



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

## LI-FI, VYUŽITÍ SVĚTLA A LED DIOD KE KOMUNIKACI MEZI SVÍTIDLY A UŽIVATELEM

LI-FI, USE OF LIGHT AND LED TO COMMUNICATE BETWEEN LUMINAIRES AND USER

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Róbert Ludányi

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Škoda, Ph.D.

BRNO 2020

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

**Student:** Bc. Róbert Ludányi

**ID:** 164325

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2019/20

**NÁZEV TÉMATU:**

**Li-Fi, využití světla a LED diod ke komunikaci mezi svítidly a uživatelem**

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Proveďte rešerši současného stavu Li-Fi (jedná se o systém přenosu informací za pomoci světla).
2. Zmapujte jakými směry se posouvá výzkum a co jsou cíle tohoto výzkumu.
3. Zhodnoťte vhodnost uplatnění toho systému.
4. Bude-li to možné, navrhnete svítidlo s tímto systémem.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 1.6.2020

**Vedoucí práce:** Ing. Jan Škoda, Ph.D.

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
předseda oborové rady

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## Bibliografická citácia práce:

LUDÁNYI, Róbert. *Li-Fi, využití světla a LED diod ke komunikaci mezi svítidly a uživatelem*. Brno, 2020. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. 2020. 50s. Vedoucí práce Jan Škoda.

## Pod'akovanie

Chcel by som sa poďakovať vedúcemu diplomovej práce Ing. Jánovi Škodovi Ph.D. za odbornú pomoc a usmernenie pri písaní tejto práce, za cenné rady a postrehy a v neposlednom rade za ochotu.

Taktiež by som sa chcel poďakovať firme Halla, a.s. za vypísanie tejto diplomovej práce.

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *Li-Fi, využití světla a LED diod ke komunikaci mezi svítidly a uživatelem* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: .....

.....

**ABSTRAKT**

Táto práca je zameraná na využitie svetla a LED diód ku komunikácii medzi svetlom a užívateľom. V úvode práce je popísaný princíp fungovania VLC, čoho je Li-Fi súčasťou. Práca ďalej obsahuje problematiku na témy Li-Fi, ako napríklad spôsoby modulácie nosných signálov pre prenos dát, porovnania medzi ďalšími bezdrôtovými komunikáciami, jednotlivé prvky optických frontendov, súčasné prevedenia Li-Fi a ďalšie možné využitia tejto technológie. Práca ďalej obsahuje návrh systému pracujúceho na princípe Li-Fi.

**KLÚČOVÉ SLOVÁ:** Li-Fi, LED, svetlo, VLC, komunikácia, prenos



**ABSTRACT**

This thesis is focused on the use of light and LEDs for communication between the light and the user. In the introduction, the principles of VLC, which Li-Fi is part of, are described. The work also contains issues on the topics of Li-Fi, such as methods of modulation of carrier signals for data transmission, comparisons between other wireless communications, individual elements of optical frontends, current versions of Li-Fi and other possible uses of this technology. The work also contains the designing of a system working on the principle of Li-Fi.

**KEY WORDS:** Li-Fi, LED, light, VLC, communication, transmission

## OBSAH

<b>ZOZNAM OBRÁZKOV.....</b>	<b>8</b>
<b>ZOZNAM TABULIEK.....</b>	<b>9</b>
<b>ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK.....</b>	<b>10</b>
<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>12</b>
<b>2 ÚVOD DO VLC.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 HISTÓRIA.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2 VÝHODY SVETELNEJ KOMUNIKÁCIE .....</b>	<b>14</b>
<b>2.3 VÝZVY PRE VLC .....</b>	<b>15</b>
<b>2.4 APLIKAČNÉ RIEŠENIA .....</b>	<b>16</b>
<b>2.5 LI-FI.....</b>	<b>17</b>
2.5.1 VÝHODY A NEVÝHODY LI-FI.....	17
2.5.2 POROVNANIE LI-FI S IR A RÁDIOVOU KOMUNIKÁCIOU.....	18
2.5.3 MODULÁCIA.....	19
2.5.4 UPLINK.....	20
<b>3 KOMUNIKÁCIA POMOCOU VLC, LI-FI.....</b>	<b>21</b>
<b>3.1 NASTAVENIE SYSTÉMU .....</b>	<b>21</b>
<b>3.2 PRENOSOVÝ KANÁL VLC .....</b>	<b>23</b>
<b>3.3 OKOLITÉ SVETLO A ŠUM.....</b>	<b>24</b>
<b>3.4 VYSIELAČ LI-FI.....</b>	<b>25</b>
3.4.1 PRE-EKVALIZÉR .....	25
3.4.2 BIAS-T .....	25
3.4.3 LUMINISCENČNÁ DIÓDA .....	26
<b>3.5 PRIJÍMAČ LI-FI .....</b>	<b>27</b>
3.5.1 FOTOVOLTAICKÝ ČLÁNOK.....	27
3.5.2 FOTODIÓDA.....	27
3.5.3 TRANSIMPEDANČNÝ ZOSILŇOVAČ.....	28
3.5.4 POST-EKVALIZÉR .....	29
<b>3.6 PRE A POST-EKVALIZÁCIA .....</b>	<b>29</b>
<b>3.7 KOMUNIKAČNÉ SCENÁRE .....</b>	<b>30</b>
<b>3.8 NORMY.....</b>	<b>32</b>
<b>4 MODULAČNÉ TECHNIKY.....</b>	<b>33</b>
<b>4.1 OOK (ON OFF KEYING) .....</b>	<b>33</b>
<b>4.2 VPPM (VARIABLE PULSE POSITION MODULATION – PREMENLIVÁ PULZNÁ POLOHOVÁ MODULÁCIA) .....</b>	<b>33</b>
<b>4.3 FSK (FREQUENCY SHIFT KEYING).....</b>	<b>34</b>
<b>4.4 OFDM (ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING – ORTOGONÁLNA MULTIPLEXÁCIA S FREKVENČNÝM DELENÍM) .....</b>	<b>34</b>

---

4.5 PWM (PULSE WIDTH MODULATION – PULZNÁ ŠÍRKOVÁ MODULÁCIA) .....	35
5 TECHNOLOGICKÉ TRENDY LI-FI .....	36
5.1 LI-FI PRODUKTY .....	36
5.1.1 PURELiFi.....	37
5.1.2 OLEDCOMM.....	37
5.1.3 VLNCOMM.....	38
5.2 MOŽNÉ VYUŽITIE LI-FI.....	39
5.3 SÚČASNÉ APLIKAČNÉ RIEŠENIA LI-FI.....	40
6 NÁVRH SVIETIDLA .....	42
6.1 NÁVRH VYSIELAČA .....	43
6.2 NÁVRH PRIJÍMAČA.....	44
6.3 POZOROVANIA.....	45
7 ZÁVER.....	47
8 POUŽITÁ LITERATÚRA .....	48

## ZOZNAM OBRÁZKOV

<i>Obrázok 3-1 Geometria Li-Fi systému.....</i>	<i>22</i>
<i>Obrázok 3-2 Spektrá svetelných zdrojov.....</i>	<i>24</i>
<i>Obrázok 3-3 Bloková schéma vysielača Li-Fi.....</i>	<i>25</i>
<i>Obrázok 3-4 Obvod Bias-T.....</i>	<i>25</i>
<i>Obrázok 3-5 Spôsoby tvorby bieleho svetla pomocou LED.....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázok 3-6 Bloková schéma prijímača Li-Fi.....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázok 3-7 Náhradný obvod fotodódy.....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázok 3-8 VA-charakteristika fotodódy.....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázok 3-9 Zapojenie transimpedančného zosilňovača.....</i>	<i>29</i>
<i>Obrázok 3-10 Ekvalizácia signálu.....</i>	<i>29</i>
<i>Obrázok 3-11 Komunikácia LOS.....</i>	<i>30</i>
<i>Obrázok 3-12 Riadená a difúzna komunikácia NLOS.....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázok 4-1 Modulácia OOK [17].....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázok 4-2 VPPM modulácia[18].....</i>	<i>34</i>
<i>Obrázok 4-3 FSK modulácia [18].....</i>	<i>34</i>
<i>Obrázok 4-4 OFDM modulácia [19].....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázok 4-5 PWM modulácia [18].....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázok 5-1 Riešenie LumiNex vo vnútornom prostredí.....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázok 6-1 Zapojenie 3,5mm jacku na strane vysielača.....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázok 6-2 Vysielací okruh navrhovaného systému.....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázok 6-3 Zapojenie 3,5mm jacku na strane prijímača.....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázok 6-4 Prijímací okruh navrhovaného systému.....</i>	<i>45</i>
<i>Obrázok 6-5 Spektrum zostrojeného svietidla.....</i>	<i>46</i>

**ZOZNAM TABULIEK**

<i>Tabuľka 6-1 Zoznam použitých súčiastok .....</i>	<i>42</i>
---	-----------

## ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

### Skratky

ACO-OFDM	asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing
ADC	analog-to-digital converter
AP	access point
DAC	digital-to-analog converter
DC	direct current
DCO-OFDM	direct-current-biased optical orthogonal frequency division multiplexing
DSP	digital signal processor
F2M	fixed-to-mobile
FDD	frequency division duplexing
FSK	frequency shift keying
I2M	infrastructure-to-mobile
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IM/DD	intensity modulation and direct detection
IR	infrared
IrDa	Infrared Data Association
ISI	inter-symbol interference
LAN	local area network
LED	light emitting diode
Li-Fi	light fidelity
LOS	line-of-sight
LTE	long term evolution
M2M	mobile-to-mobile
MAC	medium access control
MIMO	multiple-input-multiple-output
M-QAM	multi-level quadrature amplitude modulation
NIR	near infrared
NLOS	non-line-of-sight
O/E	optical-to-electrical
OFDM	orthogonal frequency division multiplexing
OFDMA	orthogonal frequency division multiple access
OOK	on-off-keying
OWC	optical wireless communication
PAM-DMT	pulse amplitude modulation discrete multi-tone
PD	photodiode
PIM	pulse interval modulation
PPM	pulse position modulation
PWM	pulse width modulation
RF	radio frequency

---

RGB	red, green, and blue
RMS	root mean square
SFO-OFDM	spectrally factorized O-OFDM
SISO	single-input–single-output
TDD	time division duplexing
TIA	transimpedance amplifier
	unipolar orthogonal frequency division
U-OFDM	multiplexing
VLC	visible light communication
VLCC	Visible Light Communications Consortium
VPPM	variable pulse position modulation
WDD	wavelength division duplexing
WDM	wavelength division multiplexing
Wi-Fi	wireless fidelity
WLAN	wireless local area network

## Značky

I	svietivosť	cd
g	optický zisk prijímača	
r	citlivosť fotodetektora	
$\lambda$	vlnová dĺžka	m

# 1 ÚVOD

Optická komunikácia je akákoľvek forma telekomunikácií, ktorá využíva svetlo ako prenosové médium. Komunikácia pomocou viditeľného svetla sa vyvíjala už od staroveku vo forme požiarov a dymových signálov, ktoré prenášajú správu, a vyvinula sa na vysokokapacitnú doplnkovú technológiu vysokofrekvenčnej (RF) komunikácie. Systémy založené na optickej komunikácii využívajú vlnové dĺžky v infračervenom (IR) spektre pre IR komunikáciu a spektrum viditeľného svetla pre komunikáciu viditeľným svetlom (VLC). Vzhľadom na dostupnosť obrovského spektra bez licencií približne 670 THz má VLC potenciál poskytovať bezdrôtové spojenia s veľmi vysokou rýchlosťou prenosu dát.

V tejto diplomovej práci popísaná technológia Li-Fi, ktorá je súčasťou VLC. Jedná sa o pomerne novú technológiu na bezdrôtový prenos dát s využitím svetla a LED diód. Keďže technológia využíva ako svoj zdroj svetlo, resp. LED diódy, ktoré môžeme nájsť v dnešnej dobe už prakticky všade v civilizovanom svete, v budúcnosti by mohla nahradiť určité typy komunikácií. Ale ako všetky ostatné technológie, aj táto má určité nevýhody a obmedzenia, ktoré sú zahrnuté v tejto práci.

Práca ďalej popisuje princípy fungovania Li-Fi, jednotlivé komponenty, na ktorých princípe funguje, spôsoby vysielania a prijímania signálov ako aj možnosti modulácie daných informácií na nosné signály.

Práca sa zameriava aj na porovnanie rýchlosti tejto technológie s ostatnými bezdrôtovými technológiami ako napríklad Wi-Fi a IR. Hlavným zameraním pri porovnávaní však je Wi-Fi, keďže technológie sú si veľmi podobné.

V závere práce sú popísané možné využitia tejto technológie v praxi, ako aj súčasné prevedenia tejto technológie, ktoré sa aktuálne využívajú.

Praktická časť práce obsahuje návrh systému, ktorý funguje na princípe Li-Fi. Návrh zahŕňa návrh vysielача a prijímača ako aj rôzne postrehy pri testovaní tohto systému.



## 2 ÚVOD DO VLC

### 2.1 História

Príklady bezdrôtovej optickej komunikácie (OWC) vo forme požiarneho majákov a dymových signálov na sprostredkovanie správy možno nájsť takmer vo všetkých kultúrach. Semaforové línie sú najskoršou formou technologického uplatnenia OWC. Francúzsky inžinier Claude Chappe postavil prvú optickú telegrafnú sieť v roku 1792. Jeho semaforové veže umožnili prenos 196 informačných symbolov kódovaných v polohe dvoch ramien spojených mostíkom. Ako ďalší príklad skorého OWC je heliograf - bezdrôtový solárny telegraf, ktorý signalizuje záblesky slnečného svetla otáčaním zrkadla alebo prerušením lúča uzáverom [1].

Po objavení Morseovho kódu v roku 1836 námorné lode pre navigáciu komunikovali prostredníctvom signalizačnej lampy s pobrežnými majákmi. V roku 1880 Alexander Graham Bell demonštroval prvú implementáciu optického spojenia vo voľnom priestore vo forme fotofónu. Použitím vibračného zrkadla vo vysielacom a kryštalických selénových buniek v ohnisku parabolického prijímača bol Bell schopný modulovať hlasovú správu na svetelný signál [2].

Pokroky v technológii OWC nadobudli výrazné tempo po priekopníckej práci spoločností Gfeller a Bapst v roku 1979. Ukázali potenciál OWC pre vysokokapacitné siete sľubujúce pásma elektromagnetického spektra v šírke stoviek THz. Jedno z ich odvetví OWC bolo zamerané na svetelnú komunikáciu vo voľnom priestore na veľké vzdialenosti, čo sa vo všeobecnosti realizuje prostredníctvom vysoko smerových laserových diód ako vysieláčov. Na strane prijímača sa všeobecne používa fotodióda. Ďalšie odvetvie OWC sa zameriavalo na mobilné bezdrôtové siete vo vnútorných priestoroch, ktoré sa realizuje prostredníctvom diód vyžarujúcich svetlo (LED) ako vysieláčov [3].

Prvý vnútorný OWC systém bol predstavený spoločnosťou Gfeller a Bapst v roku 1979. Pri vlnovej dĺžke 950 nm v infračervenom spektre bol systém schopný dosiahnuť 1 Mb/s pomocou modulácie OOK (on-off keying) a difúzneho žiarenia na pokrytie kancelárskej miestnosti. V roku 1996 Marsh a Kahn demonštrovali vnútorný difúzny systém OOK IR s rýchlosťou prenosu dát 50 Mb/s. Neskôr v roku 2000 predstavili Carruthers a Kahn rýchlejšiu implementáciu systému OOK IR s prenosovou rýchlosťou 70 Mb/s a potenciálom až 100 Mb/s [4].

Tanaka a kol. sa pohrávali s myšlienkou bielych LED diód, ktoré by okrem poskytovania primárnej funkcie osvetlenia mohli v interiéri slúžiť aj na poskytovanie informácií. A tak v roku 2003 predstavili nastavenie systému OOK VLC s prenosovou rýchlosťou až 400 Mb/s [5].

Afgani a kol. na konferencii TridentCom v roku 2006 prvýkrát demonštrovali, že vysoký faktor výkyvu pri multiplexovaní ortogonálnym frekvenčným delením (OFDM), ktorý je zvyčajne nevýhodou v RF komunikácii, sa môže zmeniť na výhodu pre moduláciu intenzity a priamej detekcie (IM/DD). Implementovali prenosovú schému optického OFDM na jednosmerný prúd (DCO-OFDM), ktorý neskôr využili ďalšie výskumné skupiny. Vucic a kol. zistil potenciál systémov VLC demonštrovaním dátovej rýchlosti 500 Mbps. Ich implementácia bola založená na DCO-OFDM s bitovým a výkonovým zaťažovaním a symetrickým orezaním signálu [6].

