac{\Phi}{S}, \quad (2)$$

kde Φ je světelný tok a S plocha.

Svítivost

Svítivost udává hustotu světelného toku vyzařovaného bodovým zdrojem. Bodový zdroj je takový zdroj světla, který je dostatečně malý a současně pozorován z velké vzdálenosti. Základní jednotkou svítivosti je kandela. Kandela se nachází mezi sedmi základními

jednotkami SI soustavy. Například obyčejná svíčka má svítivost rovnu jedné kandele. Definujeme ji jako svítivost světelného zdroje, vyzařující v daném směru monochromatické¹ záření o frekvenci 540 THz, jehož zářivá intenzita v tomto směru činí 1/683 watů na steradián.

Svítivost v daném směru je dána vztahem

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}, \quad (3)$$

kde Ω je úhel [10].

Jas

Jas popisuje množství světla, které je vyzařováno z objektu, prochází jím, nebo se od něj odráží. Základní jednotka je kandela na metr čtvereční (cd/m^2), z čehož vyplývá, že jas je intenzita světla na jednotku plochy konkrétním směrem. Platí zde rovnice

$$I(\varphi) = \frac{d\Phi(\varphi)}{d\Omega} \quad (4)$$

a

$$L(\varphi) = \frac{I(\varphi)}{dS \cdot \cos(\varphi)}, \quad (5)$$

kde jas $L(\varphi)$ ve směru φ je definován jako poměr světelné intenzity $I(\varphi)$ a jednotkou plochy dS , která se promítá do směru φ [10].

¹ Elektromagnetické záření, jehož zdroj kmitá pouze na jediné frekvenci

Účinnost svítidel

Účinnost charakterizuje energetickou šetrnost svítidla. Hodnota je dána poměrem světelného toku svítidla ke světelnému toku zdrojů umístěných ve svítidlu. Z toho vyplývá, že maximální účinnosti dosáhneme využitím pouze světelného zdroje jako svítidla. Vztah účinnosti je

$$\eta = \frac{\Phi_{sv}}{\Phi_z}, \quad (6)$$

kde Φ_{sv} je světelný tok svítidla, Φ_z je světelný tok všech zdrojů světla a η je výsledná účinnost. Samotný světelný zdroj nemůžeme využít z důvodů nevhodného směřování světelného toku, nedostatečné ochrany před vnějšími vlivy a s ohledem na oslnění. U běžných svítidel se dostáváme k účinnosti v rozmezí od 0,3 – 0,9.

2.3 Zdroje světla

S rozvojem kvality osvětlení a snižujícími se náklady na výrobu LED a OLED se VLC stalo velmi slibnou technologií zajišťující širokopásmový vysokorychlostní bezdrátový přenos a takzvanou zelenou technologií. Pro přenos informace není potřeba vynaložit extra energii, jelikož využíváme ve stejnou chvíli LED, jako zdroj světla a zároveň pomocí něj přenášíme informace, aniž by to oko postřehlo. Důležitým faktorem ve VLC je rychlost přepínání mezi stavy zapnuto a vypnuto. Osvětlení pomocí LED, ale přináší mnoho dalších výhod, jakými jsou například malé rozměry, úspora energií, malé náklady, odolné s dlouhou životností, rychlá odezva, využití pro vnitřní i venkovní prostory a již jich jsou miliardy na světě rozmístěny.

2.3.1 LED

LED využíváme všude kolem nás jako podsvícení, osvětlení, signální světla i obrazovky. Účinnost LED se každým rokem zvyšuje, zatímco náklady na výrobu neustále klesají. Díky rychlému přepínání oproti klasickým žárovkám jsou zejména použitelná pro VLC. Světlo vzniká pomocí P-N přechodu v propustném směru, kdy je elektrická energie přeměněna na elektromagnetické záření. Patří mezi tzv. zelené spotřebiče, kteří šetří životní prostředí,

jsou energicky nenáročné a neobsahují škodlivé látky, které by škodili lidskému tělu nebo přírodě. Dále je tu možnost poměrně snadné integrace infračerveného LED čipu do LED svítidel a tím zajistit nepřetržitý datový tok, i v případě, že jsou světla zdánlivě vypnutá.

Používáme dva způsoby, jak dosáhnout efektivního bílého světla:

White LED, neboli bílá LED je polovodičová dioda modré barvy na bázi nitridu gallitím (GaN), která je potažena fosforem. Pod přivedeným proudem je modré světlo z části absorbováno fosforem a znovu vyzařeno z fosforu jako žlutá fosforescence. Kombinace žluté fosforescence a pronikajícího modrého světla z diody nám dává dohromady bílé světlo [11].

RGB LED je jedním ze způsobů, jak dosáhnout kvalitního osvětlení. Je to kombinace červeného, zeleného a modrého čipu LED. Různou velikostí proudů do jednotlivých čipů můžeme ovlivnit vyzařenou intenzitu každé barvy. Složením vyzařených barev RGB nám vznikají barvy z celého spektra včetně bílé. Pro monitorování a řízení intenzity jednotlivých čipů je nutný zvláštní obvod.

Světelný zdroj dále dělíme na dvě základní technologie podle způsobu vyzařování:

- **Všesměrové** mají širokou oblast pokrytí. Každá mobilní stanice v dosahu pokrytí může přijímat data během pohybu. Dále lze komunikovat i bez přímé viditelnosti pomocí difuze / odraženého světla od stěn a stropů. Bohužel je ale malý přijatý výkon i SNR (odstup šumu od signálu).
- **Směrová** je zaměřena přímo na jednotku. Tím pádem je větší i výkon než u nesměrových. Čelí velké výzvě a tou je mobilita zařízení [12].

2.3.2 OLED

OLED, neboli organická LED obsahuje amorfní nekystalické vrstvy organického materiálu. Rozdílem od bodového zdroje LED, je především v možnosti tvořit větší plochy světelných zdrojů. Fungují podobně jako LED na principu P-N přechodu, ale bohužel jejich účinnost je zatím nižší než u LED. Jako další nevýhodou je jejich menší životnost. Jejich přednost tkví v jejich flexibilitě využití. OLED se pyšní jako dobrý světelný zdroj, odolný při skladování a energicky úsporný. Také patří mezi tzv. zelené spotřebiče, splňující podmínky jako LED [13]. OLED dělíme na pět základních skupin.

Pasivní matice OLED se skládají z pásů katody, organické vrstvy a pásů anody. Katodové pásy jsou kolmé na anodové a jejich průsečíky tvoří pixely, odkud je světlo vyzařováno. Velmi snadná výroba.

Aktivní matice OLED má rychlejší obnovovací frekvenci než pasivní OLED a také spotřebuje méně energie. Anodová vrstva překrývá pole tranzistorů uspořádaných do matic, které ovládají vyzařování jednotlivých pixelů.

Transparentní OLED je průhledný, a to i když je displej zapnutý. Může využívat technologii pasivní i aktivní matice.

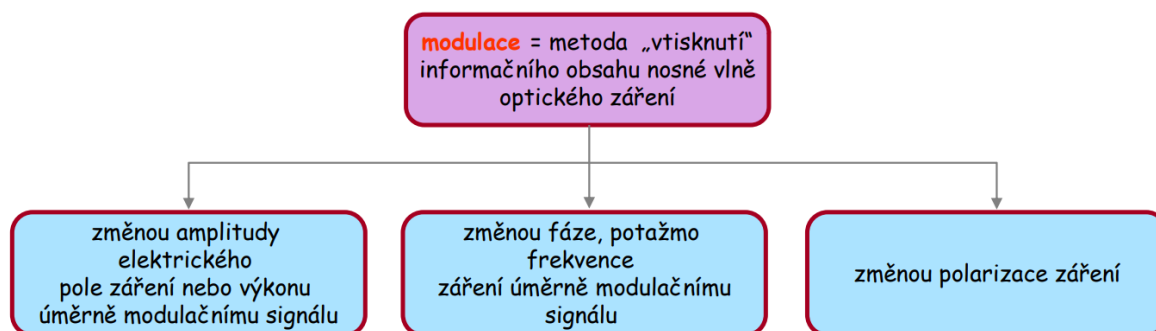
Flexibilní OLED je pro změnu velmi ohebný, lehký a odolný.

2.3.3 PLED

Polymer LED je technologie založená na použití polymeru jako polovodičového materiálu. Toto řešení je velmi atraktivní pro systémy VLC z důvodu velmi nízkých nákladů na výrobu a jejich metodou zpracování. Takzvaná metoda mokrého zpracování² umožňuje výrobu libovolně velké plochy světelného zdroje, kterou mohou být umístěny na flexibilní povrchy. Bohužel ale ve srovnání s LED má několik nevýhod, jakými jsou například nižší optický výkon, odolnost a barevný posun, zejména u modré. Tyto nevýhody se snaží vyrovnat pomocí využití víceúrovňových a více nosných modulačních formátů, které zajišťují vyšší přenosové rychlosti [14].

2.4 Modulace optického signálu

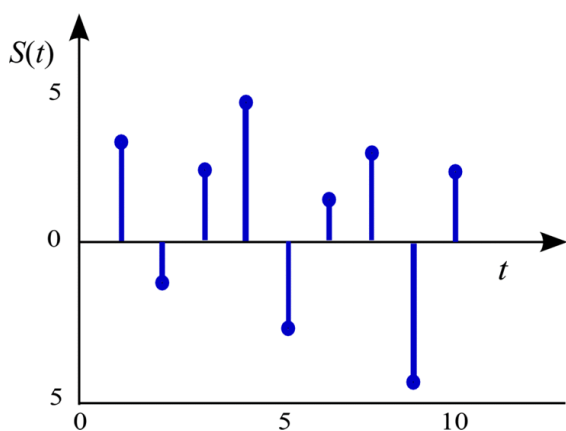
Vzhledem k navyšující se potřebě vyšší kapacity přenosu je důležité řešit spektrální účinnost i u optických systémů.



