

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

# Softwarově definovaná optika

## Software-Defined Optics

# Zadání bakalářské práce

Student: **Martin Dratnal**

Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601R013 Telekomunikační technika

Téma: **Softwarově definovaná optika**  
**Software-Defined Optics**

Jazyk vypracování: čeština

## Zásady pro vypracování:

Bakalářská práce se zaměřuje na rozsáhlé testování prototypů svítidel pro komunikaci viditelným spektrem světla (VLC). Celý systém je založen na platformě od National Instruments, přičemž hardware se skládá z modifikovaných softwarově definovaných rádií (NI SDR) a software je implementován ve vývojové platformě LabVIEW. K měření budou využity jak komerčně dostupné komponenty, jmenovitě Thorlabs fotodetektory, Phillips stropní svítidlo aj., tak i nové prototypy svítidel se zabudovaným Bias-Tee. Práce se též věnuje popisu různých variant modulačního schématu OFDM, které je možné využít v technologii VLC. Na základě realizovaných experimentů budou stanoveny limitní hodnoty měřicí platformy pro vnitřní komunikaci světlem a také možné budoucí směry výzkumu. Cílem bakalářské práce je otestovat limity prototypů stropních svítidel pro VLC technologie a porovnat je s komerčně dostupným řešením firmy Phillips, které jsou nyní používány v rámci budovy FEI VŠB TUO.

## Postup řešení:

1. Literární rešerše současného stavu problematiky komunikace viditelným spektrem světla, primárně zaměřená na modulace OFDM a FBMC. Rozbor standardu IEEE 802.15.7 poslední revize. Klasifikace a rozbor jednotlivých modifikovaných variant OFDM, s důrazem na složitost návrhu modulátoru, spektrální účinnost a možnost implementace v oblasti VLC.
2. Návrh a realizace experimentů pro ověření funkčnosti měřicí platformy pro VLC komunikace. Rozsáhlé měření za účelem testování limitů platformy. Měření vlivu atmosférických vlivů na kvalitu komunikace. Porovnání prototypů světla s komerčně dostupnými světly Phillips. Zaměření na přenosovou rychlost platformy a hodnoty BER, potažmo SNR.
3. Statistické zpracování dosažených výsledků.
4. Diskuze dosažených výsledků.

## Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Martinek, R., Danys, L., & Jaros, R. (2019). Visible Light Communication System Based on Software Defined Radio: Performance Study of Intelligent Transportation and Indoor Applications. *Electronics*, 8(4), 433.
- [2] Wang, Z., Mao, T., & Wang, Q. (2017, June). Optical OFDM for visible light communications. In 2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC) (pp. 1190-1194). IEEE.
- [3] Ghassemlooy, Z., Alves, L. N., Zvanovec, S., & Khalighi, M. A. (Eds.). (2017). Visible light

communications: theory and applications. CRC press.

[4] Wang, Z., Wang, Q., Huang, W., & Xu, Z. (2017). Visible light communications: Modulation and signal processing. John Wiley & Sons.

[5] Renfors, M., Mestre, X., Kofidis, E., & Bader, F. (Eds.). (2017). Orthogonal Waveforms and Filter Banks for Future Communication Systems. Academic Press.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Radek Martinek, Ph.D.**

Konzultant bakalářské práce: Ing. Lukáš Danys

Datum zadání: 01.09.2019

Datum odevzdání: 30.04.2020

  
prof. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.  
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 15. května 2020

*.Martin.Dratnal.*

Souhlasím se zveřejněním této bakalářské práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v bakalářských programech VŠB-TU Ostrava.

V Ostravě 15. května 2020

*Martin Dratnal*

Rád bych na tomto místě poděkoval panu doc. Ing. Radku Martinkovi, Ph.D. za jeho vedení a odbornou pomoc. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Lukášovi Danysovi za jeho vstřícnost a odbornou pomoc při vytváření a realizaci praktické části této bakalářské práce.

V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině za projevenou podporu.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá současným stavem problematiky komunikace viditelným spektrem světla. V první části je popsána komunikace viditelným světlem a rozbor modulací OFDM a FBMC. Následně je popsán standard IEEE 802.15.7. V praktické části je prováděno měření bitové chybovosti BER a testování limitů LED svítidla. Toto měření je prováděno uvnitř budovy, při měření bitové chybovosti v závislosti na šířce frekvenčního pásma a vzdálenosti od světelného zdroje a použitého modulačního schéma.

**Klíčová slova:** VLC, OFDM, FBMC, IEEE 802.15.7, BER, M-QAM

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with the current state of communication with visible light spectrum. The first part describes visible light communication and analyzes of OFDM and FBMC modulations. Then the IEEE 802.15.7 standard is described. In the practical part, the measurement of BER error rate and testing of LED luminaire limits is performed. This measurement is performed indoors, when measuring the bit error rate depending on the frequency bandwidth and the distance from the light source and the modulation scheme used.