Oddelenou moduláciou červeného, zeleného a modrého (RGB) módu RGB bielej LED pomocou multiplexovania vlnových dĺžok (WDM) a využitím príslušného optického filtra v prijímači, boli tiež schopní preukázať dátový prenos o rýchlosti 800 Mb/s jedného RGB LED svietidla [10]. Použitím podobného usporiadania DCO-OFDM s väčšou šírkou pásma modulácie Khalid a kol. predstavili implementáciu prepojenia, ktorá môže dosiahnuť 1 Gb/s s jedinou bielou LED potiahnutou fosforom. Neskôr tiež predviedli prepojenie o rýchlosti 3,4 Gb/s s RGB LED diódou. Ďalší podobný prenos o rýchlosti 1 Gb/s s fosforom potiahnutou bielou LED bol demonštrovaný Azharom a kol., ktorý použili konfiguráciu MIMO 4x4 (Multiple Input-Multiple Output) [13]. Tsonev a kol. nahlásili dátovú rýchlosť 3,5 Gb/s z jednofarebnej mikro LED v konfigurácii SISO (Single Input-Single output). Tento vývoj podporuje OWC v rozvíjajúcej sa bezdrôtovej sieťovej technológii - light fidelity (Li-Fi), čo je termín, ktorý v roku 2011 predstavil profesor Harald Haas na konferencii TEDGlobal [7].

Optické bezdrôtové spojenie, pôvodne zamerané na blízke infračervené (NIR) spektrum, bolo určené na komunikáciu na krátke vzdialenosti. Od roku 1993 sa pre bezdrôtovú infračervenú komunikáciu v prenosných zariadeniach, ako sú mobilné telefóny, laptopy, fotoaparáty, diaľkové ovládače a mnoho ďalších, implementuje štandardizovaná sada protokolov Združenia pre komunikáciu cez infračervený port. S pokrokom v osvetľovaní pomocou polovodičovej technológii v posledných rokoch, LED diódy nahrádzajú žiarovky kvôli ich spoľahlivosti a vyššej energetickej účinnosti. Okrem osvetlenia sa predpokladá, že LED budú poskytovať vysokokapacitné bezdrôtové dátové vysielanie. Štandardizáciu výskumu VLC silne podporuje konzorcium viditeľných svetelných komunikácií (VLCC) v Japonsku. V roku 2011 vydal Inštitút elektrotechnických a elektronických inžinierov (IEEE) štandard pre VLC, IEEE 802.15.7-2011, „Norma IEEE pre miestne a metropolitné siete, časť 15.7: Bezdrôtová optická komunikácia s krátkym dosahom pomocou viditeľného svetla“ [8].

## 2.2 Výhody svetelnej komunikácie

V posledných desaťročiach sme boli svedkami neobvyklého nárastu bezdrôtových komunikačných systémov. Zatiaľ čo na začiatku boli tieto systémy schopné poskytovať iba hlasové služby a niektoré základné dátové služby, teraz sa vyvinuli na vysokorýchlostné dátové siete, ktoré umožňujú prehliadanie internetu rovnakou rýchlosťou, ako sa dosahuje pri spojení s pevnou linkou. Stále však existuje potreba zvýšiť priepustnosť údajov a následne aj rýchlosť prenosu údajov. S rastúcou popularitou mobilných smartfónov exponenciálne rastie bezdrôtový dátový prenos mobilných zariadení. O blížiacu sa „kríze RF spektra“ bolo vydaných veľa nezávislých varovaní, pretože požiadavky na mobilné dáta sa neustále zvyšujú, zatiaľ čo spektrálna účinnosť siete sa nasýti aj napriek novo zavedeným štandardom a veľkému technologickému pokroku v tejto oblasti.

Bezdrôtová gigabitová aliancia nedávno navrhla využitie milimetrových vln v bezlicenčnom 60 GHz pásme, kde dostupnosť šírky pásma 7 GHz umožňuje bezdrôtové spojenia krátkeho dosahu o prenosovej rýchlosti 7 Gb/s. Pásmo 60 GHz sa tiež považovalo za súčasť rámca IEEE 802.11ad pre veľmi vysoké prenosové dátové spojenia v bezdrôtových miestnych sieťach (WLAN) pomocou techník MIMO. Avšak kvôli vysokej strate trasy rádiových vln v tomto spektrálnom rozsahu sú spojenia 60 GHz vysoko smerové, a preto si vyžadujú

sofistikované algoritmy na vytváranie a sledovanie digitálneho lúča pre aplikácie v mobilných bezdrôtových sieťach.

Pretože RF spektrum je obmedzené a drahé, v súčasnosti sa skúmajú nové a doplnkové techniky bezdrôtového prenosu, ktoré môžu uľahčiť využitie spektra. Jedným takým sľubným objavujúcim sa alternatívnym prístupom je optická bezdrôtová komunikácia, ktorá ponúka mnoho výhod oproti vysokofrekvenčnému prenosu. Najnovšie bola identifikovaná komunikácia pomocou viditeľného svetla (VLC) ako potenciálne riešenie na zmiernenie nastávajúcej krízy RF spektra. VLC je obzvlášť lákavá, pretože osvetlenie je komodita, ktorá bola integrovaná do prakticky každého obytného priestoru. Využitie spektra viditeľného svetla na vysokorýchlostnú dátovú komunikáciu je umožnené vznikom LED, ktorá je zároveň jadrom energeticky efektívneho osvetlenia. V tomto zmysle ponúka koncepcia kombinovania funkcií osvetlenia a komunikácie potenciál pre obrovské úspory nákladov a zníženie uhlíkovej stopy.

Nasadenie prístupových bodov VLC (AP) sa stane jednoduchým, pretože existujúcu osvetľovaciu infraštruktúru je možné opätovne použiť. Pretože osvetlenie je vo vnútorných prostrediach väčšinu času aj počas dňa, energia použitá na komunikáciu je výrazne znížená v dôsledku hromadenia údajov o osvetlení. Aj keď sa však osvetlenie nevyžaduje, existujú energeticky efektívne techniky IM/DD, ktoré umožňujú dátovú komunikáciu, aj keď sú svetlá vizuálne vypnuté.

Toto sú už presvedčivé výhody, ale prípad sa tým nekončí. Vo VLC môže signál obsadzovať vlnové dĺžky v spektre viditeľného svetla od 380 nm do 750 nm a/alebo v spektre NIR od 750 nm do 2,5  $\mu\text{m}$ . Celkový dostupný zdroj šírky pásma je približne 670 THz, čo je 10 000-násobne viac ako RF spektrum vrátane pásma 60 GHz. Okrem toho, že VLC je doplnkovým neinterferujúcim riešením popri RF technológii, má výhodu bez licenčných operácií popri obrovskému zdroju spektra. Okrem toho môžu veľmi vysoké rýchlosti prenosu údajov byť realizované použitím lacných klientskych rozhraní s komerčne dostupnými LED a PD [20]. Ďalšou výhodou je fakt, že VLC je prevádzkované bez akýchkoľvek zdravotných problémov, pokiaľ sú splnené nariadenia o bezpečnosti očí. Toto obmedzenie je oveľa menej závažné, keď sa používajú skôr nekoherentné LED ako laserové diódy. S príchodom vysoko efektívnych vysokovýkonných nekoherentných LED a vysoko citlivých fotodiód sa VLC stala životaschopným kandidátom na stredný dosah interných dátových prenosov, čo môže prispieť k riešeniu deficitu spektra [7].

### 2.3 Výzvy pre VLC

Nasledujúce výzvy sú dôležité pre implementáciu systému VLC v praktických komunikačných scenároch s jedným prepojením a viacerými používateľmi. Po prvé, výstup optického vysielača založeného na bežných LED diódach vykazuje silný nelineárny prenos signálu prenášajúceho informácie. Preto je nevyhnutné optimálne zlepšenie prenosových vlastností signálu v obmedzenom dynamickom rozsahu frontendu, aby sa minimalizovalo výsledné nelineárne skreslenie signálu a maximalizovala sa priepustnosť systému. Aby sa sformuloval tento problém s optimalizáciou, matematické detaily konverzie opticko-elektrického (O/E) signálu unipolárnych optických signálov sú nevyhnutné. Pretože energetická účinnosť systému sa meria množstvom elektrickej energie potrebnej pre danú kvalitu služby, je potrebné

nadviazať vzťah s výstupnou optickou energiou. Predbežným skreslením signálu pomocou inverzie funkcie nelineárneho prenosu je možné linearizovať dynamický rozsah vysielateľa medzi úrovňami minima a maxima vyžarovanej optickej energie. Zatiaľ čo signály jedného nosiča sa môžu zmestiť do linearizovaného dynamického rozsahu vysielateľa bez skreslenia, v systéme OFDM je potrebné analyzovať nelineárne skreslenie pre dané nastavenie ovplyvnenia signálu. Preto je potrebné stanoviť dosiahnuteľné informačné rýchlosti systému OFDM pre praktický lineárny dynamický rozsah vysielateľa pri priemernej elektrickej energii a priemerných obmedzeniach optickej energie. V súčasnej dobe systémy VLC s IM/DD nemôžu úplne využívať celé dostupné optické spektrum, kvôli malej šírke pásma elektrickej modulácie v porovnaní s vlnovou dĺžkou optického stredného optických frontendov. Návrhári systémov sa preto často uchýľujú k zvýšeniu elektrickej šírky pásma signálu 3 dB optických prvkov kvôli zvýšeniu priepustnosti systému. Takýto prístup však vyžaduje techniky vyrovnávania kanálov, ako je lineárna a nelineárna ekvalizácia pre signály s jedným nosičom a bitové a energetické zaťaženie pre signály s viacerými nosičmi. Vyžaduje si to znalosť kanálov v prijímači a vo vysieláči. Nakoniec sú systémový model a optimálne nastavenie predpätia frontendu často prispôbené iba pre scenár VLC s jedným prepojením. Techniky zvyšovania kapacity, kde sa vo vysieláči používa viac LED, a v prijímači sa používa viacero PD, sú stále otvoreným problémom. Mechanizmy, ktoré zvyšujú pravdepodobnosť detekcie jednotlivých signálov a súvisiace techniky diverzity, sa musia ďalej skúmať v kontexte systémov MIMO. Štúdie systémov VLC sa navyše musia rozšíriť o simuláciu a optimalizáciu viacerých prístupových scenárov v sieti mobilných používateľov. Vzhľadom na skutočnosť, že stredná vlnová dĺžka je výrazne väčšia ako šírka modulačnej šírky optických frontendov, je možné opakované použitie vlnovej dĺžky v bunkových systémoch VLC uskutočniť bez viditeľného zníženia kapacity na rozdiel od vysokofrekvenčných bunkových systémov. Preto je potrebné získať väčší prehľad o maximalizácii kapacity celulárnych sietí VLC s prechodom na autonómne siete citlivé na rušenie [7].

## 2.4 Aplikačné riešenia

VLC sa vo všeobecnosti realizuje v komunikačnej zostave s priamo viditeľným dohľadom (LOS) alebo s neviditeľným dohľadom (NLOS). Spojenia LOS sa môžu vo všeobecnosti využívať v scenároch statickej komunikácie, ako sú napríklad siete vnútorných senzorov, kde je udržiavaná pevná poloha a zarovnanie medzi vysielateľom a prijímačom. V mobilných prostrediach, ako sú obchodné kancelárie, sa na udržiavanie spojenia LOS môže použiť mechanické alebo elektronické riadenie lúčov. Takéto techniky však zvyšujú náklady na optické rozhrania. Preto v mobilnej sieti VLC, kde je pravdepodobné, že spojenia LOS budú blokované, sa prenos môže uľahčiť prostredníctvom komunikácie NLOS. Pulzné modulačné techniky s jednou nosnou frekvenciou, ako je pulzná šírková modulácia (PWM), modulácia intervalu impulzov (PIM), modulácia polohy impulzu (PPM) a modulácia pulznej amplitúdy (PAM), pociťujú interferencie (ISI) v disperznom kanáli NLOS, a preto vykazujú obmedzené rýchlosti prenosu údajov, pokiaľ sa nepoužijú nákladné ekvalizéry [7].

Vzhľadom na svoju neodmysliteľnú odolnosť voči viaccestnému slabnutiu sa predpokladá, že OFDM s viacúrovňovou kvadrátovou amplitúdovou moduláciou (M-QAM) umožní komunikáciu NLOS, a teda vysokokapacitné bezdrôtové siete. Navyše, vzhľadom na to, že svetlo sa nešíri nepriehľadnými predmetmi a stenami, optické bezdrôtové signály môžu byť obmedzené

v miestnosti. Táto vlastnosť vo svojej podstate eliminuje obavy z odpočívania a zachytávania prenosu, čo vedie k bezpečným vnútorným dátovým spojeniam a sieťam. Rovnakú funkciu možno využiť na odstránenie interferencie medzi susednými zariadeniami. Keďže optické žiarenie nezasahuje do iných elektromagnetických vln alebo do prevádzky citlivých elektronických zariadení, VLC umožňuje bezpečný prenos údajov v oblastiach, kde je zakázaná alebo zdržiavaná RF komunikácia a elektromagnetické žiarenie, aby sa zabránilo rušeniu kritických systémov. Patria sem letectvo, vnútorná bezpečnosť, nemocnice a zdravotná starostlivosť, ako aj petrochemické a jadrové elektrárne. V neposlednom rade, rádiové vlny sú silne zoslabené vo vode, čo znemožňuje podvodný RF prenos. Keďže sa však svetlo šíri vodou, VLC sa môže použiť na podvodnú komunikáciu [7].

## 2.5 Li-Fi

Pod pojmom Li-Fi (z angl. Light Fidelity) sa rozumie sieťové, mobilné a vysokorychlostné riešenie VLC. Je to kompletne realizované mobilné komunikačné prevedenie VLC. Li-Fi by mala doplniť už existujúce heterogénne bezdrôtové RF siete a poskytnúť výrazné odľahčenie spektra pre mobilné a bezdrôtové systémy (Wi-Fi).

### 2.5.1 Výhody a nevýhody Li-Fi

Okrem toho, že by poskytnúť už spomínané odľahčenie spektra pre mobilné a bezdrôtové systémy, Li-Fi prichádza s mnohými ďalšími výhodami. Medzi hlavné výhody patria:

#### Rýchlosť

Svetelné vlny sú schopné prenášať oveľa viac informácií ako rádiové vlny používané v technológii Wi-Fi, pretože spektrum viditeľného svetla je takmer 10 000-krát väčšie ako spektrum obsadené rádiovými vlnami. Z tohto dôvodu je prenos údajov pomocou Li-Fi stokrát rýchlejší ako prenos dát pomocou Wi-Fi. Niektoré výskumné centrá tvrdia, že dosiahli obojstrannú komunikáciu Li-Fi o rýchlosti prenosu dát 224 Gb/s. Pri tejto rýchlosti je možné video s vysokým rozlíšením stiahnuť v priebehu niekoľkých sekúnd

#### Efektivita

Li-Fi má potenciál byť energeticky efektívnejšia a lacnejšia vďaka povahe LED žiaroviek, ktoré už sú samy o sebe efektívne. Technológia Li-Fi im dáva ďalší účel - pripojenie. Tým sa ušetrí náklady v domácnostiach a na pracoviskách, pretože by to bolo bez elektronických zariadení, ako sú smerovače, modemy, zosilňovače signálu, zosilňovače vln a antény. Aby tieto zariadenia fungovali, musia byť pripojené k napájaniu 24/7. Skutočnosť, že v mnohých infraštruktúrach už pravdepodobne existujú LED svetlá, ktoré používajú Li-Fi, by nebola ďalšou cenou.

#### Bezpečnosť

Rádiové vlny môžu byť zachytené ľuďmi mimo našej siete, pretože môžu prechádzať stenami, čo ohrozuje bezpečnosť našich údajov. Svetlo však zastavujú nepriehľadné objekty, vďaka ktorým je Li-Fi podstatne bezpečnejšie ako iné bezdrôtové technológie. Nebudeme sa musieť starať o únik pripojenia do verejných priestorov, čo potenciálne umožní prístup ďalších

ľudí k našej sieti. Niektoré miestnosti by dokonca mohli byť označené ako vysoko zabezpečené oblasti s vlastnými sieťami Li-Fi, ktoré ich izolujú od ostatných oblastí budovy, kde by mohli byť pripojené zraniteľné zariadenia.