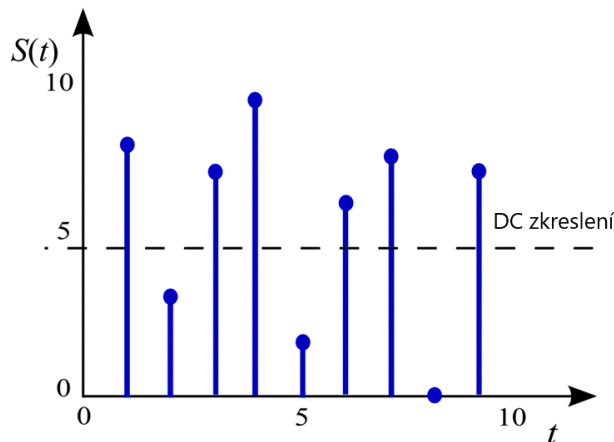
Obrázek 3 – Základní rozdělení druhů modulace [15]

² Metody zpracování: ponorné nanášení, válcování, odstředování, nové inkoustové tiskárny umožňují tisk polymerních zářičů do substrátu

Základní výhodou jsou fyzikální vlastnosti LED a fotodiody umožňující systémy modulace intenzity (výkonu) a přímou detekci (IM / DD) na detektoru. Nevýhodou je, nevyužití možnosti přenosu informace pomocí změny fáze nebo amplitudy. Naopak systémy jako On-OFF Keying (OOK), Pulse Position Modulation (PPM), nebo Pulse Amplitude Modulation (PAM) umožňují využití více faktorů zároveň. Se zvyšující se přenosovou rychlostí následně dochází k Intersymbol Interference (ISI), neboli k mezisymbolovému rušení, kdy jeden symbol ruší následující symboly. Výsledek je stejný, jako by se zde nacházel šum. Odolnějším systémem je například Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM). Jedná se o širokopásmovou modulaci využívající frekvenční dělení kanálu. Podstatou je rozdělení celého frekvenčního kanálu, který je k dispozici pro vysílání na velký počet užších pásem. Datový tok celého kanálu se tímto způsobem dělí na stovky datových toků. Každé z nich je pak využíváno zvlášť s pomalu se měnícím signálem. Změny v signálu zajistí vyšší odolnost proti poruchám, rušení a proti odrazům. OFDM má bipolární povahu, čímž ve VLC vzniká problém, jelikož LED mohou přenášet pouze unipolární signály. Řešením je zavedení stejnosměrného zkreslení, které je energicky náročnější. Na obr. 4 jsou zobrazeny původní vzorky signálu v čase a na obr. 5 je metoda direct current (DC) biased optical OFDM (DCO-OFDM) využívající stejnosměrné DC zkreslení. [16]



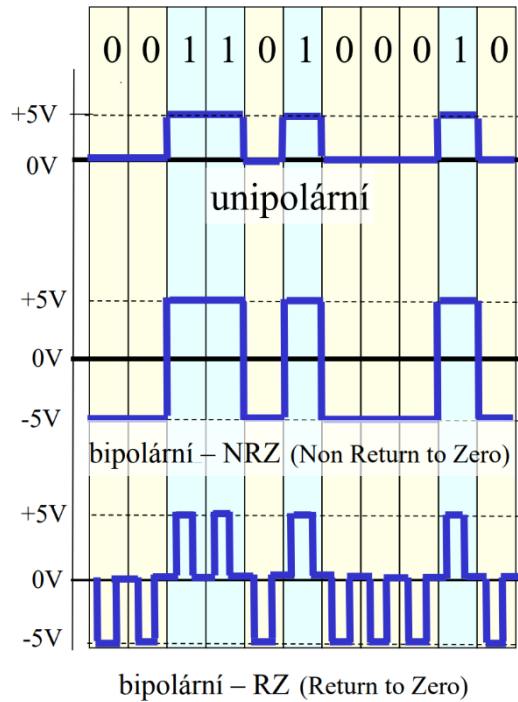
Obrázek 4 – Původní vzorky signálu [16]



Obrázek 5 – vzorky se stejnosměrným zkreslením [16]

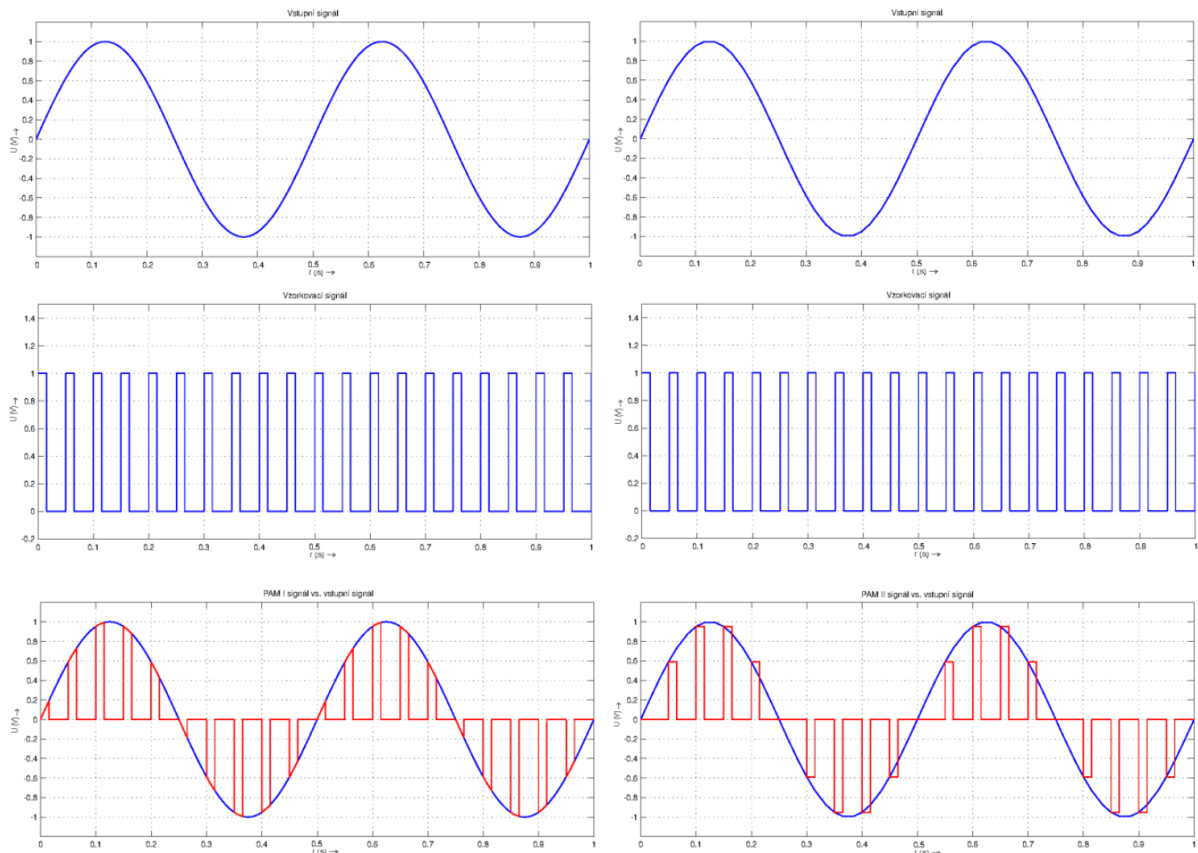
Asymmetrically clipped optical OFDM (ACO-OFDM) je jednou z technik pro získání unipolárních signálů OFDM. ACO-OFDM využívá skutečnosti jisté symetrie mezi kladnými a zápornými hodnotami v čase. Z této znalosti nahrazuje záporné hodnoty nulami. Moduluje pouze liché pomocné nosné. Zkreslení, které vzniká potlačením záporných signálů zapříčiňuje, že ACO-OFDM má poloviční spektrální účinnost oproti DCO-OFDM pro stejný řád modulace.

Oproti předchozím využívá Pulse-amplitude-modulated discrete multitone (PAM-DMT) metodu pulzní amplitudové modulace. Tato metoda nevyžaduje DC zkreslení a jednotlivé všechny subnosné jsou modulovány. Výhodou je, že PAM-DMT má vyšší energickou účinnost než DCO-OFDM a ve frekvenční oblasti může dosáhnout vyššího výkonu než ACO-OFDM [17].



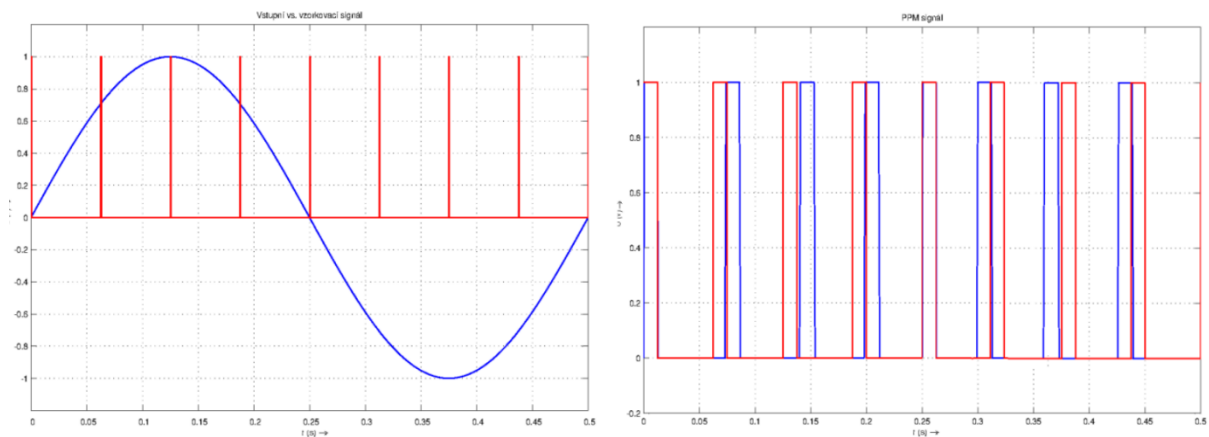
Obrázek 6 – Rozdíl mezi unipolárním a bipolárním kódováním [18]

Grafický přehled modulací PPM, PAM, OOK a OFDM signálu



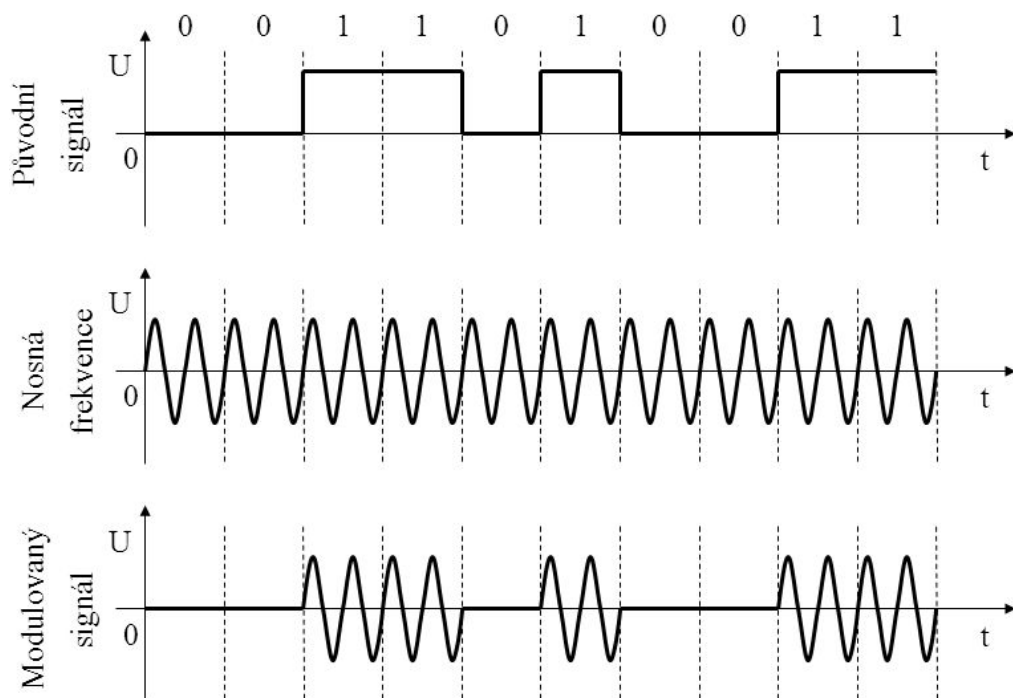
Obrázek 7 – PAM modulace metodou přirozenou a flat plot [19]

Zjednodušeně se dá říct, že metoda PAM je pouze vzorkování daného signálu.