**Keywords:** VLC, OFDM, FBMC, IEEE 802.15.7, BER, M-QAM

# Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	9
Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	11
<b>1 Úvod</b>	<b>12</b>
<b>2 VLC</b>	<b>13</b>
2.1 Aplikace VLC . . . . .	14
2.2 LED dioda . . . . .	14
<b>3 Modulace</b>	<b>16</b>
3.1 OFDM . . . . .	16
3.2 DCO-OFDM . . . . .	19
3.3 ACO-OFDM . . . . .	20
3.4 ADO-OFDM . . . . .	21
3.5 FBMC . . . . .	23
<b>4 Standard IEEE 802.15.7</b>	<b>28</b>
4.1 Definice . . . . .	28
4.2 MAC vrstva . . . . .	28
4.3 Fyzická vrstva . . . . .	29
4.4 Metody modulace . . . . .	30
<b>5 Praktická část</b>	<b>32</b>
5.1 BER . . . . .	32
5.2 Použité komponenty . . . . .	33
5.3 Realizace měření světla umístěného na pracovní ploše . . . . .	37
5.4 Realizace měření na vnitřním stropním světle . . . . .	45
<b>6 Závěr</b>	<b>50</b>
<b>Literatura</b>	<b>52</b>
<b>Přílohy</b>	<b>55</b>
<b>A Seznam příloh</b>	<b>56</b>



## Seznam použitých zkratek a symbolů

ACO-OFDM	– Asymmetrically-Clipped Optical OFDM
ADO-OFDM	– Asymmetrically-Clipped DC-biased Optical OFDM
AFB	– Banka analytických filtrů (Analysis Filter Bank)
BER	– Bitová chybovost (Bit Error Rate)
CP	– Cyklický prefix (Cyclic prefix)
CSK	– Klíčování barevným posuvem (Color Shift Keying)
DCO-OFDM	– Direct Current-Biased Optical OFDM
FBMC	– Modulace filtrů bank s více nosnými (Filter Bank Multicarrier Modulation)
FFT	– Rychlá Fourierova transformace (Fast Fourier Transformation)
IFFT	– Inverzní rychlá Fourierova transformace (Inverse Fast Fourier Transformation)
ISI	– Vzájemná interference symbolů (Inter-symbol Interference)
LED	– Světlo emitující dioda (Light Emitting Diode)
MAC	– Media Access Control
OFDM	– Ortogonální frekvenčně dělený multiplex (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)
OOK	– On-Off Keying
OQAM	– Offset QAM
OWC	– Optické beztrátové sítě (Optical Wireless Communications)
PHY	– Fyzická vrstva (Physical Layer)
QAM	– Kvadraturní amplitudová modulace (Quadrature Amplitude Modulation)
SFB	– Banka syntézního filtru (Synthesis Filter Bank)
TMUX	– Transmultiplexer
USRP	– Universal Software Radio Peripheral
VLC	– Komunikace viditelným světlem (Visible Light Communications)
VPPM	– Proměnlivá pulzně polohová modulace (Variable Pulse Position Modulation)

## Seznam obrázků

1	Elektromagnetické spektrum [25]. . . . .	13
2	Blokové schéma OFDM. . . . .	17
3	Princip vzájemné interference symbolů [8]. . . . .	19
4	Blokové schéma DCO-OFDM [13]. . . . .	20
5	Asymetrická struktura před a po oříznutí na nulu [15]. . . . .	21
6	Blokové schéma ACO-OFDM [13]. . . . .	21
7	Blokové schéma vysílače ADO-OFDM [16]. . . . .	22
8	Blokové schéma přijímače ADO-OFDM [16]. . . . .	22
9	Blokové schéma FBMC [17]. . . . .	24
10	TMUX konfigurace filtrační banky více nosných [20]. . . . .	25
11	OQAM před-zpracování [20]. . . . .	26
12	OQAM po-zpracování [20]. . . . .	26
13	Rámec MAC vrstvy [2]. . . . .	29
14	Příklad VPPM [23]. . . . .	31
15	Chromatický diagram [24]. . . . .	31
16	Schéma zapojení. . . . .	32
17	Čelní panel aplikace LabVIEW. . . . .	34
18	USRP-2945R. . . . .	34
19	Fotodetektor Thorlabs PDA36A-EC. . . . .	36
20	Výkonový zesilovač. . . . .	36
21	Schéma měření světla na pracovní ploše. . . . .	37
22	Měření chybovosti BER na vzdálenost 2,5 metrů od zdroje světla. . . . .	37
23	Měření chybovosti BER na vzdálenost 3,5 metrů od zdroje světla. . . . .	38
24	Měření chybovosti BER na vzdálenost 5,5 metrů od zdroje světla. . . . .	39
25	Měření chybovosti BER na vzdálenost 7,5 metrů od zdroje světla. . . . .	39
26	Srovnání BER 4-QAM modulace se vzdáleností od zdroje, krok 1 m. . . . .	40
27	Srovnání vysílaného spektra OFDM s přijímaným pro 4-QAM, krok 1 m. . . . .	41
28	Srovnání vysílaného spektra OFDM s přijímaným pro 16-QAM, krok 1 m. . . . .	42
29	Srovnání BER 16-QAM modulace se vzdáleností od zdroje, krok 1 m. . . . .	43
30	Srovnání BER se vzdáleností od zdroje světla, šířka pásma 2000 kHz. . . . .	44
31	Schéma měření světla zavěšeného na stropě. . . . .	45
32	Měření chybovosti BER ve středu vyzářeného kužele světla. . . . .	46
33	Měření chybovosti BER 50 cm od středu vyzářeného kužele světla. . . . .	46
34	Měření chybovosti BER 100 cm od středu vyzářeného kužele světla. . . . .	47
35	Měření chybovosti BER 200 cm od středu vyzářeného kužele světla. . . . .	48
36	Měření chybovosti BER 300 cm od středu vyzářeného kužele světla. . . . .	48
37	Srovnání BER se vzdáleností od zdroje světla, šířka pásma 2000 kHz. . . . .	49

## Seznam tabulek

1	Srovnání popsaných optických OFDM schémat. . . . .	23
2	Vybrané vlastnosti světla Philips Fortimo LED DLM 3000 44 W/840. . . . .	35
3	Vybrané vlastnosti fotodetektoru PDA36A-EC. . . . .	35

# 1 Úvod

Tématem této bakalářské práce je testování LED svítidla v komunikaci viditelným spektrem světla (VLC) s využitím ortogonálního frekvenčně děleného multiplexu (OFDM) a M-QAM modulace při měření bitové chybovost BER. Technologie VLC je dnes velmi široce testována, protože se nabízí jako alternativa přenosu přes rádiové vlny v dnešní době bezdrátových technologií. Tato technologie přináší řadu výhod oproti přenosu informací rádiovými vlnami, hlavně z hlediska bezpečnosti a uvolnění zahlcených pásem rádiových vln.