### Dostupnosť

S Li-Fi každý svetelný zdroj môže predstavovať pripojenie k internetu. V blízkej budúcnosti, kedy by táto technológia bola dostupná pre širokú verejnosť, môžu pouličné osvetlenia, osvetlenia budov a dopravné osvetlenia komunikovať bezdrôtovo a s prístupom k internetu kdekoľvek sa nachádzame.

Li-Fi však nie je dokonalá, a tak aj táto technológia, ako každá iná prichádza s určitými nevýhodami, medzi ktoré patria:

### Limitovaný dosah

Obmedzenia viditeľného svetla poskytujú Li-Fi bezpečnostnú výhodu oproti Wi-Fi. Tieto obmedzenia však vytvárajú aj nevýhody. Fyzické bariéry, ako sú steny a dvere, obmedzujú prevádzkový rozsah LED žiarovky s podporou Li-Fi. Nezabudnime, že údaje prenášané pomocou Li-Fi zostávajú obmedzené v tesnej vzdialenosti, pretože svetlo nemôže preniknúť do nepriehľadných objektov a má kratší dosah. V zariadeniach, ako sú budovy alebo domy musia byť povolené LED svetlá strategicky umiestnené v miestnostiach, halách a iných sekciách, aby sa rozšíril rozsah siete Li-Fi. Jeden Wi-Fi router má širší a dlhší dosah ako Li-Fi. Vďaka týmto obmedzeniam Li-Fi nie je ideálny na použitie vo verejných sieťach Wi-Fi.

### Kompatibilita

Keďže Li-Fi predstavuje pomerne novú technológiu, nie veľa zariadení sú kompatibilné s ňou. Väčšina zariadení, ktoré sa denne využívajú používajú hardware pre Wi-Fi a je nepravdepodobné, že v najbližšej dobe uvidíme personálne Li-Fi využívajúce zariadenia [9].

## **2.5.2 Porovnanie Li-Fi s IR a rádiovou komunikáciou**

Oproti tradičnej komunikácii rádiovými frekvenciami a infračervenou komunikáciou ma komunikácia VLC niekoľko výhod. Hlavnou výhodou VLC je nelimitované a nelicencované 400 THz frekvenčné pásmo. Šírka pásma IR komunikácie je rovnaká ako pri VLC, šírka pásma RF je však len 300 GHz, navyše je limitovaná a regulovateľná. Nevýhodou využívania vyšších rádiových frekvencií je znižovanie dosahu, čo prekáža použitiu týchto frekvencií v niektorých aplikáciách. Medzi ďalšie výhody VLC patrí nízka spotreba a taktiež nízka cena nasadenia, pri používaní už nasadených svietidiel ako vysielačov.

Najväčší rozdiel medzi týmito komunikáciami je v šírení cez prekážky. RF poskytuje komunikáciu aj cez prekážky a je náchylná na elektromagnetické rušenie, zatiaľ čo VLC a IR sú obmedzené do jednej miestnosti, keďže nedokážu komunikovať priamo cez prekážky a môžu byť náchylné na okolité svetlo.

Čo sa týka porovnania z pohľadu zdravotných rizík, RF predstavuje najväčšie riziko. Svetová zdravotnícka organizácia zaradila RF frekvencie ako potenciálne rakovinotvorné pre ľudí. Zdravotné riziko VLC predstavuje riziko modrého svetla, (Blue light hazard alebo BLH), ktoré môže byť spôsobené vysokou intenzitou modrého svetla. Pri používaní normálnej úrovni

intenzity osvietenie však toto riziko nie je relevantné. Riziko IR spočíva so zohrievania infračerveným žiarením a následnou absorpciou ľudským telom a očami [10].

### 2.5.3 Modulácia

Bezproblémová optická bezdrôtová sieť by si vyžadovala všadeprítomné pokrytie poskytované optickými frontendmi. To vyžaduje použitie veľkého množstva osvetľovacích jednotiek s podporou Li-Fi. Najefektívnejšími takýmito jednotkami vo VLC sú nekoherentné LED diódy pre polovodičové osvetlenie z dôvodu ich nízkych nákladov. Vďaka fyzikálnym vlastnostiam týchto komponentov je možné informácie kódovať iba v intenzite vyžarovaného svetla. Výsledkom je, že VLC sa môže realizovať ako systém IM/DD, čo znamená, že modulačný signál musí byť reálne ohodnotený a nezáporný. Toto obmedzuje použitie dobre preskúmaných a rozvinutých modulačných schém z oblasti RF komunikácií. Techniky ako PWM, PPM, OOK a PAM sa môžu použiť relatívne jednoduchým spôsobom. Keď sa však modulačné rýchlosti zvýšia, začnú tieto konkrétne modulačné schémy trpieť nežiadúcimi účinkami kvôli opticky selektívnemu bezdrôtovému kanálu.

Vyžaduje sa preto odolnejšia technika, ako je OFDM. OFDM umožňuje adaptívne bitové a výkonové zaťaženie rôznych frekvenčných subpásiem podľa vlastností komunikačného kanála. To vedie k optimálnemu využitiu dostupných zdrojov. Takéto kanálové podmienky sú zavedené frekvenčnou odozvou obyčajnej LED, ktorá má maximálnu modulačnú šírku pásma 3 dB niekoľko desiatok MHz.

Medzi ďalšie výhody tejto modulačnej schémy patrí jednoduché vyrovňavanie pomocou "one-tap" ekvalizácie v oblasti frekvencie, ako aj schopnosť vyhnúť sa nízkofrekvenčnému skresleniu spôsobenému blikajúcim pozadím. Konvenčné signály OFDM majú charakter komplexnej hodnoty a bipolárnej povahy. Z tohto dôvodu sa musí štandardná technika RF OFDM upraviť tak, aby bola vhodná pre systémy IM/DD. Priamy spôsob, ako získať signál OFDM s reálnou hodnotou, je vložiť obmedzenie Hermitianovej symetrie na druhotné nosiče vo frekvenčnej doméne. Avšak, výsledný signál v časovej doméne je stále bipolárny. Jedným zo spôsobov, ako získať unipolárny signál, je zavedenie pozitívnej systematickej chyby. Výsledná unipolárna modulačná schéma je známa ako DCO-OFDM. Vedci venovali značné úsilie navrhovaniu modulačnej schémy založenej na OFDM, ktorá je čisto unipolárna. Niektoré známe riešenia zahŕňajú:

- ACO-OFDM
- PAM-DMT
- Flip-OFDM
- U-OFDM
- SFO-OFDM

Všeobecnou nevýhodou všetkých týchto techník je 50% strata spektrálnej účinnosti a rýchlosti dát. Z hľadiska sieťovania ponúka OFDM priamu implementáciu viacnásobného prístupu, pretože druhotné nosiče môžu byť pridelené rôznym užívateľom, čo vedie k viacnásobnému prístupu v ortogonálnom frekvenčnom delení (OFDMA). Výhody OFDM už boli uznané a používajú sa vo Wi-Fi systémoch IEEE 802.11. Preto by použitie OFDM v optických mobilných

---

sieťach umožnilo použitie už zavedených komunikačných protokolov vyššej úrovne používaných v IEEE 802.11 a LTE [7].

#### 2.5.4 Uplink

Doteraz sa výskum zameriaval predovšetkým na maximalizáciu prenosových rýchlostí nad jednosmerným spojom. Avšak pre kompletný Li-Fi komunikačný systém je potrebná úplná obojsmerná komunikácia, t. j. musí byť zabezpečené uplinkové spojenie z mobilných telefónov alebo iných zariadení do optického AP. Možno uvažovať o existujúcich duplexných technikách používaných v RF, ako je duplexovanie s časovým delením (TDD) a duplexovanie s frekvenčným delením (FDD), kde sú downlink a uplink oddelené rôznymi časovými slotmi alebo rôznymi frekvenčnými pásmami. TDD poskytuje uskutočniteľnú možnosť, ale ukladá presné časové a synchronizačné obmedzenia podobné tým, ktoré sú potrebné na dekodovanie údajov. TDD však predpokladá, že prenosy uplink aj downlink sa vykonávajú na tej istej fyzickej vlnovej dĺžke. To môže byť často nepraktické, pretože nemusí byť žiaduce viditeľné osvetlenie užívateľským terminálom. Preto je najvhodnejšou technikou v Li-Fi duplexovanie s delením vlnových dĺžok (WDD), kde sú dva komunikačné kanály vytvorené na rôznych elektromagnetických vlnových dĺžkach. Použitie IR prenosu je jednou z realizovateľných možností na vytvorenie vzostupného komunikačného kanála [7].



## 3 KOMUNIKÁCIA POMOCOU VLC, LI-FI

V komunikácii pomocou viditeľného svetla je intenzita svetla svetlo emitujúcej diódy (LED) modulovaná signálom správy. Po šírení optickým bezdrôtovým kanálom je svetelná správa detekovaná fotodiódou (PD). Kľúčové charakteristiky optického vysielača (Tx) a prijímača (Rx) zahŕňajú ich optickú spektrálnu odozvu, šírku pásma elektrickej modulácie, vzory žiarenia/detekcie, optický výstupný výkon LED, fotocitlivú oblasť a hodnotu šumu PD. Optický bezdrôtový kanál je lineárny, časovo invariantný systém bez pamäte s impulznou odozvou v konečnom trvaní [7].

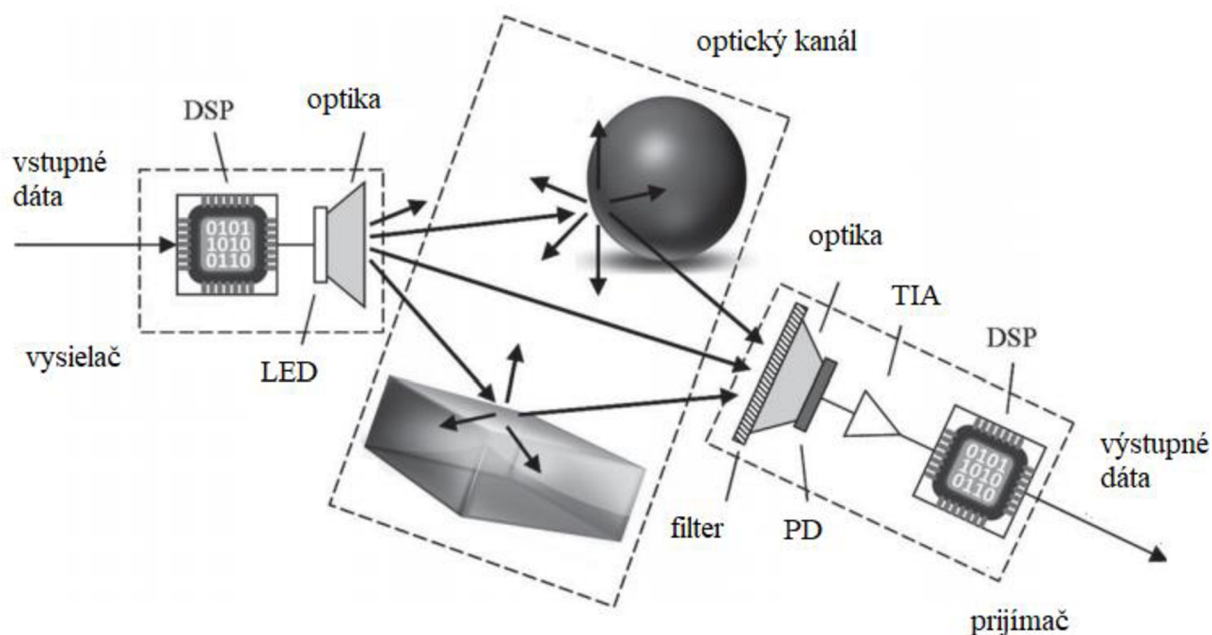
Pri vysokých dátových rýchlostiach, kde šírka pásma signálu prekračuje šírku pásma koherencie kanála, možno kanál charakterizovať ako frekvenčne selektívny kanál v dôsledku disperzie. Nedochádza k rýchlemu vyblednutiu signálu, ale signál prechádza pomalým vyblednutím. Simulácie sledovania lúčov ukazujú, že pomalé blednutie sa dá modelovať ako log-normálne distribuovaná náhodná premenná. Šírenie oneskorenia disperzívnych optických bezdrôtových kanálov sa dá presne modelovať pomocou rýchlo sa zhoršujúcej funkcie exponenciálnej impulznej odozvy. Pre LOS spojenia sú hlásené rozpätia s oneskorením RMS medzi 1,3 ns a 12 ns, zatiaľ čo rozpätia oneskorenia RMS medzi 7 ns a 13 ns sú hlásené pre spojenia NLOS [7].

### 3.1 Nastavenie systému

Geometria systému Li-Fi je definovaná polohou a charakteristikami žiarenia a detekcie vysielačov a prijímačov vo vnútornom alebo vonkajšom prostredí s určitými odrazovými vlastnosťami objektov v zostave. Na základe šíriacej sa dráhy svetla vyžarovaného vysielačom a detekovaného prijímačom existujú dve všeobecné usporiadania spojení:

- LOS komunikácia
- NLOS komunikácia

Okrem toho je možné nasadiť celulárnu sieť s cieľom maximalizovať pokrytie a kapacitu v oblasti nastavenia VLC. V tejto časti sú predstavené základné komponenty vysielača a prijímača a taktiež znázornené ich všeobecné usporiadania komunikačných nastavení. Zovšeobecnené spojenie VLC je znázornené na obrázku 3.1.



Obrázok 3-1 Geometria Li-Fi systému [7]

Vysielač sa skladá z procesora digitálneho signálu (DSP) s prevodníkom digitálno-analógového signálu (DAC), ktorý zabezpečuje moduláciu bitov digitálnej informácie a ich transformáciu na analógový prúdový signál. Prúd poháňa optický žiarič, t.j. LED alebo pole LED. Prúdový signál prenášajúci informácie sa tu transformuje na optickú intenzitu. Optický signál môže byť vedený optickým systémom, aby ďalej tvaroval vysielaný lúč. Tu je možné použiť šošovku optického zosilňovača, kolimátor alebo difúzor a tak daný svetelný lúč sústrediť alebo rozšíriť. Optický signál sa potom prenáša cez optický bezdrôtový kanál. Časť optickej energie je absorbovaná predmetmi v prostredí a zvyšok sa odráža späť difúznym alebo zrkadlovým spôsobom.

Zložky daného signálu LOS a NLOS dorazia do prijímača. Tu sa môže použiť optický filter na prefiltrovanie a výber danej zložky signálu v optickom spektre. Optický filter okrem toho výrazne znižuje rušenie okolitého svetla. Optický signál potom prechádza cez systém optických prvkov, napr. kolimátorové šošovky, na zosilnenie signálu a vyrovnanie dopadajúceho svetla na optimálnu detekciu. Vo fotodetektore (PD) alebo v poli fotodetektorov, sa optický signál prevádza späť na elektrický prúd. Aktuálny signál je elektronicky vopred zosilnený pomocou zosilňovača v transimpedančnom zapojení (TIA). Na transformáciu analógového prúdového signálu na digitálny signál a demodulovanie informačných bitov sa používa DSP s analógovo-digitálnym prevodníkom (ADC) [7].

### 3.2 Prenosový kanál VLC

Prenosový kanál VLC definovať ako optický kanál, v ktorom dochádza k modulácii intenzity svetla a priamej detekcii. Kanál môžeme modelovať podobne ako viac známy infračervený kanál. Informácia je prenášaná moduláciou intenzity svetla  $I(t)$ , ako odozva na signál elektrického prúdu  $x(t)$ . Toto môže byť modelované ako

$$I(t) = gx(t), \quad (1.1)$$

kde  $g$  je optický zisk prijímača. Priama detekcia môže byť modelovaná ako výstup fotoprúdu  $y(t)$  prijatého z intenzity svetla. Odozva kanálu  $h(t)$  je aproximovaná z  $I(t)$  na  $y(t)$ .

$$y(t) = rg \cdot x(t) * h(t) + n(t), \quad (1.2)$$

kde  $*$  značí konvolúciu,  $r$  predstavuje citlivosť detektora a  $n(t)$  je šum. Ideálna impulzná odozva LOS kanálu je plochá a jej signál je časovo oneskorená delta funkcia, reprezentujúca amplitúdovú degradáciu prenášaného signálu. Vo vnútorných priestoroch existujú viacnásobné odrazy svetla od rôznych povrchov, čo spôsobuje difúziu odozvu kanálu. Pri návrhu VLC systému je potrebné počítať s rôznymi reflexnými faktormi bežných materiálov. Napríklad odrazivosť bielej steny je 75-85% pre priame svetlo a odrazivosť pre červenú tehlu je v rozmedzí len 10-15%.