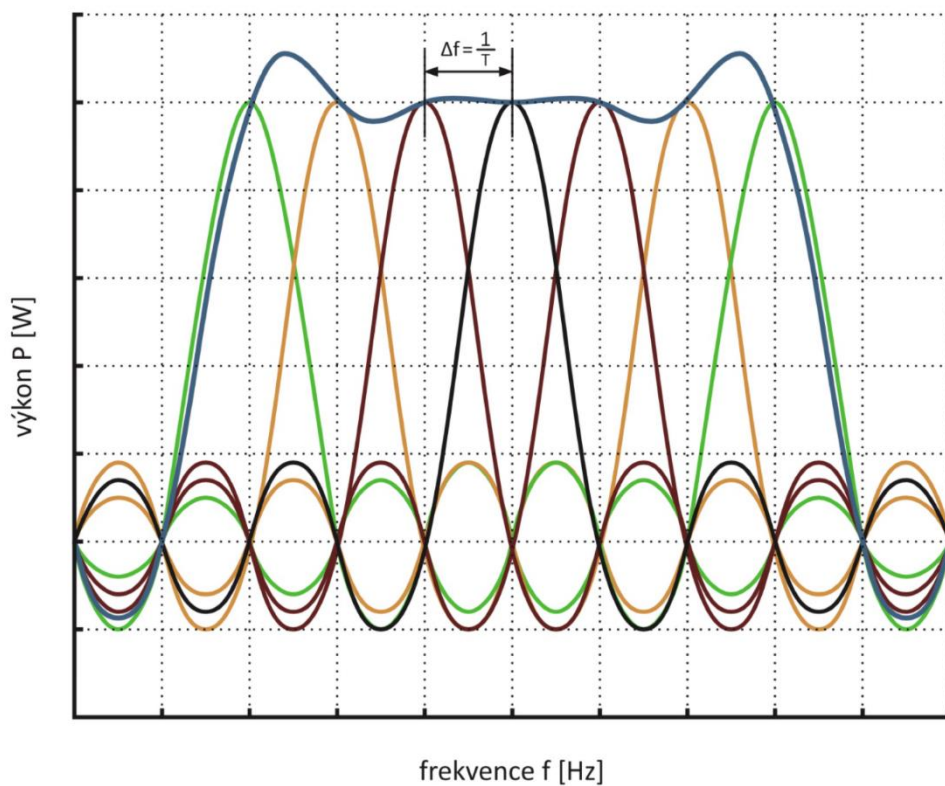
Obrázek 8 – PPM modulace [19]

Je-li hodnota vstupního signálu vyšší než rozhodovací úroveň, pak se pulzy výstupního signálu zpožďují o přímo úměrnou hodnotu ke vstupnímu signálu. V opačném případě předbíhají původní signál.



Obrázek 9 – OOK modulace [20]

Z obrázku jasně vyplývá zapínání a vypínání přenosu signálu.



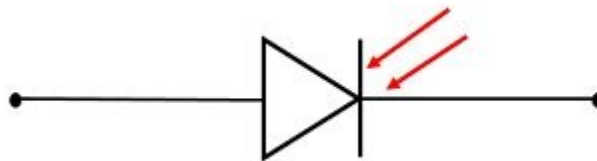
Obrázek 10 – OFDM, uspořádání jednotlivých pomocných kanálů [21]

2.5 Přijímače světelných signálů

Přijímače se liší podle způsobu a potřeby využití. V zásadě lze senzorové systémy rozdělit na dva typy: systémy založené na fotodiodě a systémy s kamerou. Ačkoli fotodiody mají vysokou citlivost na světlo a jsou levné, tak bohužel většina přenosných zařízení není vybavena fotodiodou, ale kamerou. Další výhodou kamer ve srovnání s fotodiodou je, že kamera umí oddělit jednotlivé světelné zdroje od sebe. To má využití například při určování polohy v interiéru.

2.5.1 Fotodioda

Fotodioda je polovodičová součástka upravená tak, aby do P-N přechodu pronikalo světlo a tím se generoval proud. V případě že P-N přechod není osvětlen, je její voltampérová charakteristika stejná jako u běžné diody. Často je známá také pod názvy fotodetektor nebo fotosenzor.



Obrázek 11 – Schematická značka fotodiody

Fotodioda pracuje na principu, který se nazývá fotoelektrický jev. Foton dopadající na P-N přechod předá svou energii elektronu ve valenční vrstvě atomu. Elektron, který absorbuje tuto energii je vymrštěn pryč z valenčního pásu do vodivostního a na jeho místě vzniká díra. Takto vzniklé volné elektrony jsou nosiči náboje, čímž se zvyšuje vodivost polovodiče. Fotodioda má velmi rychlou odezvu na světlo přibližně v řádech 10^{-6} až 10^{-9} vteřiny. Mezi další důležité parametry fotodiody patří:

- Citlivost / responzivita senzoru
- Šířka pásma
- Temný proud
- Maximální závěrné napětí
- Parazitní kapacita
- Velikost senzoru

Kapacita fotodiody nám určuje dynamické vlastnosti. Parazitní kapacita je příčinou omezení mezního kmitočtu, proto se snažíme o co nejmenší hodnotu kapacity. Ta je závislá na závěrném napětí. Toto napětí pomyslně zvětšuje oblast mezi deskami kondenzátoru a tím zmenšuje vlastní kapacitu. Vlastní kapacita je dána rovnicí

$$C_D = \frac{C_{D0}}{\sqrt{1 + \frac{U_R}{\varphi_B}}}, \quad (7)$$

kde U_R je závěrné napětí, C_{D0} je počáteční kapacita bez závěrného napětí. φ_B je difuzní napětí závislé na teplotě a C_D je výsledná kapacita. [22]

Maximální závěrné napětí ukazuje hodnotu napětí, které dioda v opačném směru udrží, aniž by se prorazila.

Temný proud (Dark Current) je tepelně generovaný náboj na fotodiodě, na kterou nedopadá světlo. Hodnota proudu roste s rostoucí teplotou diody, závěrným napětím a ziskem diody.

Velikostí senzoru je míněna fotocitlivá plocha, na kterou dopadá světlo. Čím větší tato plocha je, tím je senzor dražší, ale také citlivější.

Šířku pásma je důležité zvolit správně, podle druhu aplikace, ve které bude dioda využívána. Zbytečně široké pásmo zhoršuje poměr odstupů signál – šum.

2.5.2 Komunikace pomocí kamery (OCC)

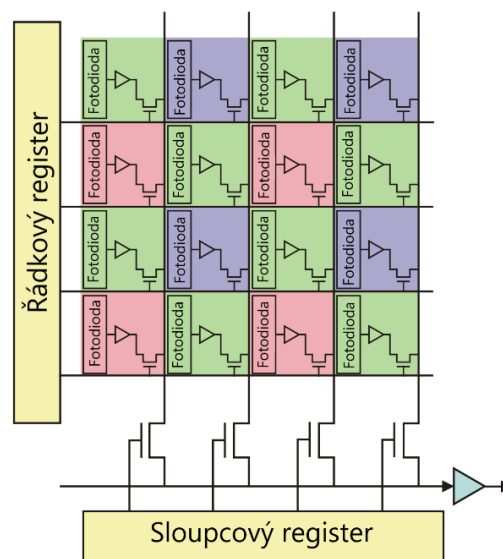
Optical camera communication (OCC) je technologií nabízející slibné řešení ve VLC pro přenosná zařízení. Ve světě máme více než šest miliard předních a zadních kamer v chytrých telefonech, existující infrastrukturu kamer na semaforech, lampách i ve vozidlech. Všechny tyto kamery jdou využít jako přijímač OCC. Pro OCC byl vytvořen standard IEEE 802.15.7r1, který upřesňuje architekturu snímače, synchronizace, datové rychlosti, zkrácení perspektivy, blikání a stmívání, MIMO (více vstupů více výstupů) a další parametry jsou ještě studovány. OCC nepodporuje vysokorychlostní propojení z důvodu omezení rychlosti snímání kamer, lze jej ale použít v mnoha jiných aplikacích s nízkou rychlostí přenosu dat,

jako například při určování polohy v interiérech, navigace mobilních robotů, komunikace vozidel, identifikační informace a popřípadě pro reklamy.

Datové rychlosti jsou omezeny snímkovou frekvencí sensorů. Datová rychlost lze zvýšit použitím kamer s vyšší snímkovou frekvencí, které jsou nákladné. Proto se hledají různé možnosti, jakou je například právě technologie MIMO za účelem zvýšení datové rychlosti. Vyšší rychlosti lze také dosáhnout pomocí hybridního modulačního schématu založeného na intenzitě, vlnové délce, fázi a frekvenci.

Převážně se využívají dvě hlavní technologie pro obrazové senzory: CMOS (complementary metal-oxide semiconductor) a CCD (charge coupled device).

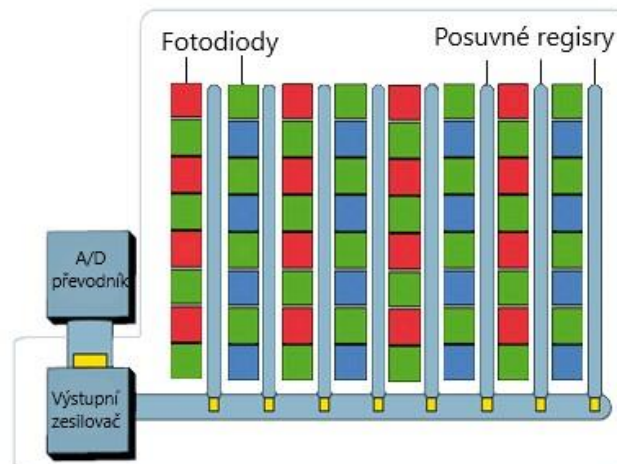
CMOS senzory obsahují obvody pro digitalizaci na každém jednom pixelu (obr.8). To má za příčinu kratší dobu zpracování signálu, menší spotřebu energie a také menší rozměry čipu. Má to i své nevýhody. Obvody na každém jednom čipu zmenšují prostor pro fotocitlivou plochu senzoru. Přijímaný signál vyžaduje vyšší zesílení a tím je i zvýšen případný obrazový šum.



Obrázek 12 – Obrazový senzor CMOS [23]

CMOS struktura se dělí podle zpracování signálu na aktivní a pasivní senzory. Senzor se zesilovačem u každé fotocitlivé buňky se označuje za aktivní, tímto způsobem je možné jednotlivé buňky zesilovat individuálně a tím lépe eliminovat šum. Zatímco pasivní senzory mají zesilovače umístěny u sloupcových registrů. Z čehož vyplývá, že celý sloupec buněk je zesilován stejnou hodnotou.

CCD čte signál z jednotlivých buněk postupně po řádcích. Využívá schopnost transportovat signál skrze různé buňky, aniž by utrpěla kvalita signálu. Tímto způsobem se informace přesune až na okraj, kde je umístěný posuvný registr, který pak signál předává do analogově-digitálního převodníku (obr.9). Sensory CCD jsou dražší, citlivější a kvalitnější, co se týče obrazu.