Bakalářská práce je rozdělena na teoretickou část, kde je vysvětlena technologie přenosu viditelným spektrem světla, její výhody a aplikace. Dále jsou rozepsány použitelná modulační schémata ve VLC s důrazem na jejich složitost návrhu a spektrální účinnost, respektive modulace OFDM a jednotlivých modifikovatelných variant (DCO-OFDM, ACO-OFDM a ADO-OFDM). Je také teoreticky popsána modulace FBMC. Dalším tématem teoretické části je standard IEEE 802.15.7, který definuje použití technologie VLC.

Druhou kapitolou je praktická část, kde probíhalo měření BER ve vývojovém prostředí LabVIEW při využití M-QAM modulace. Měřilo se v závislosti na vzdálenosti od zdroje světla, kdy bylo světlo stabilně umístěno na pracovní ploše, následně bylo světlo zavěšeno na strop. Praktická část popisuje použité komponenty, použitý software pro měření, dále realizaci a výsledky jednotlivých měření.

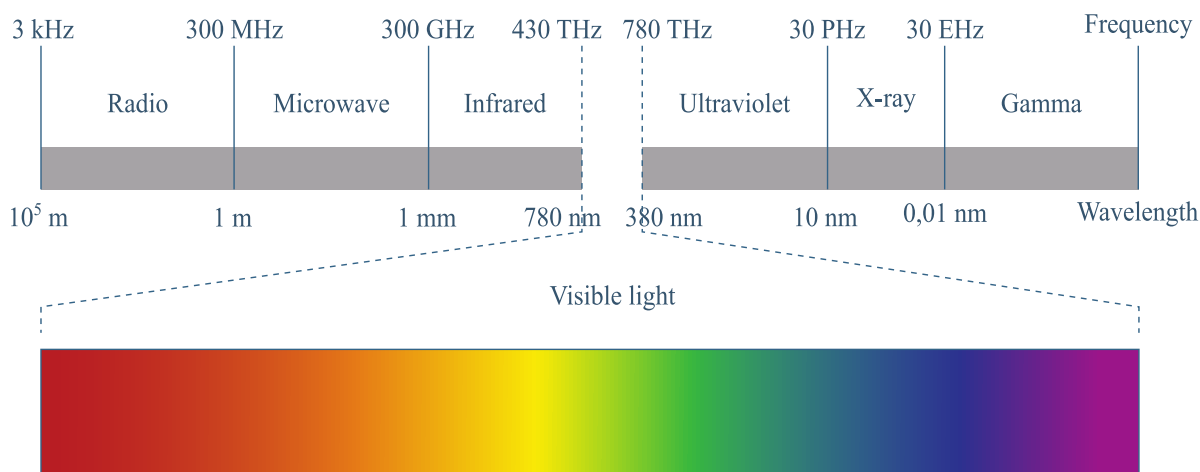
Na konci práce je závěr, kde jsou vyhodnoceny a shrnuty všechny výsledky provedeného měření.

## 2 VLC

Komunikace viditelným světlem (VLC) je technologie, ve které je viditelné spektrum modulováno pro přenos dat. Kvůli šířce šíření světelných diod (LED) je VLC komunikační technologie krátkého dosahu. V elektromagnetickém spektru viditelné spektrum pokrývá vlnové délky mezi 380 až 780 nm s frekvenčním rozsahem 430-790 THz. Tato technologie široce využívá LED diody, protože přináší řadu výhod oproti jejich konkurenci, jako jsou například klasické žárovky nebo fluorescentní zářivky. Mezi výhody LED můžeme uvést velkou šířku pásma, rychlost spínání, vysoké přenosové rychlosti, delší životnost nebo nízkou spotřebu. Díky těmto vlastnostem mají LED diody dnes velmi široké využití [1]. Pro přenos viditelného světla lze využít i laserové diody, například pro světlomety aut.

Všimněte si, že rádiové vlny byly studovány různými pracemi od začátku devatenáctého století. To vedlo k řadě objevů o vlastnostech tohoto typu vln, které přinesly do každodenního života lidí po celém světě několik nových technologií, od vojenských využití po lékařské aplikace. Účinnost rádiových komunikací se značně zlepšila díky pokroku ve výzkumu. Ačkoli viditelné světlo jako forma komunikačního média přitahovalo pozornost akademických institucí a průmyslu až v posledním desetiletí, je stále nedostatečně prozkoumáno ve srovnání s vysokofrekvenčním spektrem elektromagnetického spektra [1].

Obrázek níže popisuje rozsah elektromagnetického spektra od nízkých frekvencí, kde jsou rádiové vlny, až po vyšší frekvence jako je záření gamma. Jakékoli informace, které jsou přenášeny modulací světelných vln lze považovat za typ komunikace viditelným světlem. Je důležité si uvědomit, že rádiové vlny, které zahrnují technologie jako Wi-Fi, pokrývají kmitočty v rozsahu od 3 kHz do 300 GHz. Na druhé straně se frekvence viditelného spektra jsou v rozsahu od 430 do 790 THz, což je deset tisíckrát více, než je celé spektrum vysokofrekvenčního záření [1].



Obrázek 1: Elektromagnetické spektrum [25].