Impulzová odozva NLOS kanálu môže byť vyjadrená ako suma lúčov po niekoľkých odrazoch.

$$h_c(S, R) = \sum_{k=0}^{\infty} h_c^k(S, R), \quad (1.3)$$

kde  $h_c(S, R)$  reprezentuje impulznú odozvu lúčov, ktoré prekonalí  $k$  odrazov pri prenose z vysielača na prijímač. Signál VLC môže byť prenášaný aj nepriamo pomocou odrazov od stien a stropu. Takéto nepriame šírenie svetla rozširuje možnosť pokrytia novej komunikácie, na druhej strane však spôsobuje útlm a viaccestné šírenie signálu, ktoré spôsobuje medzisymbolové interferencie (ISI). Útlm signálu môže byť redukovaný zvýšením výkonu než pre kanál s LOS. Problémy ISI možno vyriešiť použitím sotisfikovaných modulačných metód ako je napríklad OFDM modulácia.

Vhodná úroveň osvetlenia kancelárskych prostredí by sa mala pohybovať v rozmedzí 500 -700 luxov podľa vykonávanej práce. Neodporúča sa ísť pod 400 luxov a nad 1000 luxov, čo určuje limity pre využitie VLC v kancelárskom prostredí. Úroveň svetla, ktoré sa využíva pre viacero účelov (osvetlenie a komunikáciu) by sa mala pohybovať v rozmedzí 400-1000 luxov.

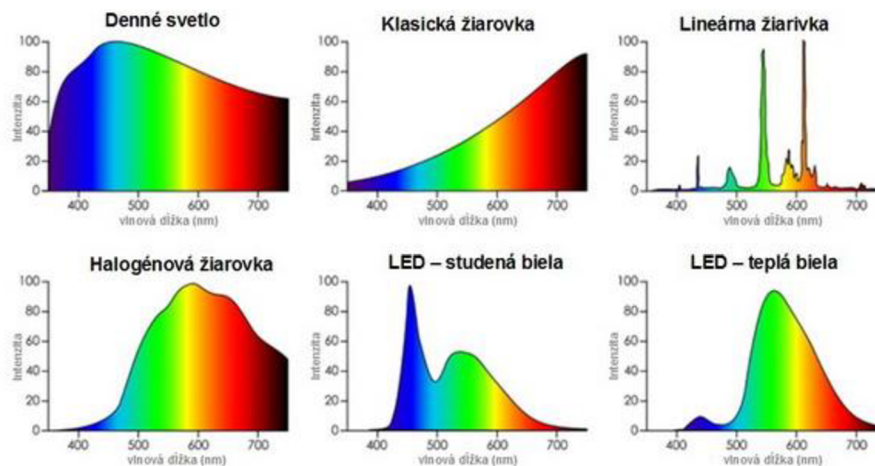
Farebné spektrum je ďalším dôležitým faktorom pri osvetlení a komunikácii. Pre dosiahnutie najlepšieho vizuálneho efektu pri osvetlení založeného na princípe vyžarovania bieleho svetla, by sa malo pracovať so všetkými viditeľnými vlnovými dĺžkami. Nerovnováha alebo nedostatok farieb môžu byť na pozorovanom obraze vnímané ako zdeformovaný odtieň. V skutočnosti je vnímané biele svetlo obvykle zložené z rôznych farieb svetla. Ľudské oko je

najcitlivejšie v okolí vlnových dĺžok zelenej a žltej farby. Reakcia na červené a modré vlnové dĺžky je oveľa nižšia, čo ich predurčuje pre použitie vo VLC [11].

### 3.3 Okolité svetlo a šum

Zdroje prírodného a umelého svetla prekrývajúce spolu vytvárajú okolité svetlo, ktoré je detekované ako šum v detektore VLC. Povaha okolitého svetla je stacionárna, a preto ju možno opticky alebo elektricky odfiltrovať od komunikácie vo VLC. Pri navrhovaní prijímača VLC je veľmi dôležité identifikovať svetelné zdroje a dopady okolitého svetla.

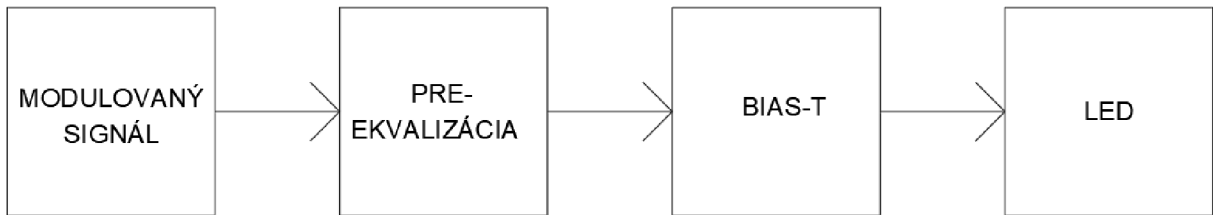
Najnebezpečnejším prírodným zdrojom svetla je slnko, ktoré vyžaruje svetlo vo všetkých vlnových spektrách viditeľného svetla. Úroveň intenzity slnečného svetla môže byť v širokom dynamickom rozsahu veľmi vysoká. Pretože povaha slnečného svetla je konštantná, svetlo neobsahuje rušivé frekvencie na VLC. Slnečné svetlo produkuje na detektore iba stacionárny výstrelový šum, ktorý je pozorovaný ako stabilné jednosmerné napätie v prijímači. Tento druh šumu je možné ľahko odfiltrovať od detekovaného signálu. Jediným skutočným problémom zo slnečného svetla je jeho schopnosť saturovať detektor, čo zvyšuje požiadavky na dynamický rozsah detektorov v rôznych svetelných podmienkach. Slnko okrem toho vyžaruje aj infračervené a ultrafialové vlnové dĺžky, ktoré taktiež vytvárajú výstrelový šum prijímača. Pretože detektory na báze kremíka reagujú na infračervené vlnové dĺžky lepšie ako viditeľné svetlo, môže infračervené žiarenie spôsobiť na prijímači VLC viac šumu. Na obrázku 3-2 sú zobrazené spektrá rôznych svetelných zdrojov [11].



Obrázok 3-2 Spektrá svetelných zdrojov [12]

### 3.4 Vysielač Li-Fi

VLC vysielač je svetelný zdroj modulujúci intenzitu svetla. Jeho účelom je transformácia informačných dát na svetlo. Aby sa dosiahlo čo najlepších optimálnych podmienok pre prenos, transformácia dát z elektrického signálu na svetlo by mala byť čo najviac lineárna. Pre zlinearizovanie nelinearity, ktorá je spôsobená LED diódou a obvodom Bias-T môže byť použitá pre-ekvalizácia. Bloková schéma typického Li-Fi vysielača je zobrazená na obrázku 3-3.



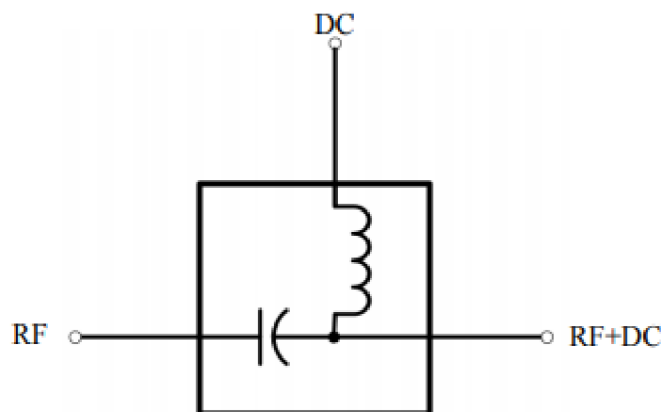
Obrázok 3-3 Bloková schéma vysielača Li-Fi

#### 3.4.1 Pre-ekvalizér

Na rozšírenie šírky pásma vysielajúcej LED môžeme použiť techniku tzv. pre-ekvalizácie, ktorá zároveň aj pomáha zlepšovať linearitu pri elektricko-optickej konverzii. Tejto technike sa venuje viac kapitola 3.6.

#### 3.4.2 Bias-T

Bias-T pracuje ako ovládací obvod LED, ktorého výhodou je jeho možnosť pracovať v lineárnej oblasti spoločne s LED. Zariadenie sa skladá z dvoch vstupných portov: DC a RF, a jedného výstupného portu: RF+DC. DC port slúži k nastavovaniu predpätia, RF portom prechádza vysokofrekvenčný signál a na výstupe dochádza k ich kombinácii. Výstup Bias-T sa ďalej pripája na luminiscenčnú diódu. Obrázok 3-4 zobrazuje obvod článku Bias-T [13]:



Obrázok 3-4 Obvod Bias-T [13]

### 3.4.3 Luminiscenčná dióda

LED dióda je polovodičové zariadenie, emitujúce svetlo, pri prechode elektrickým prúdom v priepustnom smere. Oproti bežným typom osvetlení ako sú žiarovky a žiarivky predstavujú LED diódy veľa výhod ako napríklad:

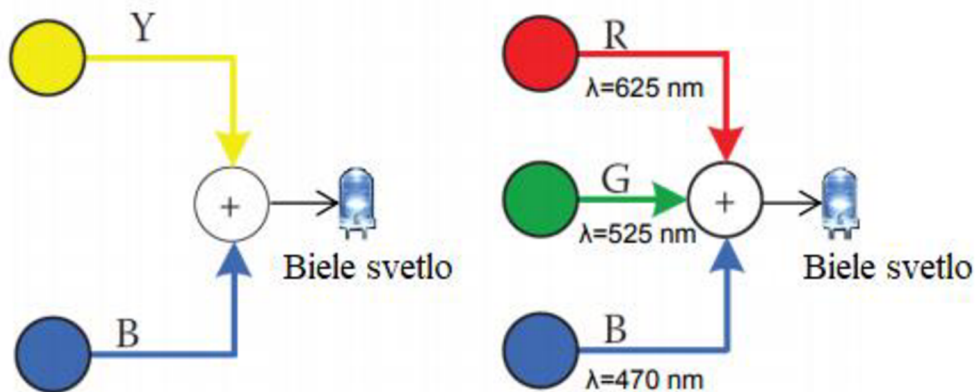
- nižšiu spotrebu energie
- dlhšiu životnosť
- lepšiu odolnosť a menšiu veľkosť

Jednou z vlastností LED diód je ich vysokofrekvenčné spínanie, ktoré ľudské oko nie je možné rozlíšiť. Množstvo svetla vyžarovaného pomocou LED diód môže byť regulovateľné pomocou zmeny prúdu. Aj vďaka týmto vlastnostiam sú LED diódy vhodnými zdrojmi na využitie pre svetelnú komunikáciu. Okrem osvetľovania bytových a kancelárskych priestorov sa LED používajú aj v dopravnom priemysle kde využívajú v predných aj zadných svetlách áut a taktiež aj v semaforochoch pre ich vysokú životnosť a veľkú spoľahlivosť [14].

Existujú dva prístupy na generovanie bieleho svetla z LED diód:

- Prvým spôsobom je biele svetlo generované pomocou žltej fosforovej vrstvy, ktorá je potiahnutá na modrých LED diódach. Svetlo vyžarované modrou LED ( $\lambda \approx 470$  nm) je absorbované fosforovou vrstvou a modrá vlnová dĺžka excituje fosfor, čo spôsobuje zmenu jeho žiarenia na bielu. Fosfor následne vyžaruje svetlo na dlhších vlnových dĺžkach.
- Druhou metódou je použitie LED diód RGB. Správnym zmiešaním troch farieb (červená, zelená a modrá) sa môže vytvoriť biele svetlo ako napríklad vo farebnom televízore.

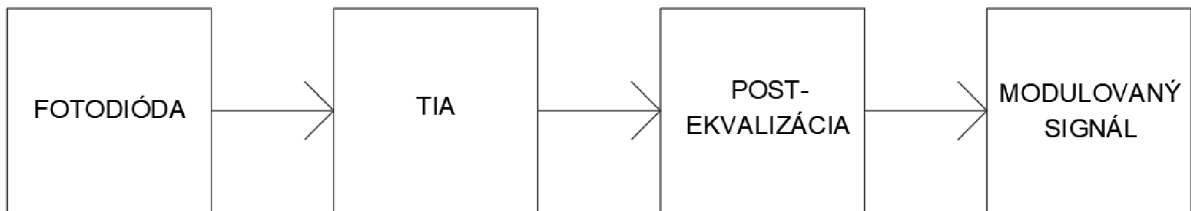
V súčasnosti sa predovšetkým kvôli jej cene a jednoduchosti dáva prednosť modrej LED s žltou fosforovou vrstvou pred RGB LED diódou. Šírka pásma modulácie je však obmedzená na desiatky MHz kvôli pomalej odozve fosforu, čo obmedzuje rýchlosť komunikačných dát. Použitím modrého filtra na strane prijímača však môžeme tento problém jednoducho odstrániť. Na obrázku 3-5 sú znázornené spomínané metódy na generovanie bieleho svetla pomocou LED diódy [10].



Obrázok 3-5 Spôsoby tvorby bieleho svetla pomocou LED [10]

### 3.5 Prijímač Li-Fi

Hlavné časti VLC prijímača tvoria: fotodióda/fotovoltaický článok, transimpedančný zosilňovač (TIA) a postekvalizačný obvod. Ďalej sa tu môže použiť napríklad optický koncentrátor na kompenzáciu vysokých priestorových útlmov alebo optický filter, na odfiltrovanie nežiadúceho okolitého svetla a pod. Blokovaná schéma typického VLC prijímača je zobrazená na obrázku 3-6.



Obrázok 3-6 Blokovaná schéma prijímača Li-Fi

#### 3.5.1 Fotovoltaický článok

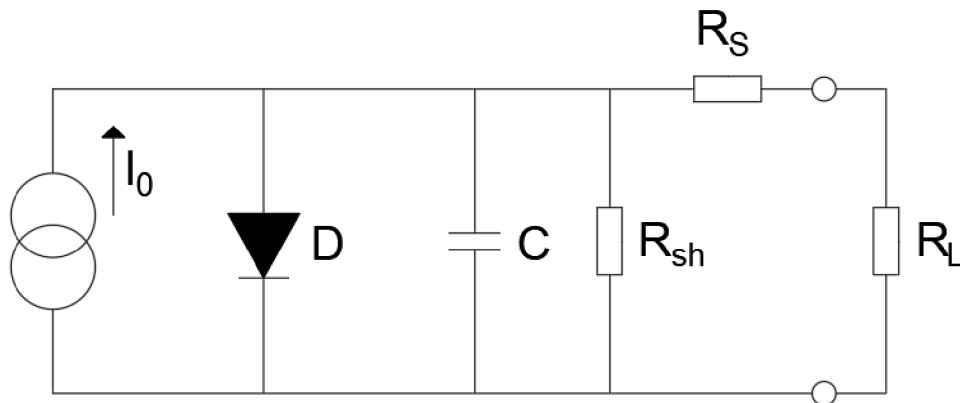
Základný prvok pri premene svetelnej energie na energiu elektrickú. Jedná sa prakticky o polovodičovú diódu, ktorej základ tvorí krátka kremíková doštička s vodivosťou typu P, na ktorej sa pri procese výroby vytvorí tenká vrstva polovodiča typu N medzi ktorými je tzv. P-N prechod. Pri osvetlení článku dochádza v polovodiči k vzniku vnútorného fotoelektrického javu pričom sa začínajú uvoľňovať záporné elektróny z kryštalickej mriežky v polovodiči. Vzniknuté elektrické napätie na P-N prechode má pre kremíkové články hodnotu okolo 0,5 V. Ďalej v článku nastáva premena elektrickej energie z energie dopadajúceho svetla. Pri pripojení spotrebiča do obvodu sa začnú vyrovnávať kladné a záporne náboje a obvodom začína tiecť elektrický prúd. Pri potrebe väčšieho napätia alebo prúdu je potreba zostaviť fotovoltaické panely, ktoré vznikajú zapojením samostatných článkov paralelne alebo sériovo.

#### 3.5.2 Fotodióda

Fotodióda je plošná polovodičová dióda, ktorej na oblasť PN prechodu preniká svetelné žiarenie. Vplyv osvetlenia prechodu môže byť sledovaný pri polarizácii napätím v závernom smere, kedy dochádza ku lineárnemu rastu prúdu diódou pri rovnomernom zväčšovaní osvetlenia. Odpor diódy v závernom smere je závislý na osvetlení. Reakcia na zmenu osvetlenia je veľmi rýchla, rádovo v  $\mu\text{s}$  až ns [15].