Obrázek 13 – Obrazový senzor CCD [24]

Tím nejdůležitějším rozdílem mezi CCD a CMOS je typ uzávěrky. Ta se dělí na dva typy: **global shutter** a **rolling shutter**. Rolling shutter, který je využíván u CMOS senzorů znamená, že jednotlivé řady pixelů jsou detekovány v různý čas za sebou. Posun mezi expozicemi jednotlivých řádků může být okolo 10 μ s. Naopak v metodě global shutter využívané u CCD jsou vystaveny záření všechny pixely najednou. To umožňuje zachytit i rychle se měnící událost v takzvaném „freeze frame“. [25]

2.6 Standardy přenosu

Jakákoli technologie musí splňovat v dnešní době různé standardy. Je tomu tak z důvodů, abychom sjednotili výrobky jednotlivých firem pro danou technologii. Některé předpisy zohledňují působení na naše zdraví, jiné si dávají záležet na technickou stránku produktu. U přenosu různých signálů z různých zařízení je důležité zajistit ochranu proti vzájemnému rušení a zároveň kompatibilitu jednotlivých zařízení mezi sebou. Z tohoto důvodu vznikl neziskový Institut elektrotechnických a elektronických inženýrů (IEEE), který podporuje vzestup technologie a stal se leadrem ve vývoji průmyslových standardů. Organizace vydala více než 900 platných standardů.

2.6.1 IEEE 802.15.7

IEEE prozkoumal potenciál této novější technologie, která zatím neměla žádné normy či technická doporučení, a proto byla představena norma IEEE 802.15.7, kterou schválili v červnu 2011. Touto normou je definována fyzická vrstva (PHY) a řízení přístupu k médiu (MAC). Standart slibuje dostatečné datové rychlosti pro sledování videí a poslechu hudby.

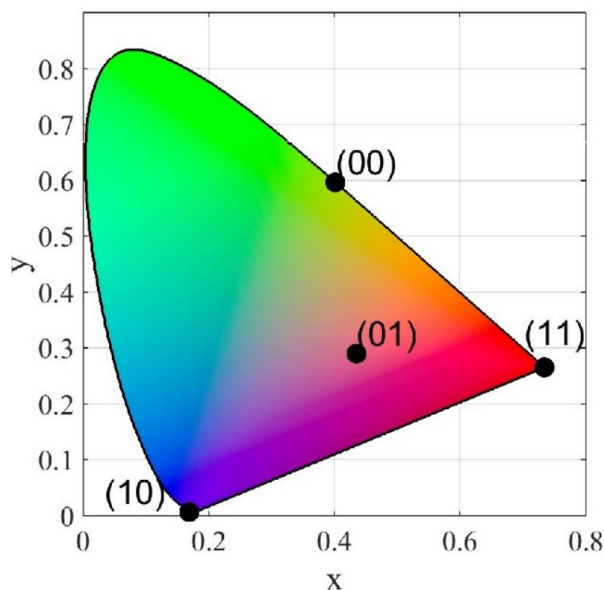
Standart IEEE 802.15.7 podporuje typy fyzické vrstvy jako PHY I, PHY II a PHY III. PHY I a PHY II jsou definovány pro jeden světelný zdroj s modulací signálu on-off (zapnuto-vypnuto) a podporují variabilní pulzní poziční modulaci (VPPM). Pro více světelných zdrojů je definována PHY III pomocí tzv. Color-shift keying (CSK) [16]. CSK znamená modulaci intenzity komunikace viditelného světla prostřednictvím variace RGB barev, avšak bez postřehnutí pouhým okem. Snižuje potenciální komplikace pro lidské zdraví spojené s kolísáním intenzity světla [26].

PHY I je určen pro nízký datový přenos v řádu desítek kb / s. Využití je převážně pro venkovní aplikace a z důvodu možných drsných venkovních podmínek potřebuje zřetelné kódování.

PHY II je pro datové rychlosti v řádech desítek Mb / s s využitím ve vnitřních prostorech.

PHY III je také pro datové rychlosti v řádech Mb / s, je ale určen pro aplikace s více světelnými zdroji a přijímači. Zařízení, která implementují standart IEEE 802.15.7 PHY III by také měla implementovat režim PHY II [27].

CSK modulace využívá více barevné zdroje světla pro zakódování informace mícháním barev. Do každého stavu odpovídajícímu součtu intenzit z vlnových délek je možné zakódovat symbol více stavové CSK modulace. Podmínkou je využití modulačních frekvencí vysoko nad vnímání lidského oka.



Obrázek 14 – Mapování symbolů 4-CSK na barevném modelu CIE XYZ [28]

2.6.2 IEEE 802.11 Light Communication (LC)

Zde se jedná pouze o dodatek pro nově se rozšiřující trend VLC s příchodem LED světél. Musely být specifikovány základní parametry a změny oproti IEEE 802.11. Rozsah IEEE 802.11 LC je omezen na:

- Omezení pásma na 380 nm až 5 000 nm
- Minimální propustnost jednoho spojení u všech režimů PHY dosahují 10 Mb / s a alespoň jeden provozní režim dosahující propustnosti jednoho spojení 5 Gb / s
- Interperabilita, neboli schopnost vzájemné spolupráce různých zařízení s různými šířkami pásma modulace [29]

2.6.3 IEEE 802.15.13

Definuje optické bezdrátové komunikační systémy pro vysoké bitové rychlosti (10 Gb / s) na vzdálenost až 200 m. Systém je určen pro komunikaci point-to-point, nebo point-to-multipoint. Dále systém splňuje speciální omezení například pro průmyslové, nebo lékařské prostředí. Dále nabízí bezpečné a vysokorychlostní komunikační spojení pro prostředí, kde se nehodí provozovat rádiové spojení. Standard definuje tři konkrétní PHY:

Nízkopásmové PHY: určeno pro levná optická rozhraní s průměrnými datovými rychlostmi.

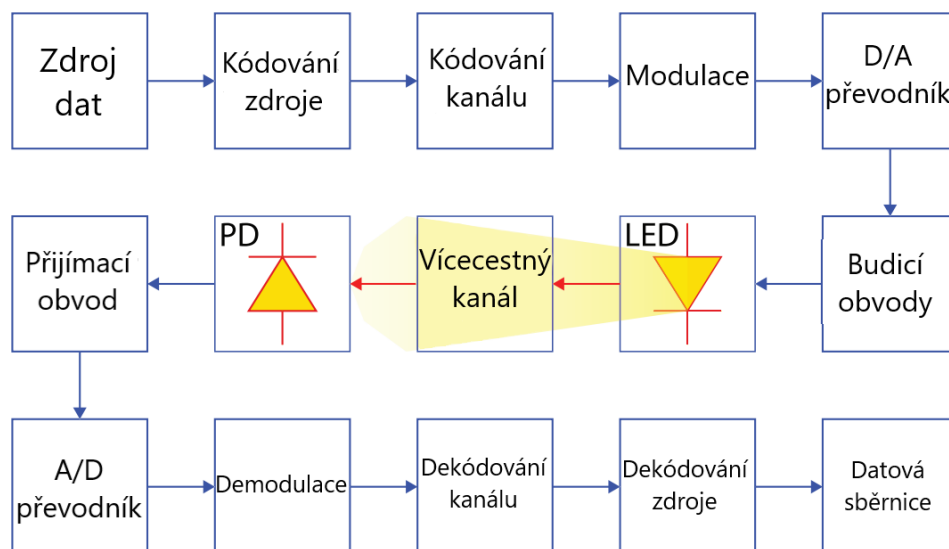
Širokopásmová PHY: určeno pro pokročilá optická rozhraní se středně vysokými datovými rychlostmi.

Pulzní modulace PHY: určeno pro pokročilá optická rozhraní s nízkými až středními datovými rychlostmi.

Dále definuje vrstvu pro řízení přístupu k médiu (MAC), která může pracovat nezávisle na jiných rádiových systémech v případě výpadku viditelnosti [30].

2.7 Blokové schéma systému VLC

Blokové schéma zahrnuje sled událostí od zdroje dat až po jejich příjem a zpracování. Zjednodušeně je tento sled událostí vyobrazen na obrázku 11. Data, která se přenášejí procházejí kódováním. Tato komprimace pomáhá proti chybám kanálu vyvolané šumem a interferencí s jeho kódem. Přehled moderních kodeků je popsán v literatuře [31]. Data jsou následně modulována a převedena z digitálního formátu na analogový pomocí digitálně analogovému převodníku. Modulace signálu má zásadní vliv na přenosové parametry optického spoje. Analogová data přivedena na budící obvod LED jsou zesilována a pomocí předpětí stejnosměrného proudu se docílí nezáporných hodnot signálu. Fotodioda (PD) přijímající světelný signál přemění na napětí, které je zesíleno a přeloženo pomocí analogově digitálního převodníku. Nakonec jsou data demodulována z kanálu a dekódována ze zdrojového kódu tak, aby mohla být využita [32]. Ze schématu na obr. 10 vychází drtivá většina vědeckých prací, které se zabývají návrhem nových modulačních formátů, optimalizací řídicích obvodů pro řízení LED či vhodnými metodami příjmu signálu. Cílem je, aby bylo dosaženo vysoké přenosové rychlosti, nízké chybovosti či snížených nároků na výpočetní výkon komunikačních obvodů.

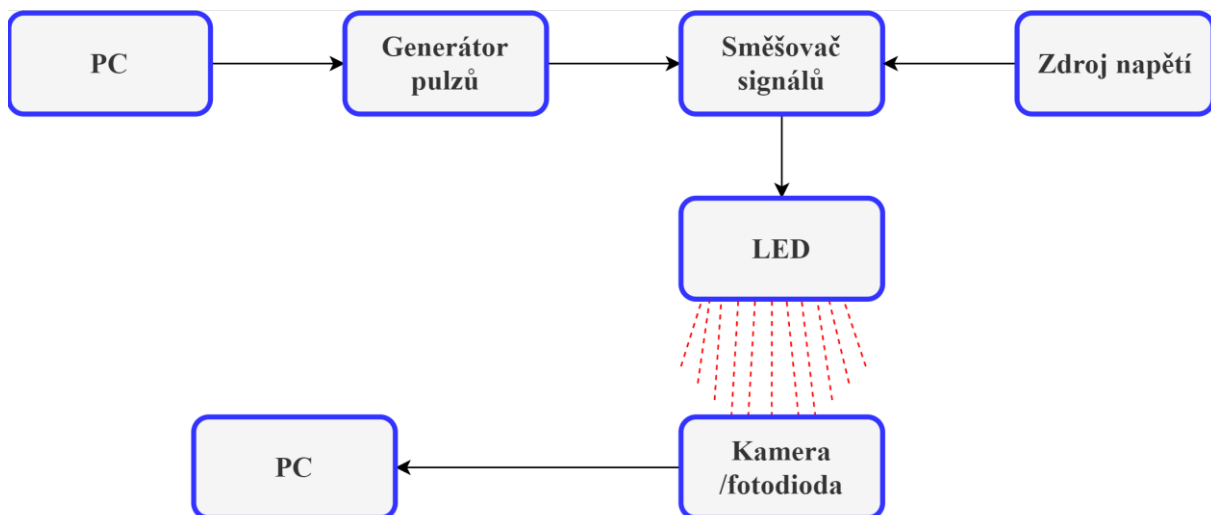


Obrázek 15 – blokové schéma systému VLC [32]

3 Měření

Byly navrženy dvě základní sestavy pro přenos dat pomocí VLC. První sestava využívá pro přenos LED modul a signál je zachycován pomocí kamery. Druhá sestava využívá červenou LED, kdy simuluje přímé spojení vysílače a přijímače. Jako přijímač při druhém měření je využita fotodioda. Měření by mělo demonstrovat vhodnost využití dané technologie pro přenos dat.