## 2.1 Aplikace VLC

Modulací fluorescenčního světla může technologie VLC přenášet signály rychlostí 10 kbps. Ovšem LED diody mohou poskytovat přenosovou rychlost až 500 Mbps. Od rychlosti 1,25 Mbps je systém označován jako systém s vysokou přenosovou rychlostí [2]. Možné aplikace VLC technologie lze rozdělit na dvě hlavní: Aplikace pro přenos dat nízkou přenosovou rychlostí (Low data VLC) a aplikace pro přenos dat vysokou přenosovou rychlostí (High data VLC) [3].

### 2.1.1 Low data VLC

Obecně jsou dnes komunikační systémy s nízkou přenosovou rychlostí určeny pro řízení. VLC technologie může být také implementována v těchto využitích:

- Obecné určování polohy – identifikace vysílače ve vnitřním prostředí.
- Doprava – komunikace mezi vozidly, při použití předního a zadního světlometu vozidla jako přijímače a vysílače pro prevenci dopravních nehod.
- Úspora energie – vyšší intenzitu světla při průjezdu automobilu lze ovládat na dálku, což uživatelům poskytuje pohodlí při ovládání světla.

### 2.1.2 High data VLC

Systémy využívající vysoké přenosové rychlosti:

- Mobilní konektivita – umožňuje bezpečnou komunikaci mezi dvěma zařízeními při velmi vysoké rychlosti, protože světlo nedokáže procházet zdmi.
- Nemocnice a lékařské zařízení – Rádiové vlny jsou v některých částech nemocnic nežádoucí, proto je VLC slibnou technologií, vzhledem k tomu, že neinterferuje se spektrem rádiových vln.
- Letectví – snížení rizika rušení, VLC může nahradit WiFi v letadlech.
- Podmořské komunikace – šíření rádiových signálů není pod vodou efektivní, šíření viditelného spektra zvyšuje kvalitu přenosu dat pod vodou.
- Bezpečnostní využití, obrana a životu nebezpečná prostředí.

## 2.2 LED dioda

LED (Light Emitting Diode) je zařízení, které používá elektroluminiscenci a polovodiče k vytváření světla. Přesněji řečeno, LED jsou vyrobeny z materiálů, které jsou částečně schopné vést proud. Navíc je světlo emitováno, když elektrický proud prochází materiálem a nastává jev známý jako elektroluminiscence. Toto se děje kvůli existenci elektronových děr (když atom

postrádá elektrony) mezi dvěma polovodiči. Když tedy prolétají elektrony, vyplňují díry elektronů a následně emitují fotony. Světlo je emitováno ve viditelném spektru, které se mění od nízkofrekvenčních až po vysokofrekvenční vlny odpovídající konkrétní barvě [4].

### 2.2.1 Typy LED

Existuje několik typů LED, každá s různými vlastnostmi, které jsou vhodné pro různá využití ve VLC. V závislosti na materiálu použitém při výrobě čipu je světlo emitováno ve specifické oblasti viditelného spektra. Výsledkem je, že foton bude emitován s charakteristickou vlnovou délkou, což povede k různému zbarvení. Hlavní typy LED jsou uvedeny níže s jejich vlastnostmi.

1. PC-LED (Phosphor Converted LEDs): Jsou široce využívány a mají nízkou složitost a nízké náklady. Skládají se z modrého LED čipu potaženého fosforovou vrstvou, jehož funkcí je převádět část modrého světla na zelenou, žlutou a červenou, zatímco je vyzařována část modrého světla, což má za následek bílé světlo. Tento typ má omezené pásmo kvůli pomalé odezvě fosforu.
2. MC-LED (Multi-Chip LED): Struktura tohoto typu LED se skládá ze tří nebo více čipů, které emitují světla různých barev. Obvykle různé čipy emitují barvy RGB, aby vytvořili bílé světlo. Velkou výhodou tohoto typu LED je schopnost ovládat barvy, prostřednictvím změny intenzity každé barvy. Pro tento typ LED byla vytvořena modulace CSK.
3. OLED (Organic LED): Tento typ LED sestává z řady tenkých organických filmů mezi dvěma vodiči. Při přivedení elektrického proudu je vyzařováno světlo. Jsou široce využívány v displejích smartphonů nebo televizích. Velkou výhodou této technologie je možnost vytváření transparentních a flexibilních zařízení. Zásadní nevýhodou je fakt, že při výrobě jsou použity organické látky. Ty časem degradují, čímž dochází k tzv. Vypalování displeje a změny barev.
4.  $\mu$ -LED:  $\mu$ -LED jsou obvykle spojeny do displejů, což umožňuje paralelní komunikaci o vysoké hustotě a dosahuje velmi vysokých rychlostí [5].