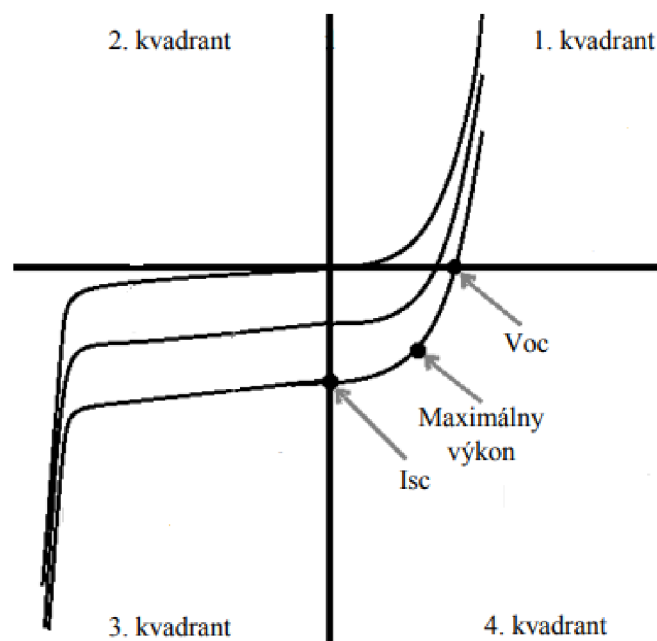
Na obrázku 3-7 je zobrazený náhradný obvod fotodiódy, zložený z ideálnych súčiastok. Súčasťou ideálnej fotodiódy je ideálny prúdový zdroj a ideálna dióda, pripojená paralelne na zdroj. Reálna fotodióda vykazuje kapacitu PN prechodu, ktorej veľkosť závisí materiály danej fotodiódy, na veľkosti PN prechodu a vzdialenosti plôch tohto prechodu. Záverným napätím dokážeme túto parazitnú kapacitu znížiť. Odpor  $R_{sh}$  predstavuje zvodový odpor prechodu, keďže fotodiódou pri závernom smere prechádza tzv. temný prúd aj keď samotná dióda nie je osvetlená. Odpor  $R_s$  je odpor polovodiča a odpor  $R_L$  je odpor záťaže.





Obrázok 3-7 Náhradný obvod fotodiódy

Na obrázku 3-8 je znázornená voltampérová charakteristika fotodiódy. VA charakteristika fotodiódy prechádza tromi kvadrantami (I., III. a IV. kvadrantom). V prvom kvadrante sa fotodióda správa ako normálna dióda. V treťom kvadrante pracuje fotodióda v tzv. odporovom (fotovodivostnom, pasívnom) režime a chová sa ako rezistor citlivý na svetlo. Vo štvrtom kvadrante zase fotodióda pracuje v tzv. hradlovom (fotovltaiickom, aktívnom) režime, kde sa chová ako zdroj elektrickej energie. Pri optickej komunikácii je linearita veľmi dôležitá a preto sa využíva tretí kvadrant.

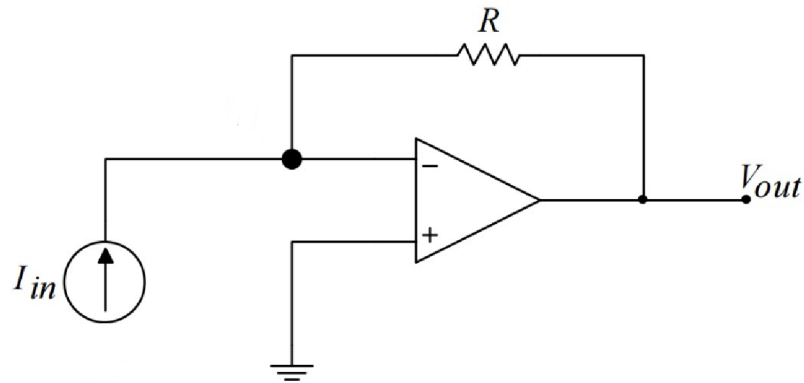


Obrázok 3-8 VA-charakteristika fotodiódy [13]

### 3.5.3 Transimpedančný zosilňovač

Transimpedančný zosilňovač je súčiastka, ktorá slúži na prevod fotoprúdu z fotodiódy na napätie. Umožňuje dosiahnutie veľkej šírky pásma a veľkej citlivosti. Na obrázku 3-9 je znázornené zapojenie transimpedančného zosilňovača.





Obrázok 3-9 Zapojenie transimpedančného zosilňovača

### 3.5.4 Post-ekvalizér

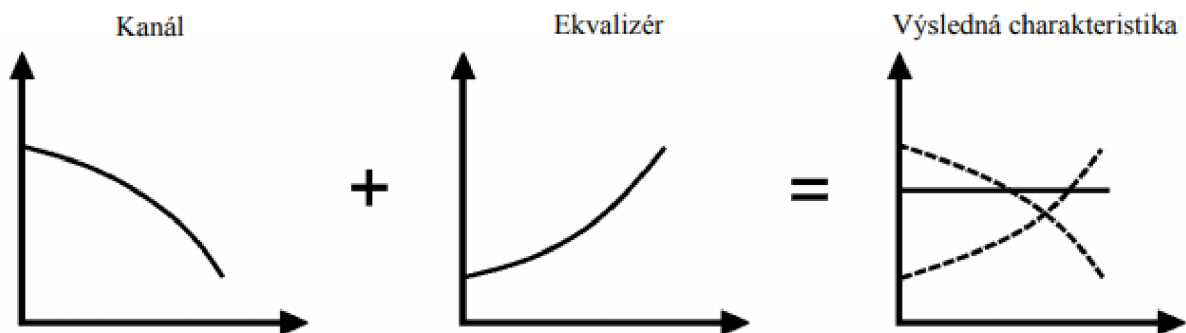
Post-ekvalizácia slúži na vyrovnanie frekvenčnej charakteristiky na prijímacej strane, ktorá bola pokrivená vysokofrekvenčnými stratami pri prenose. Viac o post-ekvalizácii je popísané v kapitole 3.6.

## 3.6 Pre a post-ekvalizácia

Typický digitálny komunikačný systém obsahuje tri základné bloky: vysielateľ, prijímač a kanál. Vysielateľ prevádza digitálne bity do elektrických alebo optických signálov. Signály následne prechádzajú cez optické kanály k prijímaču, kde sa signály prevádzajú späť na binárne údaje.

Reálny komunikačný kanál však nemá rovnakú odozvu pre všetky frekvencie a správa sa väčšinou ako dolnopriepustný filter. V tomto dôsledku dôjde k utlmeniu rôznych frekvenčných zložiek o odlišné množstvo energie a dôjde k rôznemu skresleniu fáze. Výsledkom týchto efektov je skreslenie pôvodného signálu, tzv. intersymbolová interferencia alebo aj ISI.

Aby sa udržala spoľahlivá dátová komunikácia prebiehajúca pri niekoľkých Gb/s alebo vyšších rýchlostiach, je potrebné vyrovnanie, aby došlo k odstráneniu alebo zníženiu ISI. Ekvalizér poskytuje inverznú kanálovú odozvu tak, že celková frekvenčná odozva je rovná požadovanej šírke pásma. Takáto ekvalizácia je znázornená na obrázku 3-10.



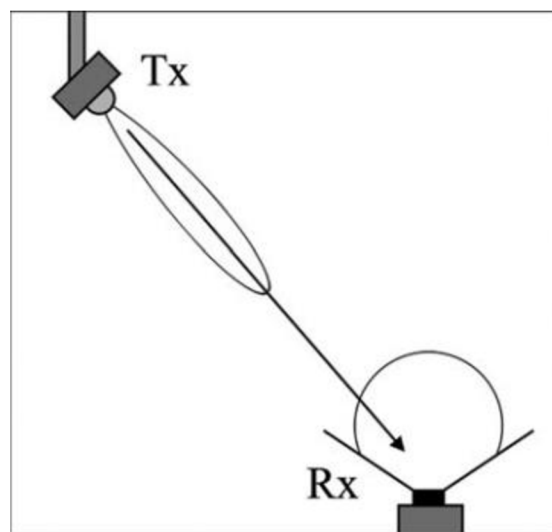
Obrázok 3-10 Ekvalizácia signálu [16]

Rozdiel medzi pre a post-ekvalizáciou spočíva v tom, ktorú frekvenčnú charakteristiku daný ekvalizér upravuje. Ak sa upravuje frekvenčná charakteristika signálu pred vysielaním, hovorím o pre-ekvalizácii. V prípade úpravy frekvenčnej charakteristiky po prijatí signálu sa jedná o post-ekvalizáciu. Jednotlivé ekvalizéry môžu byť nasadené buď spoločne alebo po jednom, t.j. ak vysielateľ pozná frekvenčnú odozvu kanálu, ekvalizér na strane prijímača môže byť odstránený, čo zjednodušuje konštrukciu prijímača [16].

### 3.7 Komunikačné scenáre

Kahn a Barry pôvodne kategorizovali vnútorné VLC scenáre na základe relatívnej sily medzi komponentmi signálu LOS a NLOS. Okrem toho, na základe relatívnej smernosti medzi vysielateľom a prijímačom, sú spojenia klasifikované ako smerované a nesmerované. Aj keď smerované spojenia LOS poskytujú vysokú intenzitu ožiarenia v prijímači a širokú šírku pásma koherencie kanálov, nie sú vhodné pre scenáre, kde sa vyžaduje vysoká mobilita používateľov, a spojenie možno ľahko prerušiť alebo zablokovať. Na druhej strane, aj keď neorientovaná komunikácia NLOS poskytuje nižšiu intenzitu ožiarenia v prijímači a užšiu šírku pásma koherencie kanálov, scenár NLOS lepšie podporuje mobilitu používateľov a je výrazne jednoduchšie prepojiť blokovanie. Intenzita ožiarenia v prijímači v nastavení komunikácie NLOS môže byť využitá pomocou odrazových vlastností objektov v miestnosti pomocou bodového rozptylu. Keďže primárnou funkciou spojenia viditeľného svetla je osvetlenie, je potrebné rovnomerné rozdelenie svetla v topológii miestnosti. Intenzitu ožarovania v prijímači je možné ďalej zvýšiť bodovým osvetlením [7].

Konfigurácia komunikačného spojenia LOS je znázornená na obrázku 3-2. Medzi vysielateľom (Tx) a prijímačom (Rx) svetla existuje priama cesta bez prekážok a priestorového vyrovnania.

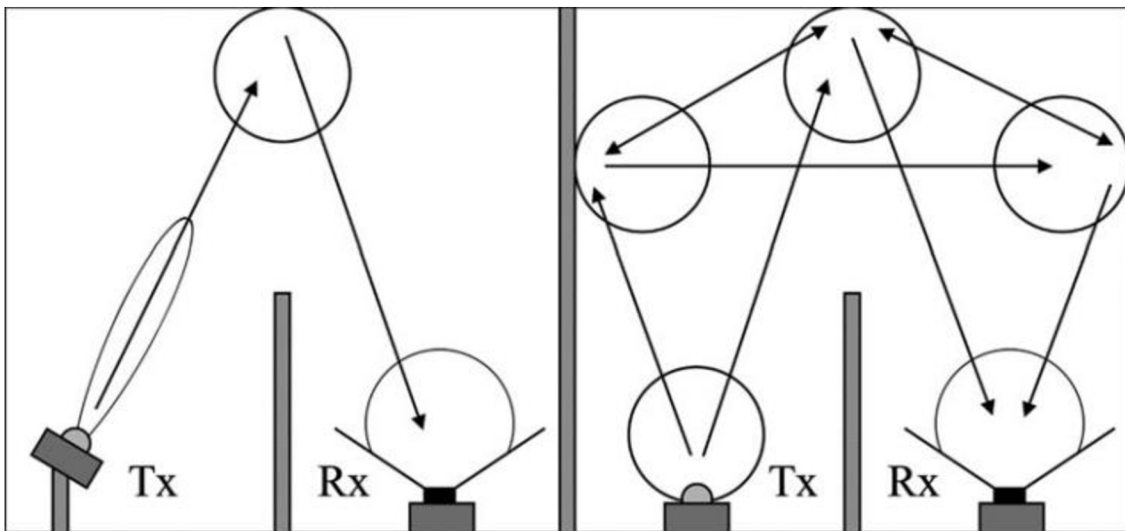


Obrázok 3-11 Komunikácia LOS [7]

V literatúre sa diskutuje o dvoch bežných konfiguráciách komunikačného spojenia NLOS:

- riadený NLOS
- nesmerovaný (difúzny) NLOS

Tieto dve nastavenia sú tiež znázornené na obrázku. Z dôvodu prekážok, napr. stena v miestnosti, vysielač a prijímač komunikujú prostredníctvom jediného odrazu na strope alebo inej stene v miestnosti. Pri komunikácii NLOS prichádza signál k prijímaču po jednom alebo viacerých odrazoch od predmetov v miestnosti. Dva scenáre NLOS sa líšia podľa smerovania systému vysielača. V prvom prípade, podľa NLOS, má vysielač veľmi úzku vyžarovaciu charakteristiku, ktorá premieta svetlo na jediné miesto na strope, ktoré slúži ako nový vysielač. Prenáša svetlo do prijímača na základe jeho odrazovej charakteristiky. V druhom prípade nesmerovaného NLOS má vysielač širokú vyžarovaciu charakteristiku, ktorá ožaruje veľkú časť odrazovej plochy. V uzavretej miestnosti je pravdepodobné, že vyžarované svetlo dorazí k prijímaču po jednom alebo viacerých odrazoch na povrchoch, čím sa vytvorí éter pre svetelný signál v miestnosti [7].



Obrázok 3-12 Riadená a difúzna komunikácia NLOS [7]

### 3.8 Normy

Skupina záujmových skupín pre viditeľné svetlo, certifikovaná podľa IEEE, s jej normou schválenou v roku 2011 od IEEE ako IEEE 802.15.7 je najaktívnejšia. Táto norma špecifikuje VLC pozostávajúce z M2M (mobile-to-mobile), F2M (fixed-to-mobile) a I2M (infrastructure-to-mobile) komunikácií. Hlavným účelom tejto normy je zamerať sa na komunikáciách stredného dosahu pre inteligentné dopravné systémy s nízkou rýchlosťou a na komunikácie krátkeho dosahu medzi dvoma mobilnými komunikáciami (M2M), alebo medzi pevnou a mobilnou komunikáciou (F2M) s vysokou rýchlosťou na výmenu údajov.

Rýchlosti prenosu dát sú podporované až do 1 Gb/s pomocou rôznych modulačných schém. IEEE 802.15.7 definuje fyzickú vrstvu (PHY) a riadenie prístupu k médiu (MAC) pre VLC/Li-Fi. MAC vrstva podporuje 3 multi-prístupové technológie:

- peer-to-peer
- konfiguráciu hviezd
- vysielací mód

Tiež sa zaoberá otázkami správy fyzických vrstiev, ako je adresovanie, vyhýbanie sa kolíziám a protokolov o potvrdení údajov. Fyzická vrstva je rozdelená na 3 typy, ktoré využívajú rôzne schémy modulácie:

- PHY I bol vytvorený pre vonkajšie aplikácie a pracuje od 11,67 Kb/s do 267,6 Kb/s
- PHY II umožňuje dosiahnuť prenosové rýchlosti od 1,25 Mbit/s do 96 Mbit/s
- PHY III sa používa pre mnohé zdroje emisií s osobitnou metódou modulácie, ktorá sa nazýva farebný posun (CSK) a môže poskytovať rýchlosti od 12 Mbit/s do 96 Mbit/s

Modulačné formáty pre PHY I a PHY II sú on-off keying a premenlivá pulzná polohová metóda (VPPM). Manchesterské kódovanie použité pre PHY I a PHY II vrstvy obsahuje hodiny vo vnútri prenášaných dát, reprezentujúce logiku 0 pomocou OOK symbolu "01" a logiku 1 pomocou OOK symbolu "10", toto všetko s DC komponentom. DC komponent zabraňuje zániku svetla v prípade rozšíreného chodu logiky 0 [17].