Schéma zapojení přístrojů jsou pro obě měření ve své podstatě stejná. Z počítače bude pomocí softwaru vysílána informace o tom, jaké pulzy má pulzní generátor vysílat. Signál z generátoru bude vstupovat do Bias-T (směšovače) a bude podpořen dostatečným napětím, aby LED mohla správně vysílat. Rozdíl mezi kamerou a fotodiódou je důležitost zaměření diody. Proto si u systému s fotodiódou pomůžeme čočkami, které nám usměrní světlo přímo na fotodiodu. Poté bude snímaná informace převedena zpět do počítače a vyhodnocena úspěšnost přenosu.



Obrázek 16 – Schéma zapojení

Obě měření probíhaly v laboratořích při ideálních podmínkách vzhledem k okolnímu rušení.

3.1 OCC

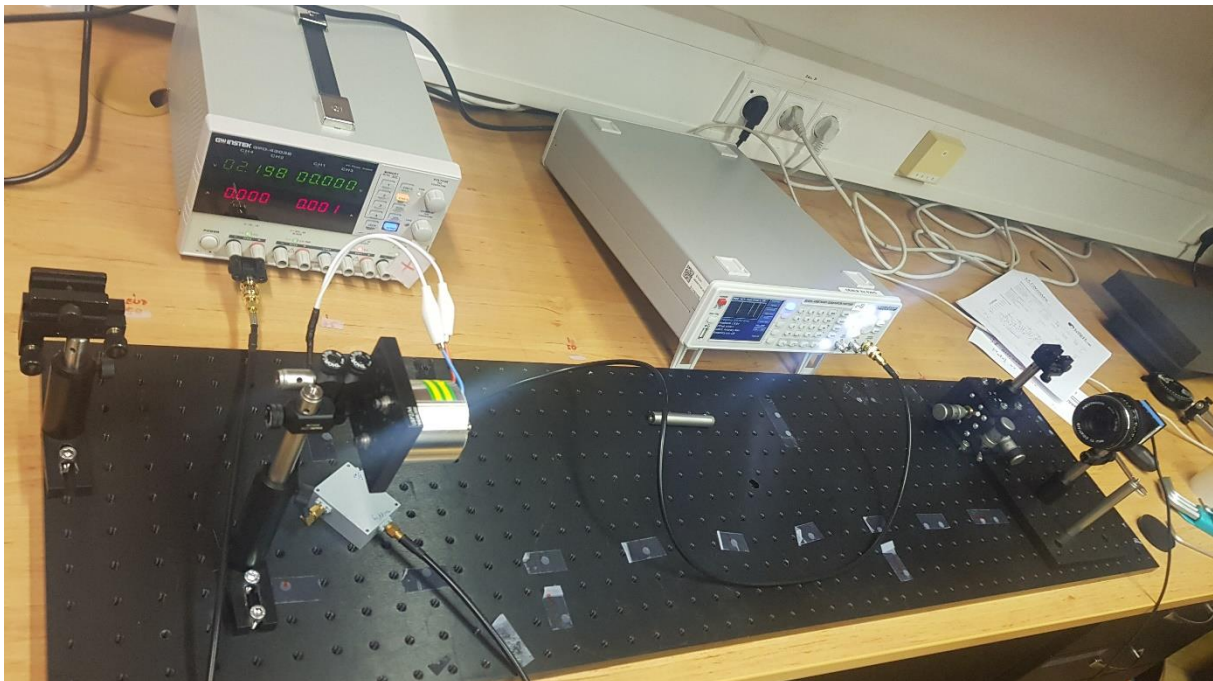
Prvním měřením bylo OCC, neboli systém využívající pro detekci signálu kameru. Vysílal jsem takzvané pakety, které mohou obsahovat různý sled bitů. Každý můj packet obsahoval sled šesti bitů [1,1,0,0,1,0]. Znalost sledu bitů byla využita ke kontrole přenosu a nalezení chyb. Vysílač od přijímače byl vzdálen 90 cm a poté také 140 cm. Toto není jediný parametr, který lze měnit. Dále jsem měnil vysílanou frekvenci z 300 Hz postupně na 600 Hz. Byla také možnost měnit jas diody pomocí napětí. Dioda pracuje v rozmezí 2,7 V až 3,5 V při 10 μ A. Ačkoli jsem

si to vyzkoušel, tak efekt byl velmi podobný jako zvětšit vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem. Využívaná kamera měla rozsah rychlosti snímání 25 fps až 50 fps³. Tento parametr se měnil v softwaru, pomocí kterého jsem data přijímal.

Přehled využitých přístrojů:

- Zdroj napětí GW instek GPD - 4303S
- Generátor pulzů – Arbitrární generátor HMF 2550
- LED – LA CW20WP6
- Kamera – DFK 72 BUCO 2
- Bias-T

Pro zachycování dat z kamery jsem využil software IC Capture 2.4 a pro zpracování těchto dat jsem využil software MATLAB.



Obrázek 17 – Sestava pro měření přenosu snímaného kamerou

³ fps (frames per second), neboli snímková frekvence, lze definovat jako kolikrát se změní obraz za 1 sekundu.

Nejdříve bylo nutné si správně zaostřit kameru na diodu. Pokud bych ale zaměřil kameru přímo na diodu, měl bych příliš ostrý obraz a přenos by nešel rozklíčovat. Proto byla kamera zaměřena na zeď za diodou a poté natočena na diodu. Pomocí softwaru bylo vyfiltrováno okolí, díky čemuž dokážeme rozklíčovat daný přenos i pouhým okem (viz obr. 13).

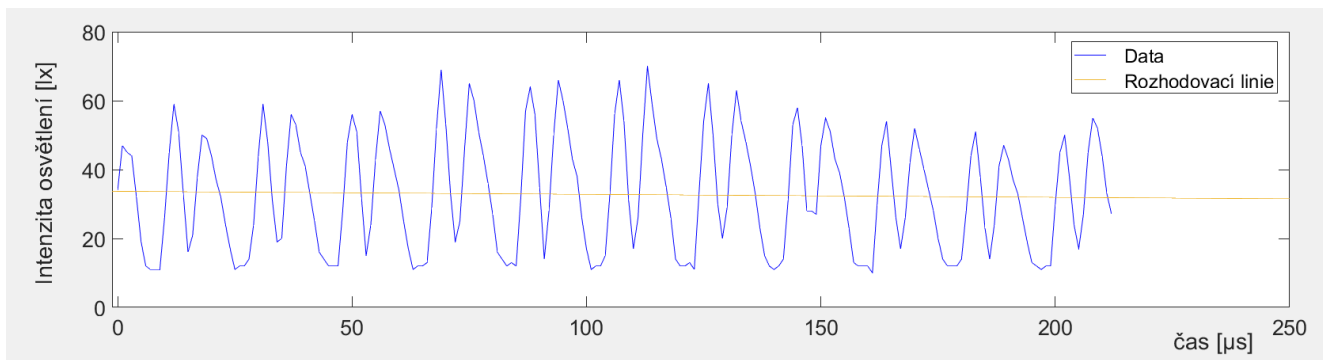


Obrázek 18 – Vyfocení LED po úpravě softwarem

Odpověď na otázku, proč se díváme na pruhy a co značí je snadná. U OCC využíváme typ uzávěrky **rolling shutter**. Rolling shutter snímá jednotlivé řádky pixelů v různý čas. Proto se nám na jedné fotce, v takzvaném rámci, zobrazí hned několik bitů najednou.

U obr. 13 byly nastaveny tyto parametry: vzdálenost 90 cm, napětí 2,2 V, amplituda 1,2 V, frekvence 300 Hz a snímková frekvence 25 fps. Slabá viditelná linka značí bit 1 a slabá černá linka bit 0. Silné linky jsou poté zdvojené slabé linky. Když se podívám na přenášejší paket [1 1 0 0 1 0] pak vidím, že se v jednom rámci přenesl desetkrát. To znamená, že při 25 fps, neboli 25 snímkách za vteřinu jsem změřil bitovou propustnost 1,5 kbit/s.

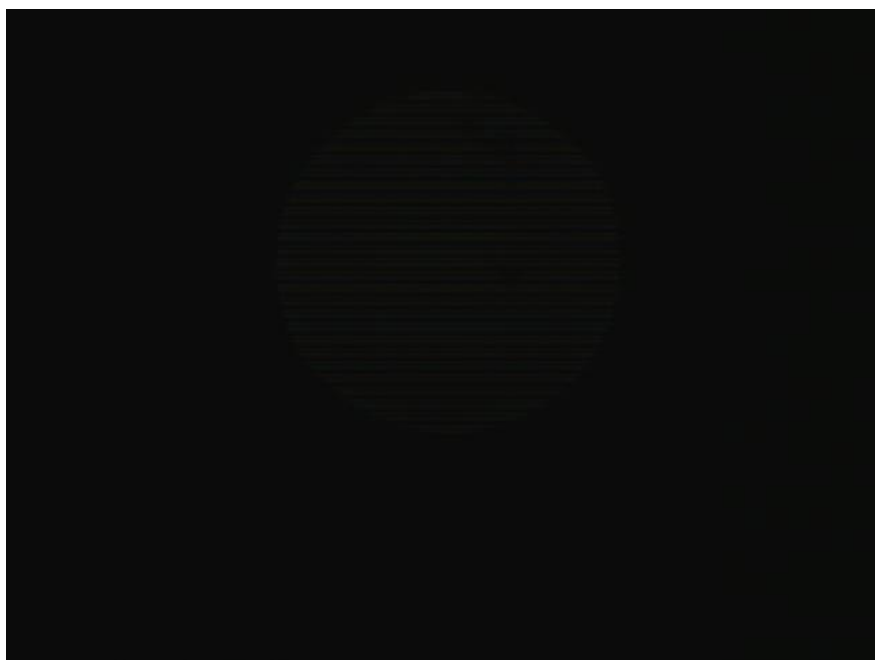
Pro následnou kontrolu, zda celý přenos proběhl beze ztrát, byl zpracován v programu Matlab. Přenesený signál je zobrazen na obr. 14, kde rozhodovací úroveň rozdělující hodnoty na bity 1 a 0 byla stanovena jako střední hodnota signálu. V případě širších oblouků na 11 a 00. Obvykle bývají 2 rozhodovací úrovně a hodnota mezi úrovněmi je nedefinována, pro OCC jsme nastavili hodnotu jednu.