## 3 Modulace

### 3.1 OFDM

#### 3.1.1 Historie OFDM

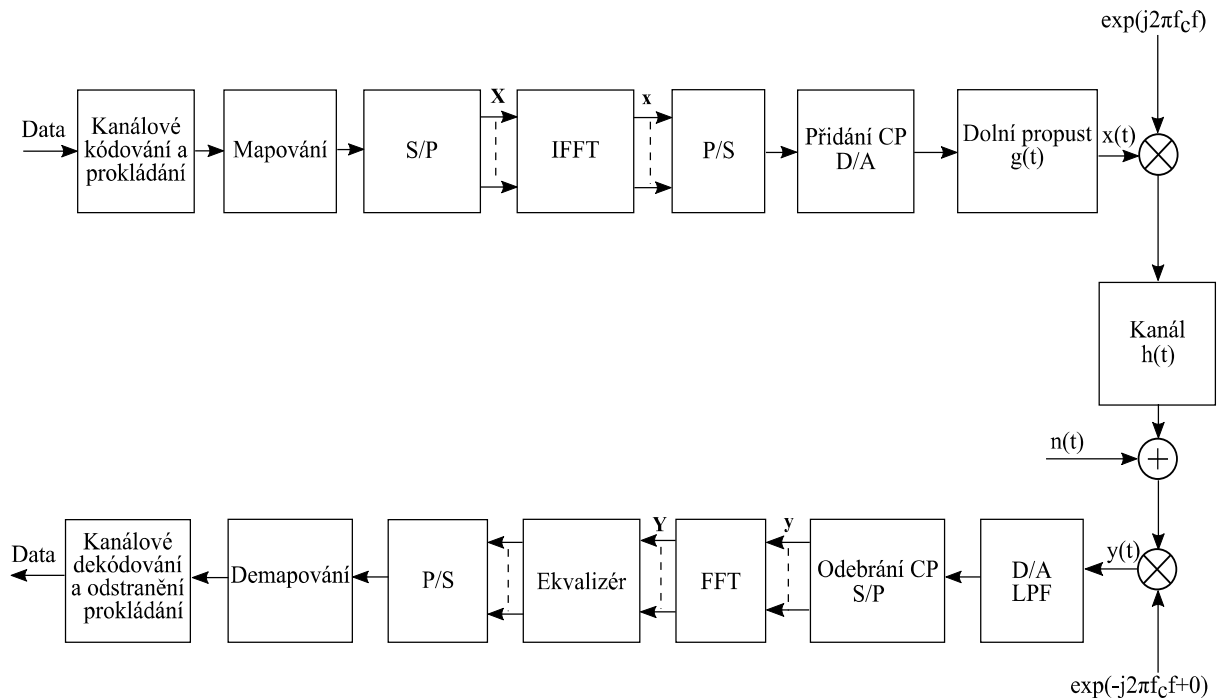
Koncept používání OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) pro přenos navrhl Robert W. Chang v roce 1966. Roku 1971, Weinstein a Ebert navrhli rychlou Fourierovu transformaci (FFT) jako způsob generování OFDM signálů. FFT je výpočetně efektivní algoritmus používaný k implementaci diskrétní Fourierovy transformace a inverzní Fourierovy transformace. Roku 1980 Ruiz a Peled představili koncept cyklického prefixu určeného k potlačení ISI (Inter-symbol Interference) [6]. OFDM je dnes široce využívaná ve všech přenosových technologiích, např. LTE, xDSL, WLAN atd.

#### 3.1.2 Vlastnosti OFDM

OFDM je založena na více samostatných nosných, které jsou ortogonálně rozděleny po celé šířce dostupného pásma. Jednotlivé nosné jsou rozloženy na nezávislých frekvencích tak, aby se vzájemně co nejméně ovlivňovaly. Lze je implementovat pomocí inverzní rychlé Fourierovy transformace (IFFT). Přijímač pak udělá opak pomocí rychlé Fourierovy transformace. Délka FFT je shodná s počtem nosných kmitočtů.

Protože jsou ve výsledku toky na jednotlivých subnosných malé, je možné vkládat ochranný interval (cyklický prefix) – čas, kdy se nevysílá žádná nová informace. Na přijímací straně je tak možné nerušeně přijmout právě vysílaný symbol, i když přichází k přijímači více cestami s různým zpožděním.





Obrázek 2: Blokové schéma OFDM.

### 3.1.3 Otrogonalita OFDM

Vezmeme v potaz časově omezené komplexní exponenciální signály  $\exp(j2\pi f_c t)$ ,

$$\left\{ e^{j2\pi f_k t} \right\}_{k=0}^{N-1},$$

kteří reprezentují odlišné subnosné na frekvenci  $f_k = k/T_{sym}$  v OFDM signálu, kde  $0 \leq t \leq T_{sym}$ . Tyto signály jsou definovány jako ortogonální, pokud jejich integrál součinu na společné periodě je roven nule, tedy

$$\begin{aligned} \frac{1}{T_{sym}} \int_0^{T_{sym}} e^{j2\pi f_k t} e^{-j2\pi f_i t} dt &= \frac{1}{T_{sym}} \int_0^{T_{sym}} e^{j2\pi \frac{k}{T_{sym}} t} e^{-j2\pi \frac{i}{T_{sym}} t} dt \\ &= \frac{1}{T_{sym}} \int_0^{T_{sym}} e^{j2\pi \frac{(k-i)}{T_{sym}} t} dt = \begin{cases} 1, & \forall \text{ integer } k = i \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

Berme diskrétní vzorky s vzorkováním  $t = nT_s = nT_{sym}/N$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ , rovnice může být zapsána v diskrétní časové doméně jako

$$\begin{aligned} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi \frac{k}{T_{sym}} \cdot nT_s} e^{-j2\pi \frac{i}{T} \cdot nT_s} &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi \frac{k}{T_{sym}} \cdot \frac{nT}{N}} e^{-j2\pi \frac{i}{T_{sym}} \cdot \frac{nT_{sym}}{N}} \\ &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi \frac{(k-i)}{N} \cdot n} = \begin{cases} 1, & \forall \text{ integer } k = i \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

Uvedená ortogonalita je základní podmínkou pro to, aby byl OFDM signál odolný vůči ICI [7].