Existujú aj dva japonské normy pre sieť VLC:

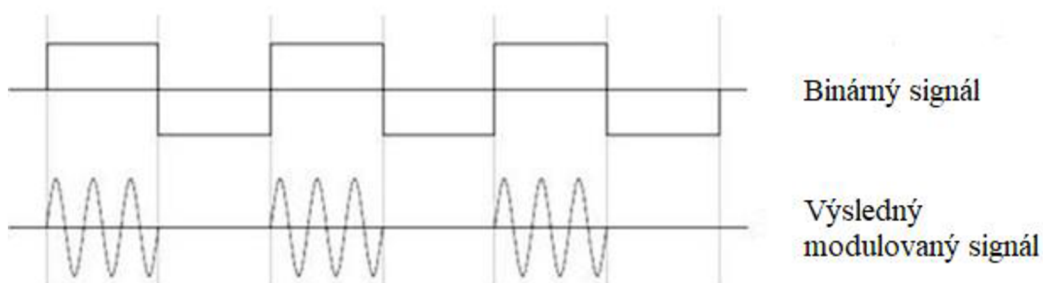
- JEITA CP-1221
- JEITA CP-1222

## 4 MODULAČNÉ TECHNIKY

Aby bolo možné skutočne vysielat' dáta pomocou LED, je potrebné ich najprv modulovať do nosného signálu. Nosný signál sa skladá zo svetelných impulzov (vlnení) vysielaných v krátkych intervaloch. Spôsob, akým sa to robí závisí od použitej modulačnej metódy. Medzi najpoužívanejšie modulačné techniky patria:

### 4.1 OOK (On Off Keying)

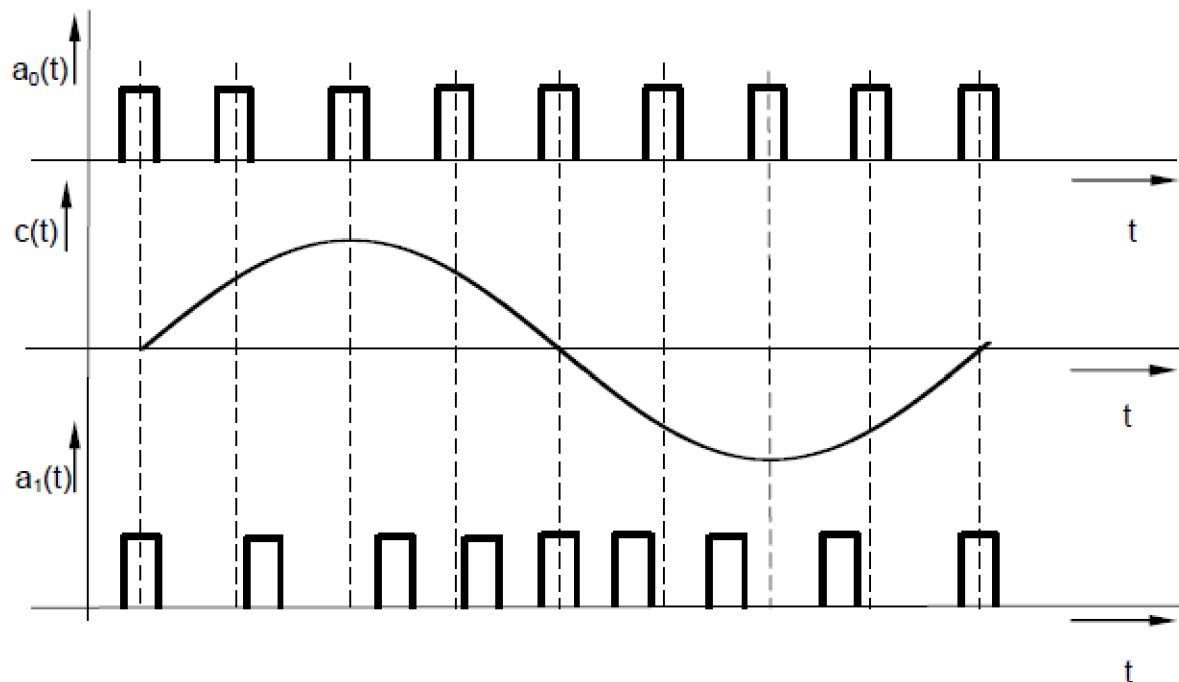
OOK označuje najjednoduchšiu a najčastejšie používanú amplitúdovú moduláciu (skrátene „ASK“), ktorá reprezentuje digitálne dáta za prítomnosti alebo absencie nosnej vlny (sínusoida). Táto modulácia je založená na rýchlom zapínaní a vypínaní LED diódy a v najjednoduchšej forme predstavuje prítomnosť nosiča binárnu 1 a neprítomnosť nosiča zase predstavuje binárnu 0. OOK sa najčastejšie využíva/la na prenos Morseovho kódu cez rádiové frekvencie, hoci v zásade môže byť použitá hocijaká digitálna schéma kódovania. Podľa normy 802.15.7 sa pre Li-Fi používa Manchesterské kódovanie tak, aby obdobie pozitívnych impulzov je rovnaké ako obdobie negatívnych, čo však zdvojnásobuje šírku pásma potrebnú na prenos dát. Pri vyšších rýchlostiach sa používa kódovanie s obmedzenou dĺžkou, ktoré je spektrálne efektívnejšie. Stmievanie je podporované pridaním rozšírenia OOK, ktoré upravuje súhrny výstup na správnu úroveň [18].



Obrázok 4-1 Modulácia OOK [19]

### 4.2 VPPM (Variable Pulse Position Modulation – Premennivá pulzná polohová modulácia)

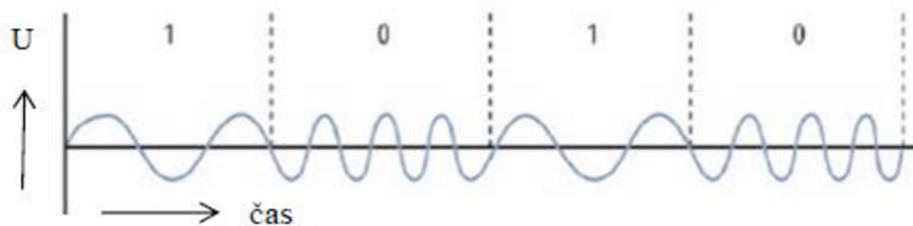
PPM kóduje dáta pomocou pozície impulzu v stanovenom časovom intervale. Trvanie obdobia obsahujúceho impulz musí byť dostatočne dlhé, aby bolo možné identifikovať rôzne polohy. VPPM je podobný ako PPM, ale umožňuje regulovať šírku impulzov tak, aby podporovala stmievanie svetla [20].



Obrázok 4-2 VPPM modulácia[20]

### 4.3 FSK (Frequency Shift Keying)

V tejto metóde sú údaje reprezentované zmenou frekvencií nosného signálu. Pred vysielaním dvoch odlišných hodnôt (binárna 0 a 1) musia existovať dve odlišné frekvencie [20].

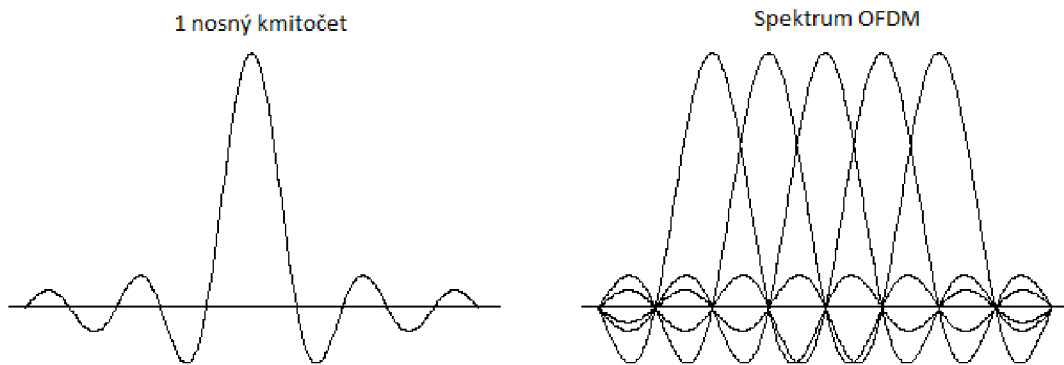


Obrázok 4-3 FSK modulácia [20]

### 4.4 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – Ortogonalná multiplexácia s frekvenčným delením)

OFDM je založená na použití niekoľko desiatok až tisícov nosných kmitočtov s rovnomerným odstupom. Tieto kmitočty sú ďalej modulované podľa potreby rôznymi moduláciami. Jednotlivé kmitočty sú navzájom ortogonálne (ich skalárny súčin je nulový), takže maximum každého nosného kmitočtu by sa malo prekrývať s nulovými prechodmi ostatných. Dátový tok kanálu sa ďalej delí na stovky dátových tokov jednotlivých nosných. OFDM je odolná voči viaccestnému šíreniu tým, že vo výsledku sú toky na jednotlivých nosných kmitočtoch prenášané relatívne nízkou modulačnou rýchlosťou. OFDM ďalej využíva vkladanie

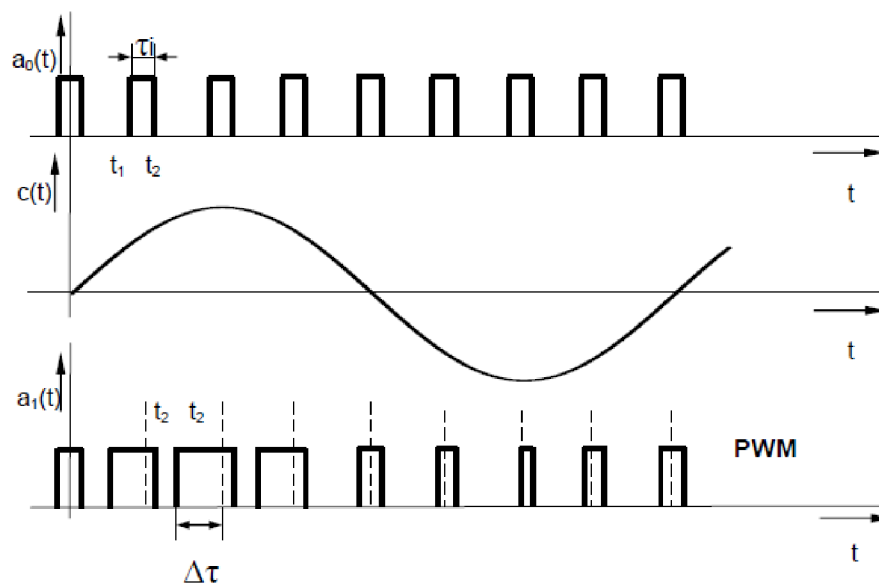
ochranného intervalu, teda času kedy sa nevysielala žiadna nová informácia. Na prijímacej strane je vďaka tomu prijímať nerušené vysielané dáta. OFDM sa teda vyznačuje vysokou odolnosťou proti interferenciám. Veľkou výhodou použitia OFDM pri bezdrôtových sieťach je ľahké prispôbenie meniacim sa podmienkam prenosového média. Ak sa vyskytuje v prenosovom pásme silne rušivé subpásmo, tak je možné toto pásmo vynechať pomocou zníženia rýchlosti prenosu [21].



Obrázok 4-4 OFDM modulácia [22]

#### 4.5 PWM (Pulse Width Modulation – Pulzná šírková modulácia)

PWM prenáša analógový signál pomocou dvojhodnotového signálu (1 alebo 0). 0 pri vypnutej dióde a 1 pri zapnutej. Prenos tohto signálu sa zobrazuje pomocou striedy (pomer signálu za určitý čas). V našom prípade pomer prenesených 1 a 0 za čas, počas ktorého je strieda zobrazená. Prenášaný signál sa ďalej demoduluje pomocou dolnofrekvenčnej priepusti [20].



Obrázok 4-5 PWM modulácia [20]

## 5 TECHNOLOGICKÉ TRENDY LI-FI

Li-Fi získala značnú pozornosť nielen od výskumníkov, ale aj od podnikateľov a začínajúcich podnikov, ktoré sú ochotné stať sa súčasťou obrovského trhu. Posun smerom k používaniu ekologických LED diód je ďalším skutočným prielomovým bodom v budúcnosti trhu Li-Fi. Navyše vďaka existujúcej infraštruktúre je investovanie do technológie lákavejšie. Nasadenie technológie Li-Fi do každej žiarovky poskytuje osvetlenie, pripojenie k internetu na požiadanie a iné možné použitia. Tieto vlastnosti viedli aktívnu skupinu nových začínajúcich podnikov a veľkých firiem na celom svete, aby venovali svoje úsilie vývoju technológie Li-Fi. Niektorí poskytovatelia riešení osvetlenia dokonca presúvajú svoj záujem z tradičného osvetlenia na poskytovanie inteligentných riešení osvetlenia. Li-Fi bola ideálna investícia pre mnoho svetových spoločností, umožňujúcich produkty, projekty a technológie. Táto časť práce obsahuje zoznam popredných svetových spoločností a ich úsilie o rast trhu Li-Fi [23].

### 5.1 Li-Fi produkty

Mnoho svetových firiem pracuje na výrobe Li-Fi komerčných produktov pripravených na použitie. Produkty Li-Fi sa prevažne delia do dvoch kategórií v závislosti od toho, ako sa údaje prenášajú v komunikačnej sieti:

- jednosmerné
- obojsmerné

V jednosmerných produktoch putujú dáta jednosmerne od zdroja k cieľu (od LED k prijímaciemu zariadeniu). Zvyčajne sa tieto produkty využívajú ako polohovacie systémy poskytujúce lokalizačné služby. Jednosmerným produktom využívajú pomoc iných prostriedkov bezdrôtovej komunikácie, ako sú Wi-Fi alebo Bluetooth. Obojsmerné produkty poskytujú obojsmernú komunikáciu pomocou uplinku a downlinku. Cieľom tejto produktovej rady je poskytnúť plne funkčný bezdrôtový sieťový systém založený na Li-Fi, ktorý umožňuje mobilitu s možnosťou viacnásobného prístupu k internetu a vysokými rýchlosťami prenosu. LED dióda v obojsmerných produktoch slúži ako prístupový bod, ktorý využíva pripojenie k ethernetu na zabezpečenie sieťových funkcií. Dongle (hardwarový kľúč) je podstatnou súčasťou tohoto typu komunikácie, pretože pôsobí ako prijímač downlinku a zároveň aj ako vysielač, ktorý vysiela uplink. Nasledujúce podkapitoly predstavujú najväčšie spoločnosti zaoberajúce sa vývojom Li-Fi a produkty ktoré uviedli na trh [23].



### 5.1.1 pureLiFi

Prvý komerčne dostupný produkt Li-Fi dostupný na trhu bol vyrobený spoločnosťou PureLiFi, ktorá sa špecializuje na technológiu VLC, s názvom „Li-1st“. Produkt poskytuje úplnú obojsmernú komunikáciu s kapacitou 11,5 Mb/s (približne 5 Mb/s uplink a 5 Mb/s downlink) a pokrytím 3 m. Produkt pozostáva zo stropnej jednotky (LED) a stolnej jednotky (dongle).

O rok neskôr spoločnosť PureLiFi uviedla Li-Flame, prvý produkt Li-Fi, ktorý umožňuje odovzdávanie informácií medzi viacerými prístupovými bodmi LED. Čelilo tiež značnému zlepšeniu prenosových dátových rýchlostí s kapacitou spojenia 10 Mb/s uplink a 10 Mb/s downlink.

Po Li-Flame bol jedným z ďalších produktov PureLiFi LiFi-X, ktorý umožňuje plnú obojsmernú komunikáciu s uplinkom a downlinkom okolo 42 Mb/s. Poskytuje tiež plnú mobilitu a viac používateľov.

Začiatkom roku 2018 spoločnosť PureLiFi preukázala väčšie odhodlanie vlastniť trh Li-Fi tým, že výrazne vylepšila svoje komponenty Li-Fi a uvoľnila novú generáciu produktov Li-Fi - LiFi-XC. Systém LiFi-XC sa skladá z prístupového bodu a USB kľúča. Toto riešenie podporuje mobilitu, možnosť viacerých používateľov, podporujúce naraz až 8 staníc a plne obojsmernú komunikáciu s rýchlosťou 43 Mbps uplink aj downlink. Poskytuje tiež lokalizačné služby. Tento hardvérový kľúč podporuje operačné systémy Windows 10, Windows 7, Linux a Mac OS a má vysoko výkonnú optiku so zorným uhlom 60°. Prístupový bod LiFi-XC podporuje rôzne svietidlá LED a podporuje možnosti napájania cez Ethernet (POE) a možnosti komunikácie po elektrickej sieti (PLC) [23].