Obrázek 19 – Graf přeneseného signálu

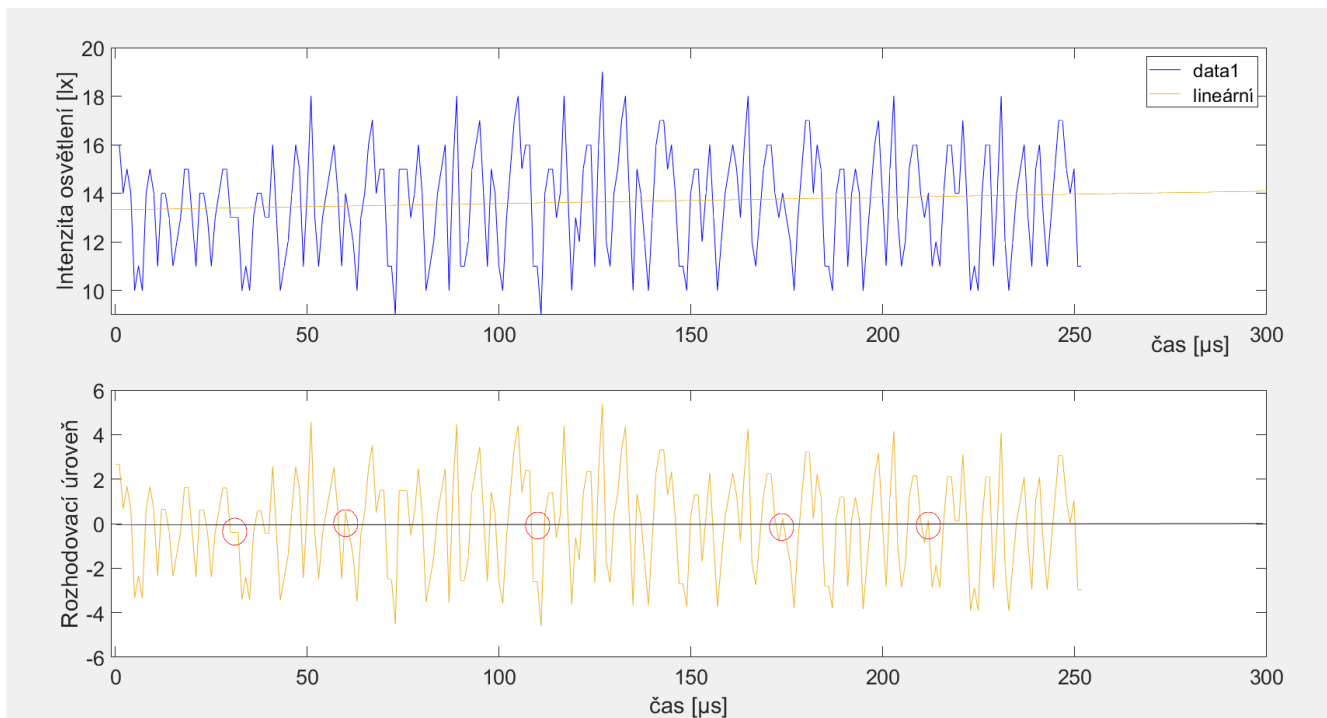
Graf nevykazuje v přenosu žádné chyby.

Pro porovnání obr. 15, na kterém je jen slabě viditelná LED, díky vysoce sníženému jasu diody.



Obrázek 20 – Fotografie LED při sníženém jasu

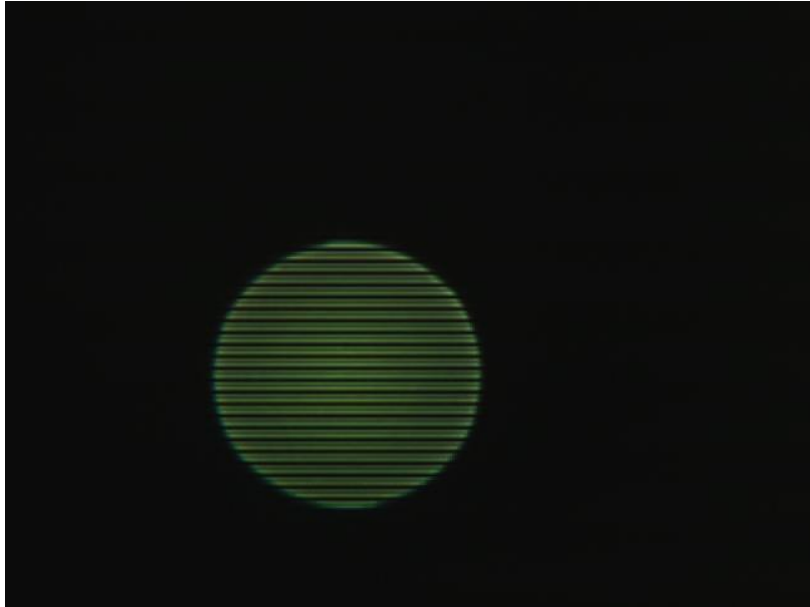
Parametry byly nastaveny na frekvenci 600 Hz, napětí 2,2 V, amplituda 1,2 V, vzdálenost 140 cm a snímková frekvence 25 fps. Na obrázku toho lidským okem moc nevidíme, a proto je důležitý graf signálu na obr. 16.



Obrázek 21 – Přenos za sníženého jasu diody

Vznikly zde dva důležité faktory. První je snížení intenzity dopadajícího záření na kameru a druhým jsou vyznačená místa červenými kroužky. To jsou místa, ve kterých hodnota na grafu neodpovídá hodnotě přenášeného bitu. V případě výpočtu chybovosti víme, že na jeden snímek se díky dvojnásobné frekvenci zobrazí dvojnásobek přenesených paketů (tedy 20). Při 20 paketech bylo přeneseno 120 bitů. Na grafu (obr. 16) bylo nalezeno 5 chyb a několik sporných bodů. Tudíž chybovost je okolo $4,17 \cdot 10^{-2}$. Pro přesné výpočty chybovosti bychom potřebovali razantně větší objem přenesených dat.

Bez nesnížení jasu, by snímky měly výrazně lepší parametry, viz obr. 17 a následně komunikace s takovými parametry přenesla 100 % bitů správně.



Obrázek 22 – Fotografie při ideálním jasu

Parametry zůstaly stejné, ale softwarově byl jas vyladěn lépe než na minulém obrázku. Aktuálně je vidět 20 přenesených paketů a při 25 fps vychází bitový přenos 3 kbit/s. Bitový tok můžeme zvýšit například i zvýšením rychlosti snímání na 50 fps. Toto jsou maximální parametry pro rychlost snímání obrazu touto kamerou.

Další velmi zajímavou aplikací bylo využití difuzního prostředí v blízkosti diody viz obr. 18. Za difuzní prostředí je považováno takové, které je částečně průsvitné a rozptyluje světelný paprsek na všechny strany. V přírodě je příkladem mlha. Já jsem využil plastovou poloprůsvitnou desku.

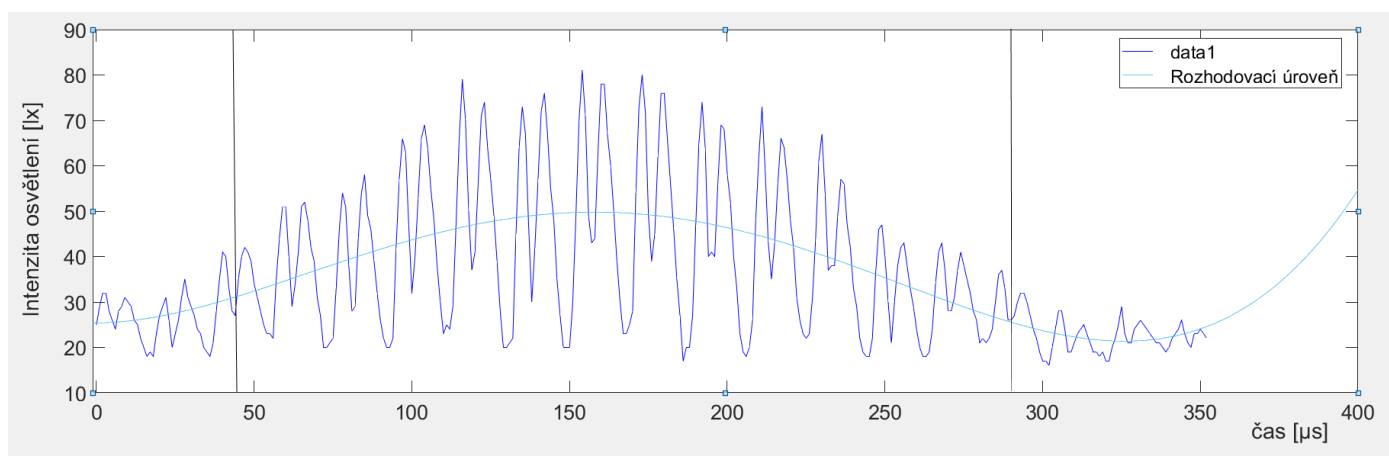


Obrázek 23 – Přenos s difuzním prostředím

Rozptýlením svazku světla se zvětší plocha snímaná kamerou, díky které můžeme dosáhnout v OCC vyššího datového toku. Samozřejmě toto nelze aplikovat všude, ale pro mé poměrně ideální laboratorní podmínky ano. Tudíž počítám s krátkou vzdáleností a k tomu malým vnějším rušením.

Vzdálenost byla zvolena na 140 cm, napětí 2,2 V s amplitudou 1,2 V a frekvence 300 Hz. Je patrné snížení jasu a rozprostření obrazu na větší plochu. Difusní prostředí má své výhody i nevýhody. Mezi výhody patří zvětšení snímané plochy, ze které se zachytávají data a tím i zvýšení datového toku. Na druhou stranu nevýhodami jsou zajisté snížení intenzity jasu a vyšší míra šumu.

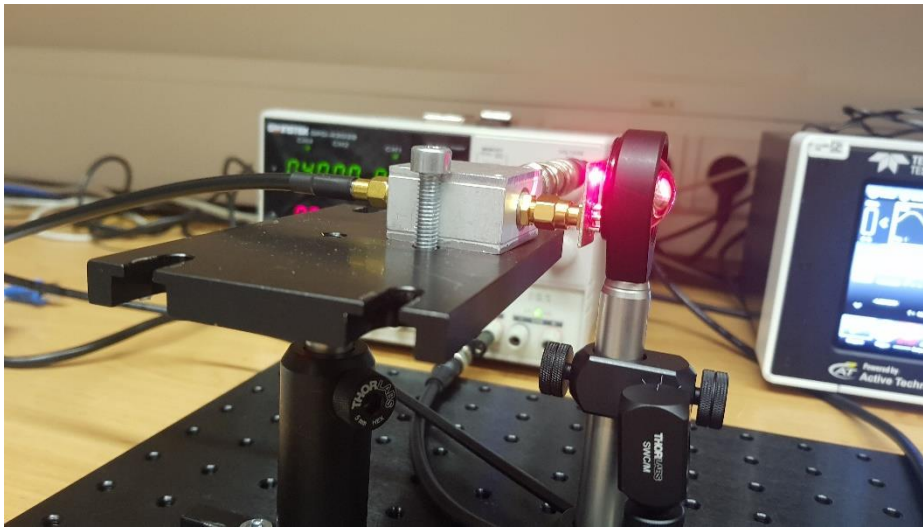
Na obr. 18 lze odečíst 15 přenesených paketů. Pro přesné určení přenesených paketů využijeme graf intenzity dopadajícího záření na kameru (obr. 19). Vyznačil jsem oblast, ve které byl signál dostatečně silný. V této oblasti byl přenos bez jediné chyby a přeneseno bylo 12 paketů. Při stejných parametrech bylo bez difusní desky přeneseno na jeden frame (rámeček) 10 paketů. Pro shrnutí, difusní deska před diodou nám zvýšila pro naše podmínky bitový tok o 20 %.