### 3.1.4 Výhody OFDM

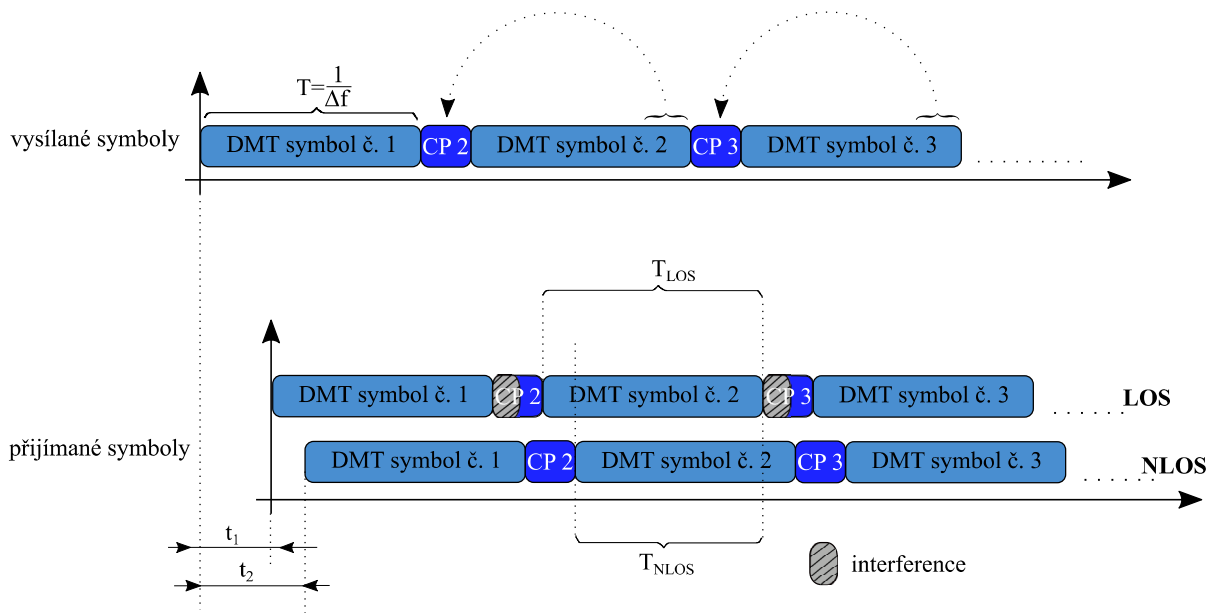
- Vysoká spektrální účinnost.
- Dělení přenášených dat mezi velký počet subkanálů.
- Odolnost proti selektivnímu úniku.
- Efektivní implementace.

### 3.1.5 Nevýhody OFDM

- Nutnost dodržovat vzdálenost mezi subkanály.
- Vyžaduje precizní synchronizaci [8].

### 3.1.6 Cyklický prefix

Protože bezdrátové komunikační systémy jsou citlivé na vícecestné odrazy kanálů, přidává se cyklický prefix pro snížení ISI. Cyklický prefix je koncová část symbolu, která je připojena na začátek dalšího symbolu [9]. Čím delší je cyklický prefix, tím je přenos odolnější vůči vícecestnému šíření, naopak čím delší je cyklický prefix, tím menší část OFDM symbolu je možno použít pro přenos užitečného signálu [10].



Obrázek 3: Princip vzájemné interference symbolů [8].

### 3.1.7 Varianty OFDM modulace použitelné pro VLC

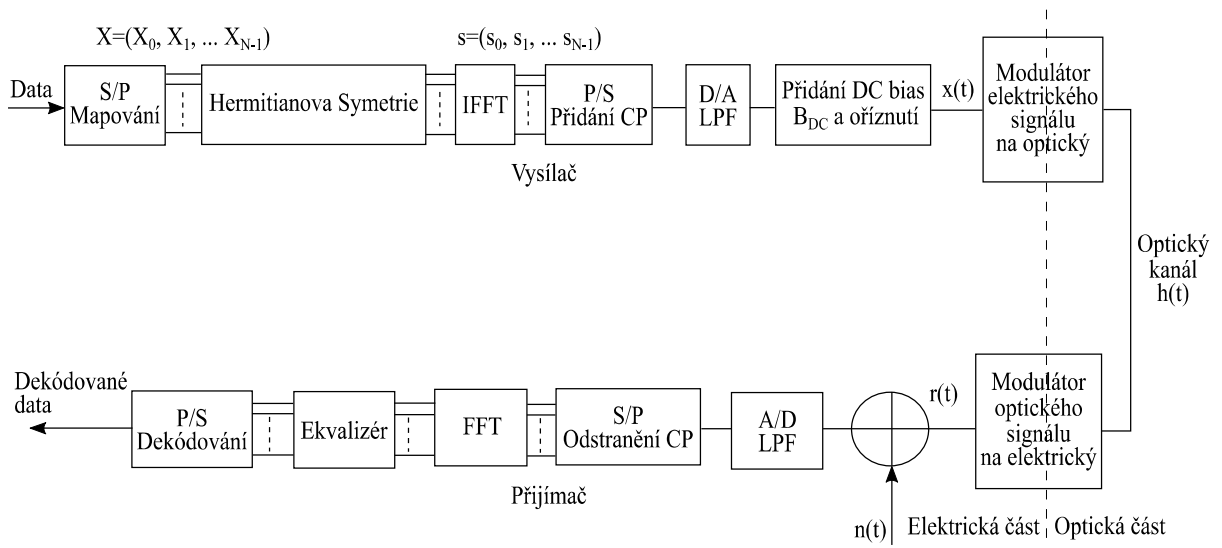
Pokud chceme použít schéma OFDM pro optický přenos informace, je potřeba si uvědomit, že vysílaný signál musí být reálný a kladný. Vyplývá to ze skutečnosti, že intenzita světla musí být reálná a kvantita světla kladná. Běžným postupem je nejprve vygenerovat signál v reálném čase. Toho lze dosáhnout zavedením Hermitianovy symetrie [11] na signál  $X$ , který je definován takto:

$$X(N - k) = X^*(k), k = 1, \dots, N - 1, X(0) = X(N/2) = 2 \quad (3)$$

Lze snadno ukázat, že IFFT podle  $X$  mající vlastnost rovnice je skutečný signál  $x$ . Na základě tohoto skutečného signálu lze dále generovat kladný signál k pohonu optického zdroje různými prostředky. Tyto výsledné systémy bývají obvykle označovány jako optické OFDM systémy [15].