### 5.1.2 OLEDCOMM

Ďalšou priekopníčkou spoločnosťou v oblasti výroby Li-Fi produktov je francúzska spoločnosť Oledcomm, ktorá sa špecializuje na navrhovanie riešení Li-Fi pre osvetľovacie systémy na báze LED. Oledcomm je na trhu od roku 2012 a spolupracuje s mnohými svetovými spoločnosťami v oblasti riešení osvetlenia, ako sú Philips, Thorn a OSRAM. Spoločnosť neobmedzila svoje riešenia na výrobky Li-Fi pripravené na použitie, ale namiesto toho navrhuje a dodáva firmvér, modemy, chipy a API / SDK. Spoločnosť Oledcomm poskytuje svoje riešenie v spolupráci s mnohými spoločnosťami tým, že svoje dva moduly Li-Fi vybavuje výrobkami iných spoločností. Výrobky Oledcomm sú vybavené technológiou GEOLiFi alebo LiFiNET spoločnosti Oledcomm.

GeoLiFi je jednosmerná technológia umožňujúca Li-Fi, ktorá udáva presnú geolokáciu vonkajších a vnútorných priestorov.

LiFiNet je obojsmerný komunikačný systém point-to-point v súlade s normou IEEE 802.15.7r1. Oledcomm okrem svojich rôznych funkcií a služieb navrhuje svoje riešenia tak, aby boli vhodné pre vnútorné aj vonkajšie prostredie. Technológiu LiFiNet je možné nainštalovať pomocou súpravy LiFiNet od spoločnosti Oledcomm, ktorá pozostáva z viacerých komponentov tvoriacich celý systém. Táto súprava je určená pre výrobcov osvetlenia, ktorí sú ochotní integrovať do svojich výrobkov obojsmerné Li-Fi. Integrácia vytvára príležitosť na transformáciu riešení osvetlenia na internetový zdroj

Oledcomm sa spojil so spoločnosťou Technilum, ktorá navrhuje pouličné osvetlenia, aby vybavila jeden zo svojich produktov technológiou GeoLiFi. Detekčný rozsah Li-Fi pouličného svetla pokrýva vzdialenosť až 4 m a má uhol svetelného lúča 120°. V roku 2016 bola mestská štvrť Camille Claudel v Palaiseau vo Francúzsku nainštalovaná 77 z nich. Cieľom projektu bolo vyskúšať technológiu Li-Fi v mestskom prostredí.

V roku 2018 spoločnosť Oledcomm predstavila jednu zo svojich najnovších inovácií na veľtrhu CES 2018 (Consumer Electric Show) v Las Vegas s názvom MyLiFi. Jedná sa o stolovú lampu fungujúcu ako obojsmerné komunikačné spojenie s vysokou rýchlosťou internetu až 23 Mb/s.

Oledcomm má okrem uvedených výrobkov aj širokú škálu iných produktov. GeoLiFi LED Tube, LiFiCare lampy pre kliniky a nemocnice, LiFiNet LED panel pre kancelárie, LudicLiFi podlahová lampa pre kancelárie, GeoLiFi tracker pre vozíky a LiFiNet pouličné osvetlenie sú ďalšie významné produkty Li-Fi vyrábané partnermi Oledcomm a vybavené inovatívnou technológiou Oledcomm [23].

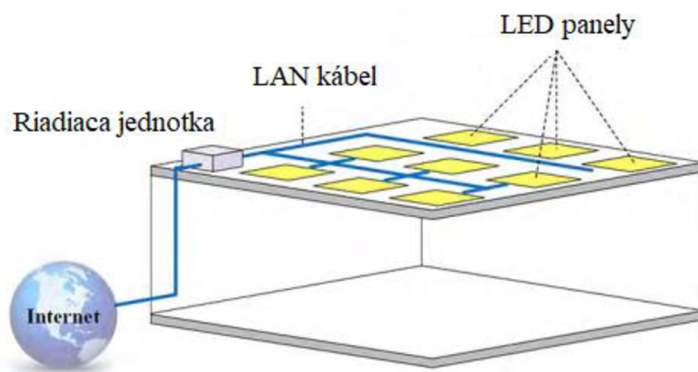
### 5.1.3 VLNComm

VLNComm je americká spoločnosť, ktorá sa zaoberá vývojom riešení založených na LED diódach so zabudovanými funkciami Li-Fi. VLNComm sa podieľal na formovaní štandardov IEEE 802.15.7 (VLC). Zameriava sa predovšetkým na poskytovanie vysokorýchlostnej obojsmernej komunikácie svetlom. Poskytuje dve riešenia podporujúce Li-Fi a hardvérový kľúč, ktorý je kompatibilný s oboma riešeniami. V porovnaní s inými spoločnosťami dosiahla VLNComm so svojím produktom vysoké rýchlosti prenosu dát (108 Mb/s downlink).

Prvým riešením, ktoré spoločnosť VLNComm ponúka, je stolová lampa s podporou Li-Fi s názvom LumiNet Desktop, ktorá sa dá pripojiť k Ethernetu prostredníctvom ethernetového portu a poskytuje rýchlosť 23 Mb/s uplink a 23 Mb/s downlink. Lampa môže pripojiť až sedem používateľov súčasne. Má plochu pokrytia 1 m<sup>2</sup> a na prenos údajov používa RGB LED.

Ďalším produktom je stropné riešenie s názvom LumiNex Panel, ktoré poskytuje rýchlosť sťahovania 108 Mb/s, keď je spojený s kľúčom LumiStick 2. Uplink má rýchlosť prenosu 53 Mb/s a môže pokrývať plochu až 48 m<sup>2</sup>. Riešenie môže poskytovať internet až 15 používateľom s nízkou latenciou (menej ako 0,4 ms). Obr. 5-1 zobrazuje riešenie LumiNex vo vnútornom prostredí, kde je každý panel pripojený k sieti LAN pomocou ethernetového kábla.

LumiStick 2 je hardvérový kľúč navrhnutý spoločnosťou VLNComm kompatibilný s oboma jeho produktmi. Má zorné pole 120° a podporuje operačné systémy Windows, Mac OS a Linux [23].



Obrázok 5-1 Riešenie LumiNex vo vnútornom prostredí [23]

## 5.2 Možné využitie Li-Fi

1. Zdravotníctvo – Kvôli znepokojeniu nad ožiarením, operačné sály neumožňujú Wi-Fi, a aj keď v niekoľkých nemocniciach je Wi-Fi dostupné, interferencie z počítačov a mobilných telefónov môžu blokovat' signály z lekárskeho a monitorovacieho zariadenia.. Odpoveďou na tieto problémy môže byť práve Li-Fi. Svietidlá sú neodmysliteľnou súčasťou operačných sál, a preto sa Li-Fi môže použiť pre moderné lekárske zariadenia. Navyše, Li-Fi nevytvára žiadne elektromagnetické rušenie, a tým nezasahuje do žiadnych lekárskeho prístrojov, ako sú skenery s magnetickou rezonanciou.
2. Letectvo – Wi-Fi je často zakázané v lietadlách. Vzhľadom na to, že lietadlá už obsahujú viacero svetiel, môže byť Li-Fi využité aj práve v letectve.
3. Elektrárne a nebezpečné prostredia – Wi-Fi nie je vhodné pre citlivé prostredia ako sú elektrárne. Aj napriek tomu elektrárne stále potrebujú rýchle a vzájomné prepojené dátové systémy na monitorovanie dopytu, teploty, intenzity atď. Namiesto Wi-Fi môže Li-Fi poskytovať bezpečnú konektivitu v celej elektrárni a taktiež ponúka bezpečnú alternatívu voči elektromagnetickému rušeniu rádiovými vlnami v prostrediach, ako sú napríklad petrochemické závody a bane.
4. Podvodné prieskumy – Diaľkovo ovládané vozidlá pod vodnou hladinou alebo aj ROV pracujú dobre, s výnimkou situácií, keď kábel nie je dostatočne dlhý na úplné preskúmanie podvodnej oblasti, alebo keď vozidlo uviazne. Ak by sme namiesto káblov dokázali použiť svetlo, ROV by boli voľnejšie na preskúmanie. Vďaka Li-Fi by mohli byť svetlomety použité aj na vzájomnú komunikáciu, spracovanie údajov a hlásenia zistení späť na povrch v pravidelných intervaloch, pri súčasnom prijímaní ďalších pokynov. Kvôli silnej absorpcii signálu nie je možné použiť rádiové vlny a akustické vlny majú nízku šírku pásma a navyše narušujú morský život.
5. Doprava – Li-Fi by sa mohlo využívať na vzájomnú komunikáciu medzi LED svetlami automobilov, aby sa znížilo riziko vzniku dopravných nehôd. LED svetlá sa využívajú pre rôzne typy automobilov. Dopravné signály, nápisy a pouličné lampy tiež využívajú LED

diódy. S týmito svietiacimi LED diódami môže byť Li-Fi použité pre efektívnu komunikáciu medzi vozidlami a dopravnými zariadeniami. Samozrejme to všetko však povedie ku zvýšenému riadeniu dopravy a zvýšenej bezpečnosti.

6. Inteligentné osvetlenie – Pouličné lampy môžu byť v budúcnosti použité na poskytovanie hotspotov Li-Fi a taktiež môžu byť použité na ovládanie a monitorovanie osvetlenia a údajov.
7. Mobilné prepojenia – Notebooky, tablety, smartfóny a rôzne iné mobilné zariadenia sa môžu vzájomne vysokorýchlostne prepájať pomocou Li-Fi, podobne ako dnes využívajú Wi-Fi.
8. Vnútoraná bezdrôtová komunikácia – Li-Fi je vhodná pre vnútornú bezdrôtovú komunikáciu a prenos dát. Využíva bezplatné, nelicencované spektrum a nie je ovplyvnená RF šumom. Navyše by poskytovala dostatočné množstvo svetelných zdrojov a dostatočnú bezpečnosť, keďže nedokáže prechádzať stenami, ako bolo už spomenuté.
9. Maloobchodná analýza – Li-Fi môže mať široké uplatnenie v maloobchodnej analýze. Väčšina maloobchodných predajní pozostáva z bohatého prostredia osvetlenia, ktoré môžu byť využité pre Li-Fi. Li-Fi sa môže používať na sledovanie správania zákazníkov, keďže v dnešnej dobe už takmer každý využíva smartfóny. Li-Fi by mohla byť použitá na pripojenie k týmto smartfónom na prepojenie ľudí, produktov a nákupov, a tým by výrazne zjednodušila celkový nákupný proces.

### 5.3 Súčasné aplikačné riešenia Li-Fi

V roku 2015 spoločnosť Philips lighting solutions spolupracovala s maloobchodnými predajňami Carrefour Lille vo Francúzsku, s cieľom inštalovať komunikačný systém založený na LED. Tento systém umožňuje zákazníkom nájsť produkty v obchode pomocou špeciálne navrhutej aplikácie pre smartfóny. Systém transformuje nakupovanie na interaktívny zážitok a poskytuje nové služby zákazníkom Carrefouru. Mobilná aplikácia vyvinutá pre Carrefour Lille mala za cieľ otestovať novú službu, ktorá presahuje osvetlenie. Hlavným cieľom aplikácie bolo umožniť zákazníkom vytvárať nákupné zoznamy a prijímať rôzne propagačné akcie. Keď je zákazník v obchode, môže pomocou mobilnej aplikácie ľahko vyhľadať všetky produkty v nákupnom zozname. Aplikácia je k dispozícii pre systémy iOS aj Android. Je vyvinutý spoločnosťou Philips v spolupráci s IBA a obchodom Carrefour

V roku 2016 spoločnosť Oledcomm spolupracovala s maloobchodným predajcom spoločnosti E. Leclerc vo Francúzsku pri vývoji vnútorného polohovacieho systému a mobilnej aplikácie kompatibilnej s LiFi. LED svetlá v obchode sú vybavené technológiou Li-Fi a rukoväte vozíkov sú vybavené modulom sledovania GeoLiFi od spoločnosti Oledcomm, ktorý registruje dráhu vozíka. Geolokalizácia LED umožňuje systému presne sledovať cestu zákazníka, ktorá pomáha majiteľom spoločnosti E. Leclerc naučiť sa ich nákupné správanie hostí. Informácie o činnostiach zákazníkov vo vnútri obchodu, ako sú napríklad horúce a studené zóny, sa navyše odosielajú do cloudu Li-Fi, aby ich obchod mohol sledovať a analyzovať. Mobilná aplikácia

pomáha zákazníkovi lokalizovať produkty v obchode. Aby mohli zákazníci aplikáciu používať, musia zadať iba názov produktu a aplikácia ich zavedie na miesto produktu na zobrazenej mape obchodu. Zákazníci môžu tiež dostávať prispôbené oznámenia a kupóny, keď sa nachádzajú v blízkosti relevantných produktov. Aplikácia sleduje správanie nakupujúcich a zdôrazňuje oblasť, v ktorej trávajú väčšinu času.

Spoločnosť Oledcomm začala projekt v múzeu Grand Curtius v Belgicku, ktorého cieľom je inštalácia navigačného systému Li-Fi, ktorý návštevníkom múzea vytvorí jedinečný zážitok. LED diódy pozdĺž múzea sú vybavené technológiou Li-Fi, ktorá vedie návštevníkov po celej ich ceste. Návštevníci už nemusia hľadať informácie o dielach. Pri použití technológie Li-Fi musia návštevníci stáť iba pod LED diódou blízko umeleckého diela a systém Li-Fi pošle vhodný popis špeciálnej aplikácii nainštalovanej v tablete Li-Fi múzea. Aplikácia poskytuje viac možností tým, že umožňuje popis ako text, obrázok alebo dokonca video.

V roku 2016, PureLiFi a Lucibel, francúzska spoločnosť, ktorá navrhuje a vyrába riešenia osvetlenia na báze technológie LED, spolupracovala na projekte zameranom na zabezpečenie prístupu na internet prostredníctvom svetla. Spolupráca medzi týmito dvoma spoločnosťami vyústila do vývoja prvého priemyselného svietidla Li-Fi v Európe, ktoré podporuje obojsmerné prenosy údajov až do 42 Mb/s. Použitie Li-Fi svietidla s LiFi-X adaptérom, ktorý je produktom pureLiFi, poskytuje obojsmerný Li-Fi systém. Li-Fi svietidlo funguje ako prístupový bod pripojený k sieti pomocou POE alebo PLC. Má infračervený prijímač používaný na detekciu uplinku z hardvérového kľúča. LiFi-X kľúč sa pripája k mobilnému zariadeniu alebo notebooku cez USB porty a obsahuje fotoreceptor, ktorý prijíma signál zo svietidla, a infračervený vysielateľ, ktorý odosiela dáta späť. Toto riešenie bolo nainštalované na viacerých miestach vrátane sídla spoločnosti Microsoft v Paríži.

Aswaaq je mobilná aplikácia, ktorá bola vyvinutá na geolokáciu produktov v maloobchode Aswaaq v Dubaji. V obchode sa používajú vnútorné LED diódy vybavené VLC. Aplikácia umožňuje zákazníkovi zostaviť si nákupný zoznam v aplikácii doma. Po príchode do obchodu aplikácia vypočíta najkratšiu trasu, ktorá sa použije na dokončenie nákupného zoznamu. Ďalej umožňuje správcovi propagovať predmety pre zákazníkov. Tieto propagácie sa objavujú počas nákupnej cesty a dajú sa prispôbiť podľa preferencií zákazníka a histórie nakupovania. Aplikácia je k dispozícii pre systémy iOS aj Android a bola vyvinutá spoločnosťou Philips v spolupráci s obchodmi Aisle411, ValueLabs, AlphaData a Aswaaq.

Väčšina aplikácií sa používa na navigáciu a poradenstvo zákazníkom vo vnútri budov. Väčšina aplikácií je špecifická pre konkrétne funkcie vo vzťahu k oblasti, v ktorej sú nasadené, ako je napríklad navigácia v maloobchode alebo cestovný ruch. Obsah aplikácií generujú a spravujú správcovia systému. To ukazuje na obmedzenia, v ktorých sa koncoví používatelia nemôžu podieľať na procese tvorby obsahu, a preto vytvára medzeru, ktorú je potrebné vyplniť, aby bolo možné využívať obrovské kontextové údaje zhromaždené od koncových používateľov. Môže to byť motivácia pre vývoj, založený na Li-Fi, ktorý využíva svetelné zdroje integrované s technológiou Li-Fi na zhromažďovanie obrovského množstva údajov na ďalšiu analýzu a spracovanie [23].