Obrázek 24 – Graf intenzity záření přenosu s difusní deskou

3.2 Měření s fotodiódou

Pro toto měření byla využívána na jedné straně červená LED a na druhé straně fotodióda. Červená LED je využita z důvodu dlouhé vlnové délky 630 nm. Zde hrálo velikou roli správné zaměření LED přímo na fotodiódu a toho bylo docíleno pomocí dvou usměrňovacích čoček. Jedna z čoček byla umístěna v blízkosti červené diody a druhá čočka v blízkosti fotodiody (viz obr. 20 a obr. 21).

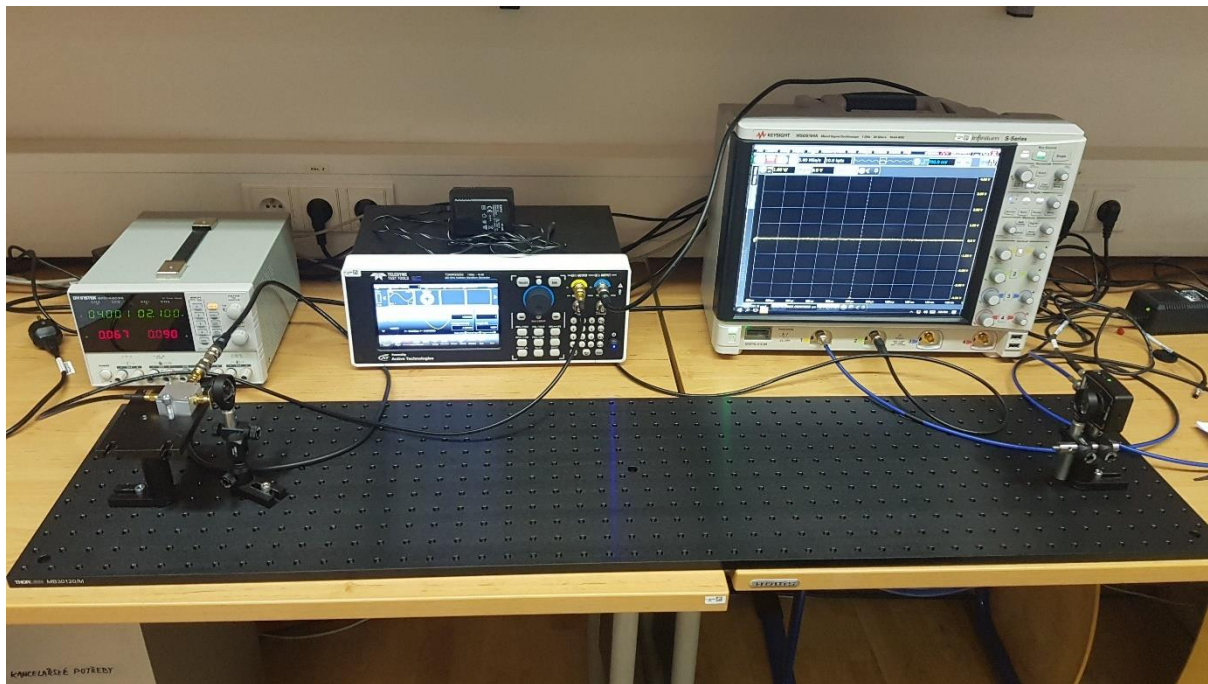


Obrázek 25 – Čočka pro usměrňování červené diody



Obrázek 26 – Čočka pro usměrňování světla do fotodiody

Zásadním rozdílem mezi metodami snímání fotodiódou a kamerou je, že fotodióda je jednobodový senzor. Tudíž dokáže snímat pouze zapnutou a vypnutou diodu. Samozřejmě dokáže snímat i kolísání jasu diody. Pro jednoduchost jsem signál přenášel pomocí metody on / off key (OOK) frekvenční rychlostí 70 MHz na vzdálenost 90 cm.

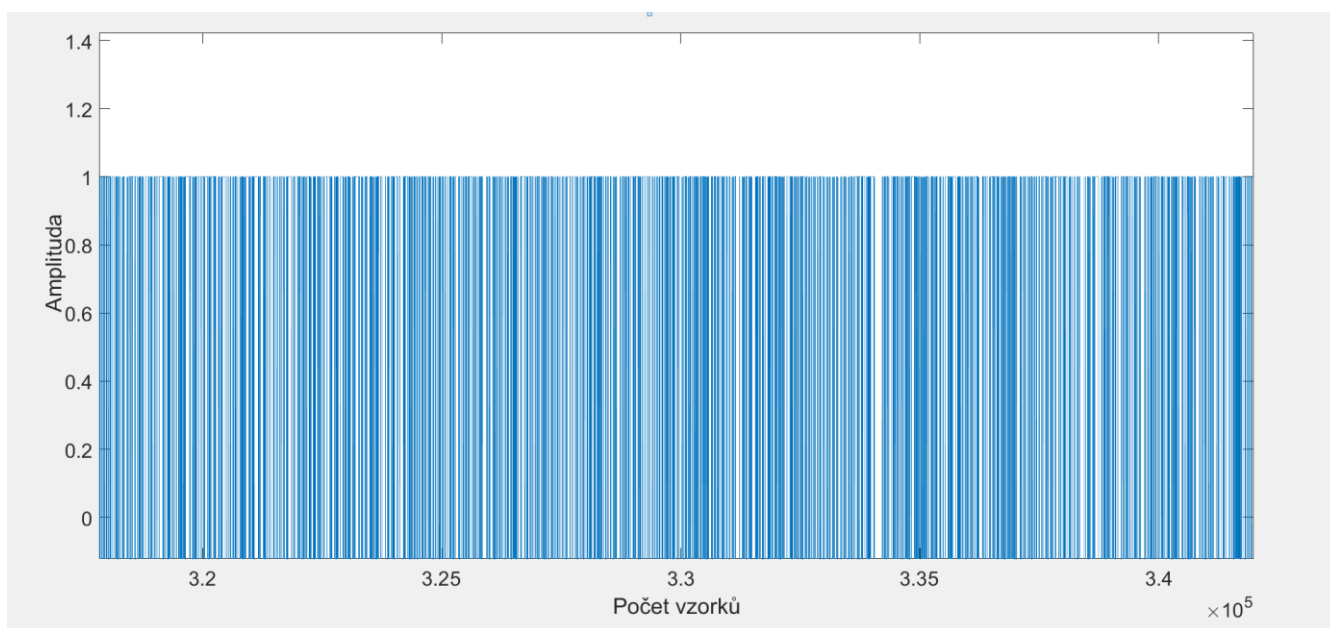


Obrázek 27 - Sestava pro měření přenosu snímaného fotodiódou

Pro měření byly využity tyto přístroje:

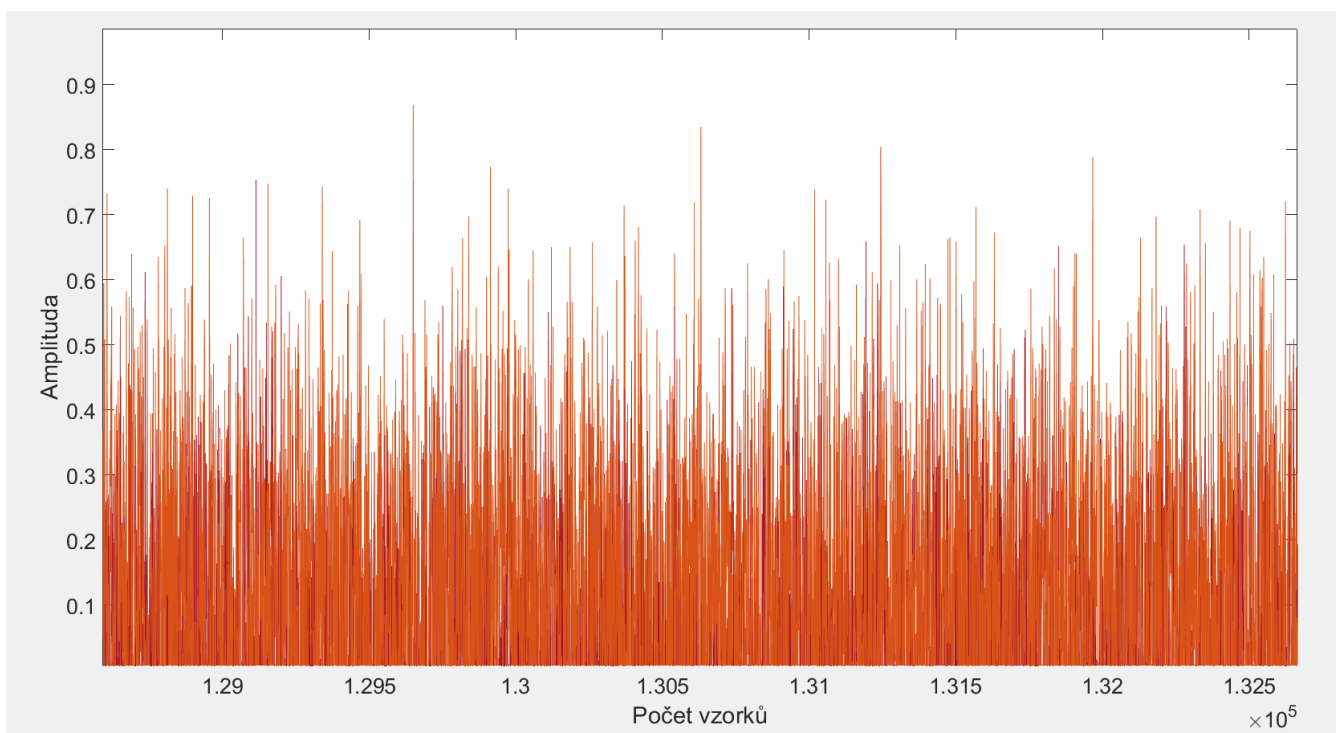
- Červená LED – Vishay VLMS1500 – GS08
- Fotodióda – PDA10A2
- 2 čočky – LMR1/M
- Generátor – TELEYNE T3AWG3252
- Zdroj napětí – Gw instek GPD – 4303s
- Osciloskop – KEYSIGHT – MS0S 104A
- Směšovač signálu

On / Off keying patří mezi nejzákladnější a nejjednodušší metody amplitudové modulace, který se využívá při vysokofrekvenčním přenosu. Vypnutím diody, neboli vypnutím přenosu na určitou dobu se signalizuje binární 0 a naopak puštěním plného výkonu po určitou dobu se signalizuje binární 1. Někdy se také mění doba trvání binární 1 a 0, pomocí čehož se přenášejí další informace. OOK je spektrálně efektivnější metodou modulace než modulace s frekvenčním posunem, přitom je ale náchylnější na šum.



Obrázek 28 – Vysílaný signál pomocí OOK

Probíhalo vysílání signálu střídavým zapínáním a vypínáním diody o frekvenci 70 MHz. Během přenosu světla volným prostorem dochází k útlumu intenzity světla tzv. free space path loss. Doslova se jedná o útlum elektromagnetické vlny důsledkem rozptylu vlny do prostoru. Na obr. 29 je viděn přenesený signál obsahující šum z okolního osvětlení a útlumem volného prostoru sníženou amplitudu signálu. Zpracované signály i výpočty byly prováděny pomocí softwaru Matlab.