## 3.2 DCO-OFDM

DCO-OFDM (Direct Current-Biased Optical OFDM) moduluje všechny pomocné nosné pomocí přídavného kladného stejnosměrného proudu, kde se k normálnímu OFDM symbolu přidá stejnosměrné zkreslení, aby se snížilo množství zkreslení signálu a indukovaného šumu negativním oříznutím. V tomto ohledu je kladný stejnosměrný proud určen k tomu, aby byl signál unipolární [12].



Obrázek 4: Blokové schéma DCO-OFDM [13].

Spektrální účinnost  $S_{e_{DCO}}$  DCO-OFDM [14] lze zapsat jako:

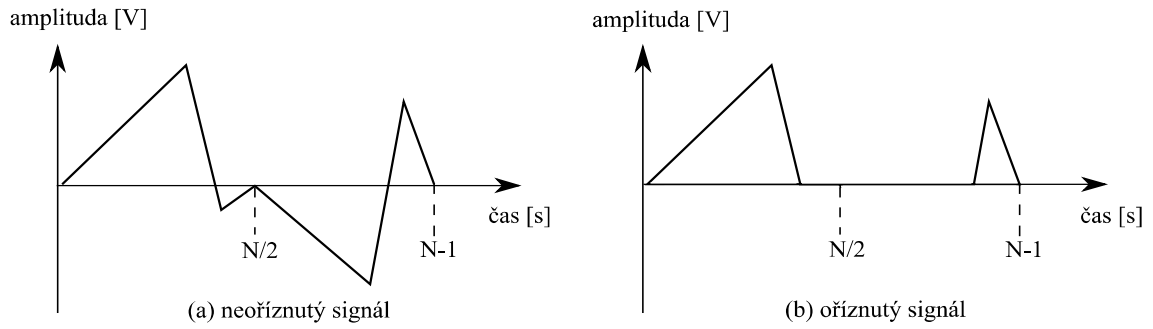
$$S_{e_{DCO}} = \frac{\log_2 M (N - 2)}{2(N + N_{CP})}, \quad (4)$$

kde  $M$  a  $N_{CP}$  reprezentují úroveň QAM modulace použité na každé subnosné a počet cyklických prefixů. Pro  $k$  množství přidávaného zkreslení stejnosměrného proudu je rozptyl elektrické energie v DCO-OFDM zvýšen o  $B_{DC}$  dB ve srovnání s konvenčním bipolárním OFDM:

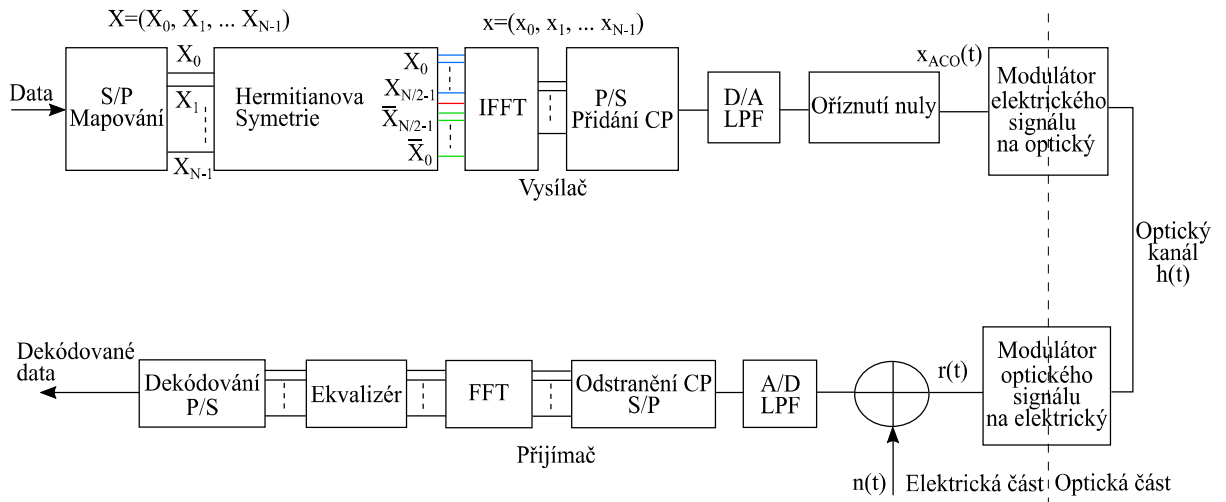
$$B_{DC} = 10 \log_{10} (k^2 + 1) \quad (5)$$

### 3.3 ACO-OFDM

ACO-OFDM (Asymmetrically-Clipped Optical OFDM) moduluje liché pomocné nosné, což vede k signálu, který je ve své doméně automaticky symetrický. V tomto schématu jsou sudé nosné během přenosu oříznuty na nulu [12], jak je to ukázáno na obrázku 5.



Obrázek 5: Asymetrická struktura před a po oříznutí na nulu [15].



Obrázek 6: Blokové schéma ACO-OFDM [13].