## 6 NÁVRH SVIETIDLA

V praktickej časti tejto diplomovej práce je popísaný postup zhotovenia systému, ktorý pracuje na báze Li-Fi. Pomocou tohto systému je znázornené, že je možné pomocou svetelného žiarenia prenášať dáta v reálnom čase. V tomto prípade budú dáta predstavovať zvukový záznam, ktorý bude prenášaný pomocou LED pásika, ktorý premení analógový signál na optický. LED pásik vysokofrekvenčne spína, čo zaručuje, že ľudské oko nezaznamená žiadnu zmenu v intenzite svetla a nebude sa mu svetlo javiť ako preblikávajúce. Vysielaný signál bude následne dekódovaný pomocou fotovoltaiického článku, ktorý signál premení späť na signál analógový. Tabuľka predstavuje zoznam použitých súčiastok na zostrojenie tohto systému.

Tabuľka 6-1 Zoznam použitých súčiastok

Súčiastka	Počet ks
12V LED pásik	1
Fotovoltaiický článok 5,5V 110mA	1
Reproduktor Sony SRS- XB10	1
Zdroj audio signálu (mobil, notebook)	1
3,5mm jack	2
9V Batéria	1
Konektor pre batériu	1
Prepojovacie kable	
Puzdro pre LED pásik	1

## 6.1 Návrh vysielča

V prvom rade bolo potrebné vyriešiť prepojenie 3,5mm audio jacku s obvodom. Pre prepojenie kábla s audio jackom sme použili pájku, kde sme jednu stranu audia (je jedno, či ľavú alebo pravú) prepojili s kladným pólom konektora pre batériu, ktorá slúži ako zdroj napätia pretože zdroj audio signálu neposkytuje dostatočný výkon pre LED pásik. Druhú stranu audia sme prepojili so zemou a následne sme pripájkovali kábel, ktorý spája zem 3,5mm audio jacku s kladným pólom na LED pásiku.. Zapojenie audio jacku na strane vysielča je znázornené na obrázku 6-1.



*Obrázok 6-1 Zapojenie 3,5mm jacku na strane vysielča*

Následne sme prepojili záporný pól konektora batérie so záporným pólom na LED pásiku a konektor sme pripojili na 9V batériu. Na obrázku 6-2 je znázornené zostavenie vysielacieho obvodu, ktoré sme nakoniec ešte pripojili ku zdroju audio signálu (v našom prípade mobilnému telefónu). Je potrebné zmieniť, že na ekvalizéri v mobilnom telefóne bolo potrebné prefiltrovať audio signál od nižších frekvencií, čo spôsobovalo preblikávanie LED, ktoré je nepríjemné pre pozorovateľa a nesplňovalo by to podmienky pre Li-Fi, keďže svetlo by malo svietiť kontinuálne a ľudské oko by to nemalo mať možnosť zaznamenať.



*Obrázok 6-2 Vysielač okruh navrhovaného systému*

## 6.2 Návrh prijímača

Podobne ako pri vysielačom okruhu aj tu bolo potrebné najprv vyriešiť zapojenie 3,5mm audio jacku. Jednu audio stranu sme prepojili s kladným pólom na fotovolatickom článku a zem 3,5mm audio jacku sme prepojili so záporným pólom fotovoltackého článku ako je možné vidieť na obrázku 6-3.



*Obrázok 6-3 Zapojenie 3,5mm jacku na strane prijímača*



Následne sme pomocou audio jacku prepojili fotovoltaiický článok s reproduktorom ako je znázornené na obrázku 6-4. Je dôležité zmieniť, že náš reproduktor už obsahoval vstavaný zosilňovač, bez ktorého by nebol zvuk zreteľne počuť. Týmto bol celý systém pripravený k použitiu.



Obrázok 6-4 Prijímací okruh navrhovaného systému

### 6.3 Pozorovania

Po zapojení systému sme na mobile spustili audio a začali pozorovať, čo sa deje s výstupným signálom pri rôznych scenároch.

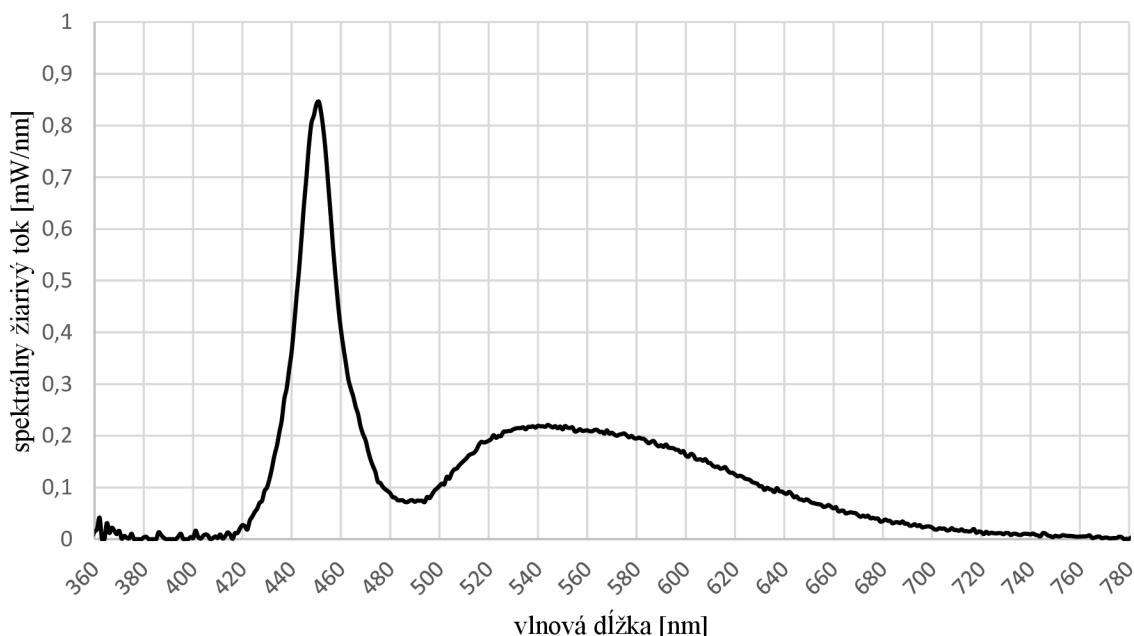
V prvom rade sme pozorovali ako sa intenzita signálu mení s narastajúcou sa vzdialenosťou medzi vysielačom a prijímačom. Podľa predpokladaní sa s narastajúcou vzdialenosťou intenzita zvuku, ktorú reproduktor vysielať znižovala. Avšak pokiaľ dopadalo svetlo s čo i len malou intenzitou z LED na fotovoltaiický článok, zvuk sa prenášal, aj keď výstup nebol zreteľný. Toto pozorovanie prebiehalo v tmavšej miestnosti a vzdialenosť, po ktorú bolo zvuk zreteľne počuť bola približne 50cm, po tejto vzdialenosti už zvuk zreteľne slabol a z reproduktora bolo počuť šum, ktorý sa výrazne zosilňoval a zvuk bolo počuť iba pri bezprostrednom priložení ucha k reproduktoru. Audio signál sme dokázali preniesť až na vzdialenosť okolo 4,5 metra od zdroja svetla.

Ďalej sme pozorovali, či sa audio signál bude prenesený aj pri odrazoch, t. j. vyskúšali sme prenos pomocou NLOS komunikácie. Podľa predpokladov sa audio signál preniesol, avšak intenzita výstupného zvuku závisela na materiály od ktorého sa zvuk odrážal, keďže rozličné povrchy a materiály majú rôzne hodnoty odrazivosti. Toto potvrdilo, že Li-Fi môže fungovať aj pri prekážkach medzi vysielačom a prijímačom a pri použití vhodných odrazových materiálov by sme nemuseli ani poznať rozdiel medzi tým či by sa jednalo o LOS alebo NLOS komunikáciu.

Ako ďalšie sme skúsili, či tento systém dokáže preniesť audio signál cez predmety. Tu podľa predpokladov záležalo na použitej prekážke ktorú sme medzi vysieláč a prijímač umiestnili. Cez obyčajné sklo nemal prenos žiaden problém. Ďalej sme vyskúšali sklo zo slnečných okuliarov, ktoré by malo znížiť intenzitu, čo sa zaznamenalo aj na intenzite výstupného zvuku, ktorá bola podstatne nižšia ako pri použití obyčajného skla. Samozrejme pri použití materiálov, ktoré nemajú žiadnu svetelnú priepustnosť sa signál nepreniesol.

Ďalej sme skúsili, či priloženie iného zdroja svetla bude mať vplyv na výstupný zvukový signál. Po priložení druhého zdroja svetla, čo v našom prípade predstavovalo svetlo z mobilného telefónu, však nedošlo k žiadnej zmene. Avšak pri priložení ďalšieho svetelného zdroja, ktorým bol odlišný LED pásik bol zaznamenaný výrazný šum na výstupe. Toto mohlo byť spôsobené tým, že druhý LED pásik o väčšej intenzite osvetlenia, ktorý bol napájaný striedavým zdrojom vysokofrekvenčne spínal na odlišnej frekvencii, čo bolo zaznamenávané našim prijímačom a výsledkom tohto bol nežiadúci šum na výstupe.

Naše zostrojené svietidlo sme následne premerali v guľovom integrátore. Guľový integrátor je fotometrický laboratórny prístroj, ktorý slúži na meranie svetelného toku svetelných zdrojov. Prístroj nameral teplotu chromatičnosti 12 882 K a svetelný tok 13,3lm. Keďže sme ako zdroj svetla použili studený LED pásik teplota zodpovedá správnej hodnote, keďže 12 882 K na stupnici predstavuje studenú farbu a ako je aj na obrázku 6-5 vidno, intenzita tohto zmeraného svietidla je najväčšia vo vlnových dĺžkach modrej farby. Svetelný tok však má príliš malú hodnotu, čo je spôsobené tým, že napájame 12V LED pásik pomocou 9V batérie, čo samozrejme nie je ideálne.



Obrázok 6-5 Spektrum zostrojeného svietidla

## 7 ZÁVER

Cieľom práce bolo oboznámiť sa s problematikou technológie Li-Fi, ktorá je schopná bezdrôtovo prenášať modulované signály za pomoci svetla. V úvode práce sme predstavili spôsoby komunikácie s využitím svetla v minulosti, ďalej sme popísali princípy fungovania Li-Fi, aké komponenty využíva k vysielaniu, prenášaníu a príjmu dát. Popísali sme možné spôsoby modulácie dát na nosné signály. Popísali sme jednotlivé komponenty ktoré sú súčasťou optických frontendov. Porovnali sme túto novú technológiu s už existujúcimi podobnými technológiami akými sú Wi-Fi či prenos pomocou IR.

Ďalej sme sa zamerali na technologické trendy v oblasti Li-Fi. Uviedli sme popredné firmy na trhu s Li-Fi a výsledky ich doterajšieho výskumu, ako aj aplikačné riešenia Li-Fi v praxi. Ďalej sme uviedli možné odvetvia, v ktorých by sa mohla Li-Fi využívať.

Následne sme zostrojili systém pracujúci na princípe Li-Fi, ktorý prenášal audio signál pomocou svetla. Pozorovali sme ako sa výstupná intenzita mení pri rôznych scenároch ako je napríklad vzdialenosť prijímača od vysielča, ako ovplyvní odraz svetla výsledný prenos v prípade ak je medzi vysielčom a prijímačom prekážka a podobne. Pri zmene vzdialenosti medzi vysielčom a prijímačom sa intenzita výstupného zvuku znižovala, keďže dochádzalo k znižovaniu dopadajúcej intenzity na fotovoltický článok. Ďalej sme sa zamerali na možnosť komunikácie cez odraz teda NLOS komunikáciu, čo samozrejme závisí na odrazových vlastnostiach daného povrchu, od ktorého sa svetlo odrážalo.

Ďalej sme vykonali meranie nami zostrojeného svietidla v guľovom integrátoe, zmerali teplotu chromatičnosti, svetelný tok svietidla a zostrojili sme spektrálny priebeh pre dané svietidlo.

Z nášho pohľadu predstavuje Li-Fi zaujímavú technológiu, ktorá by mohla mať uplatnenia v každodennej komunikácii. Ako iné technológie aj Li-Fi však prichádza s nejakými nedostatkami, čo sú v tomto prípade obmedzená komunikačná vzdialenosť a fakt, že svetlo nedokáže prechádzať stenami, čo z nej robí síce bezpečnú komunikáciu ale obmedzuje to aplikačné možnosti tejto technológie.

## 8 POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] *History Behind Semaphore Flags* [online]. [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <https://flagexpressions.wordpress.com/2010/03/23/history-behind- semaphore-flags/>
- [2] *Alexander Graham Bell's Photophone Was An Invention Ahead of Its Time* [online]. [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <https://www.thoughtco.com/alexander-graham-bells-photophone-1992318>
- [3] GFELLER, Fritz R. a Urs BAPST. *Wireless In-House Data Communication via Diffuse Infrared Radiation* [online]. November 1979 [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1455777>
- [4] MARSH, Gene W. a Joesph M. KAHN. *Performance Evaluation of Experimental 50-Mb/s Diffuse Infrared Wireless Link Using On-Off Keying with Decision-Feedback Equalization* [online]. November 1996 [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=544466>
- [5] TANAKA, Y. a kol. [online] 2003. Indoor visible light data transmission system utilizing white LED lights. *IEICE Transactions on Communications* [cit. 2020-05-29] Dostupné z: <https://keio.pure.elsevier.com/en/publications/indoor-visible-light-data-transmission-system-utilizing-white-led>
- [6] AFGANI, Mostafa Z. a kol. *Visible Light Communication Using OFDM* [online]. November 1996 [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1649137>
- [7] DIMITROV, Svilen a Harald HAAS. *Principles of LED light communications: towards networked Li-Fi*. Cambridge: Cambridge University Press, 2015. ISBN 978-1-107-04942-0.
- [8] IEEE Std. 802.15.7-2011, *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks, Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light*, IEEE Std., 2011 [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6016195>
- [9] *LiFi Pros & Cons* [online]. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://lifi.co/lifi-pros-cons/>
- [10] HUSSEIN, Ahmed T. *Visible Light Communication System*. Oulu, 2016. Dizertačná práca. University of Leeds.

- [11] KAMSULA, Pekka. *DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A BIDIRECTIONAL VISIBLE LIGHT COMMUNICATION TESTBED*. Oulu, 2015. Diplomová práca. University of Oulu.
- [12] *Svetlo všeobecne* [online]. [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <https://www.inelti.sk/led-technologie/svetlo-vseobecne/>
- [13] PONIŠT, Dávid. *Návrh a realizace post-ekvalizačního obvodu pro VLC komunikační systém*. Ostrava, 2016. Diplomová práca. Technická univerzita Ostrava.
- [14] *Čo je to LED?* [online]. [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <https://www.uspornaziarovka.sk/co-je-to-led/>
- [15] HORÁK, J. *Optické pojítka*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009.
- [16] SUN, Ruifeng. *A Low-Power 20-Gb/s Continuous-Time Adaptive Passive Equalizer*. 2005. B. S. Tsinghua University.
- [17] CĂILEAN, Alin-Mihai. *Study, implementation and optimization of a visible light communications system. Application to automotive field*. Paris, 2014. Dizertačná práca. De l'Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines.
- [18] *Digital Modulation one bit at a time* [online]. [cit. 2019-05-29]. Dostupné z: [https://www.st-andrews.ac.uk/~www\\_pa/Scots\\_Guide/RadCom/part19/page1.html](https://www.st-andrews.ac.uk/~www_pa/Scots_Guide/RadCom/part19/page1.html)
- [19] [online]. In: . [cit. 2019-05-29]. Dostupné z: <https://slideplayer.com/slide/733027/2/images/16/On-Off+Keying+%28OOK%29+Modulating+Signal+%2Cm%28t%29+Modulated+Signal+Carrier.jpg>
- [20] GLADIŠOVÁ, Iveta a Ján MIHÁLIK. *Modulované signály*. Košice, 2016. Technická Univerita v Košiciach.
- [21] *OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing* [online]. [cit. 2019-05-29]. Dostupné z: <https://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/ofdm/ofdm-basics-tutorial.php>
- [22] [online]. In: . [cit. 2018-12-17]. Dostupné z: <http://www.wirelesscommunication.nl/reference/chaptr05/ofdm/images/fig4.gif>

- 
- [23] ALBRAHEEM, Lamyia I. a kol. *Toward Designing a Li-Fi-Based Hierarchical IoT Architecture* [online]. [cit. 2020-05-29]. Dostupné z:  
<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8413064&tag=1>