Obrázek 29 – Snímek zachyceného signálu fotodiodou

Pro přesnější určení správnost signálu jsem využil porovnávací (matched) filtr. Filtr se získá korelací známého zpožděného signálu, nebo pomocí šablony, která je hledána v neznámém signálu. Takový filtr je ideální pro maximální odstup signálu od šumu (SNR).

Z matched filtru vyplývá, že přenesený signál se rovná signálu přijatému s poměrem středních hodnot 0,1929 a rozptylem 0,0208.

Nevýhodou celé metody snímání fotodiodou je, že nelze využít difusního rozptylu, jako například u předešlé metody snímání, který v tomto případě naopak snižuje amplitudu signálu a zhoršuje SNR. Naopak můžeme využít vyšších frekvencí signálu a tím docílit vyššího datového toku.

4 Závěr

V této práci jsem studoval bezdrátový přenos komunikace pomocí světla ve volném prostoru, takzvané VLC (visible light communication). Teoretické znalosti o fungování a historii VLC jsou popsány v první polovině práce. Druhá polovina práce se zaměřuje na měření optického spoje pro přenos dat ve volném prostoru. Měření jsou rozdělena podle metody detekce signálu na OOC (detekce pomocí kamery) a na detekci pomocí fotodiody.

Důležitým prvkem je zvolení správného zdroje světla. U VLC se využívá převážně LED a OLED, ale vzhledem k použití v praxi se také například používá PLED a další. Využití diod v systému VLC je nezbytné, pro jejich dobré energetické vlastnosti, možnosti modulace světla, ale také především pro rychlou odezvu mezi stavy zapnuto a vypnuto. Způsob modulace, nebo detekce signálu jsou opět závislé na druhu použití.

Prvním způsobem detekce signálu bylo využití kamery. Tento způsob je velmi spekulovaný pro využití VLC v přenosných zařízeních, například v telefonech. Možnosti využití jsou v obchodech, obchodních centrech, ve skladech, venku na chodníku, v muzeích zkrátka kdekoli, kde by nám pomocí osvětlení přicházely do telefonu data pro cílenou reklamu, navigaci, nebo jen informace o tom na co se zrovna díváme. Navrhl jsem optický spoj mezi LED a kamerou na krátkou vzdálenost 90 cm – 140 cm při laboratorních podmínkách. Na mé měření působilo minimální okolní rušení cizími zdroji světla. Využíval jsem kameru s maximální snímkovou rychlostí 50 FPS a maximální frekvencí 600 Hz. Mé měření dokazuje funkčnost VLC, kdy jsem vysílal sled bitů [110010] a přijímal je bez chyby ve stejném pořadí. Maximální dosažená bitová rychlost bylo 6 kbit / s. Povedlo se mi navýšit bitový tok pomocí difusní desky umístěné v blízkosti diody až o 20 %. Difusní prostředí rozšiřuje snímanou plochu, což vedlo k onomu zvýšení datového toku. Problém ale nastává se zvýšeným šumem, níženým jasem a nevhodnosti využití na větší vzdálenosti. Pro mé měření byly tyto nevýhody zanedbatelné.

Druhým způsobem detekce bylo pomocí fotodiody. Systémy s fotodiodou jsou určeny pro vysoké datové toky a nejčastěji využity pro point to point systémy. Fotodioda má výhodu, že dokáže snímat vysoké vysílané frekvence změny světla. To nám umožňuje vysílat i poměrně vysoké datové toky v řádech Gigabitů. Využití může nastat v prostorech, kde by radiové vlny mohly způsobit rušení jiných citlivých přístrojů, nebo ve finančních sektorech, kde potřebují zajistit vysokou bezpečnost při přenosu dat, ale přesto mít vysoký datový tok. Další využití jsou velké výrobní linky, které se plní různými roboty, kteří potřebují dostávat různé instrukce a stovky kilometrů kabelů se nemají už kam vejít. V mém měření jsem navrhl podobný optický spoj jako s využitím kamery, ale využíval jsem vysokofrekvenční

přenos 70 MHz s modulací signálu on / off keying. Správnost přenesených bitů byla ověřena pomocí srovnávacího filtru, který vyfiltroval rušení a porovnal vysílaná data s obdrženými daty z fotodiody. Přenos opět probíhal bez chyb.

Celá má práce je úvodem do problematiky VLC, která je velmi obsáhlá a pro každé technologické odvětví je zkoumána zvlášť a stále můžeme nacházet nové modifikace tohoto systému s novými využitími. Je to technologie perspektivní s vysokým potenciálem využití.

5 Použitá literatura

- [1] GHASSEMLOOY, Zabih, Luis Nero ALVES, Stanislav ZVÁNOVEC, Mohammad-Ali KHALIGHI. *Visible light communication – theory and applications* [kniha]. 2017. New York: Taylor & Francis Group. ISBN: 978-1-4987-6753-8. Dostupné z: <https://www.routledge.com/Visible-Light-Communications-Theory-and-Applications/Ghassemlooy-Alves-Zvanovec-Khalighi/p/book/9780367878108>
- [2] KHAN, Ullah Latif. *Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges* - ScienceDirect. [online]. 2017. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352864816300335>
- [3] DUŠEK, Jiří. *MegaBlog – UV Lasery, Zelené lasery* - Magazín [online]. 2012. Dostupné z: <https://www.mega-blog.cz/lasery/zelene-a-uv-lasery/>
- [4] TROUSIL, Pavel. *LiFi: širokopásmový přenos dat prostřednictvím světla – CHIP* [online]. 2018. Dostupné z: <https://www.chip.cz/obrazky/anotace/lifi-sirokopasmovy-prenos-dat-prostrednictvim-svetla.gif>
- [5] GROBE, Liane, Anagnostis PARASKEVOPOULOS, Jonas HILT. *High-speed visible light communication systems* [online]. 2013. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6685758>
- [6] NAKAJIMA, Madoka, Shinichiro HARUYAMA. *New indoor navigation system for visually impaired people using visible light communication – Springer Link* [online]. 2013. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1186/1687-1499-2013-37>
- [7] UDTEWAR, Shailaja, Delroy DSOUZA, Anugrah AGHAMKAR. *Visible Light Information System for Museums* [online]. 2019. Mumbai, India. Dostupné z: <http://www.ijsrp.org/research-paper-0219/ijsrp-p8602.pdf>
- [8] MIRAMIRKHANI, Farshad, Murat UYSAL. *Visible Light Communication Channel Modeling for Underwater Environments With Blocking and Shadowing* [online]. 2017. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8119913>
- [9] JOHN, Charles. *Visible Light Communication-History, Working & Applications. 2000+ Electronic Circuits, Projects, Tutorials & More* - CircuitsToday [online]. Dostupné z: <https://www.circuitstoday.com/visible-light-communication>

- [10] QIU, Yang, Hsiao-Hwa CHEN, Wei-Xiao MENG. *Channel modeling for visible light communications – wireless communications* [online]. 2016. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/wcm.2665>
- [11] LAM, Kin-Tak, Wei-Heng LIN, Shih-Chang SHEI. *White-Light Emission From GaN-Based TJ LEDs Coated With Red Phosphor* [online]. 2016. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7506249>
- [12] XIONG, Mingliang, Qingwen LIU, Gang WANG. *Resonant Beam Communications: Principles and Designs* [online]. 2019. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8875710>
- [13] KUNIĆ, Srećko, Zoran ŠEGO. *OLED technology and displays - IEEE Conference Publication* [online]. 2012. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6338465>
- [14] BURTON, Andrew, Alessandro MINOTTO, Paul Anthony HAIGH a další. *Optoelectronic Modelling, Circuit Design and Modulation for Polymer-Light Emitting Diodes for Visible Light Communication Systems* [online]. 2019. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8798790>
- [15] BOHÁČ, Leoš. *Metody v moderních přenosových systémech* [online]. 2010. ČVUT-FEL, katedra telekomunikační techniky. Dostupné z: <http://ozeas.sdb.cz/panska/4A/optika/Bohac.pdf>
- [16] TSONEV, Dobroslav, Sinan SINANOVIC, Harald HAAS. *Novel Unipolar Orthogonal Frequency Division Multiplexing (U-OFDM) for Optical Wireless* [online]. 2012. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6240060>
- [17] HUANG, Nuo, Jun-Bo WANG, Jiangzhou WANG. *Receiver Design for PAM-DMT in Indoor Optical Wireless Links* [online]. 2014. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6930738>
- [18] PETERKA, Jiří. *Základy datových komunikací* [online]. 2012. Univerzita Karlova, Praha. Dostupné z: <https://www.earchiv.cz/l224/gifs/S3604.pdf>
- [19] ŠIŠKA, Martin. *Impulzové modulace* [online]. 2013. VUT v Brně. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=68045
- [20] KORF, Jindřich. *Digitální modulace* [online]. SlidePlayer. 2021. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2784455/>

[21] *Modulace s více nosnými kmitočty* [online]. Moderní modulační metody a jejich aplikace. Dostupné z: <https://publi.cz/books/234/02.html>

[22] ŠTASTNÝ, Martin. *Širokopásmový transimpedanční zesilovač pro fotodiodu* [online]. VUT v Brně, 2019. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=190906

[23] *CMOS Image Sensor Mechanism Illustration.svg* [online]. 2020. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CMOS_Image_Sensor_Mechanism_Illustration.svg

[24] *Blog UVB* [online]. 2014. Dostupné z: <http://uvbblog.blogspot.com/2014/11/ccd-i-cmos-senzori.html>

[25] TELI, Shivani RAJENDRA, Stanislav ZVANOVEC, Stanislav VITEK, Vicente MATUS. *Optical Camera Communications for IoT–Rolling-Shutter Based MIMO Scheme with Grouped LED Array Transmitter - MDPI* [online]. 2020. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/12/3361/htm>

[26] MONTEIRO, Eric , Steve HRANILOVIC. *Design and Implementation of Color-Shift Keying for Visible Light Communications* [online]. 2014. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6780585>

[27] SARBAZI, Elham, Murat UYSAL. *PHY layer performance evaluation of the IEEE 802.15.7 visible light communication standard - IEEE Conference Publication* [online]. 2014. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6777772>

[28] ISLIM, Mohamed Sufyan, Harald HAAS. *Modulation Techniques for Li-Fi* [online]. 2021. Dostupné z: <https://www.pure.ed.ac.uk/ws/portalfiles/portal/31585642/ZTE.pdf>

[29] SERAFIMOVSKI, Nikola. *Status of IEEE 802.11 Light Communication TG* [online]. 2020. Dostupné z: http://www.ieee802.org/11/Reports/tgbb_update.htm

[30] *ELIoT* [online]. 2020. Dostupné z: <https://www.eliot-h2020.eu/activity/ieee-802-15-13-activities-in-2020/>

[31] ANDERSON J. B., RUSEK F. and ÖWALL. *Faster-than-Nyquist signaling* [online]. 2013. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6479673>

[32] HAIGH, Anthony PAUL. *Visible Light – Data communications and applications* [online]. 2020. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/chapter/978-0-7503-1680-4/bk978-0-7503-1680-4ch1.pdf>