ACO-OFDM mající  $N$  subnosných a  $N_{CP}$  cyklických prefixů, je spektrální účinnost  $Se_{ACO}^{odd}$  ACO-OFDM rovna:

$$Se_{ACO}^{odd} = \frac{\log_2 M(N)}{4(N + N_{CP})} \quad (6)$$

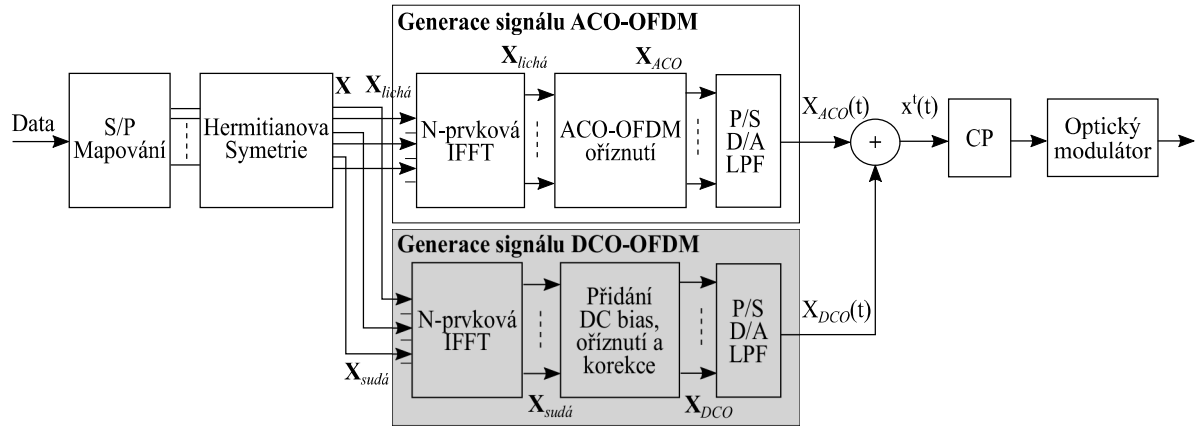
Tato rovnice (6) platí pouze pro případ lichých subnosných, které se používají pro přenos informací. Pokud se místo lichých subnosných používají pouze sudé, je spektrální účinnost rovna:

$$Se_{ACO}^{odd} = \frac{\log_2 M(N - 4)}{4(N + N_{CP})} \quad (7)$$

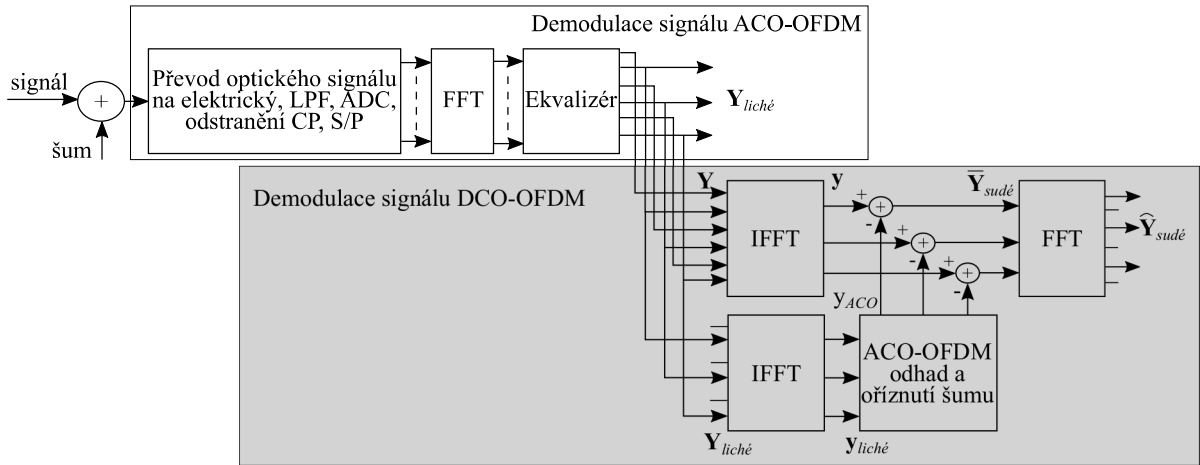
### 3.4 ADO-OFDM

ADO-OFDM (Asymmetrically-Clipped DC-biased Optical OFDM) je kombinací ACO-OFDM a DCO-OFDM. V ADO-OFDM jsou pomocné liché nosné modulovány stejně jako v ACO-OFDM.

Pro sudé pomocné nosné se generuje modifikovaný signál DCO-OFDM, ve kterém se používají jen sudé pomocné nosné. Následně se signály generované z ACO-OFDM a DCO-OFDM sečtou dohromady, aby se získal ADO-OFDM. Na straně přijímače je nejprve detekován signál ACO-OFDM, který je na lichých dílčích nosných. Potom se odhaduje a odečítá ořezávací šum na sudých subnosných. Následně sudé pomocné nosné obsahují pouze DCO-OFDM signál, který je konečně dekodován [15].



Obrázek 7: Blokové schéma vysílače ADO-OFDM [16].



Obrázek 8: Blokové schéma přijímače ADO-OFDM [16].

Spektrální účinnost  $Se_{ADO}$  lze zapsat jako:

$$Se_{ADO} = \frac{(\log_2 M_1 + \log_2 M_2)}{4(N + N_{CP})} - \log_2 M_1 \quad (8)$$

### 3.4.1 Srovnání vlastností modulací

Tabulka 1 popisuje vlastnosti DCO-OFDM, ACO-OFDM a ADO-OFDM schémat.

Tabulka 1: Srovnání popsaných optických OFDM schémat.

OFDM schéma	Spektrální účinnost (bit/s / Hz)	Účinnost výkonu	Složitost
DCO-OFDM	$\frac{N-2}{2N} \log_2 M$	nízká	$O(N \log_2 N)$
ACO-OFDM	$\frac{1}{4} \log_2 M$	vysoká	$O(N \log_2 N)$
ADO-OFDM	$\frac{1}{4} (\log_2 M_1 + \log_2 M_2) - \frac{1}{N} \log_2 M_1$	střední	$O(4N \log_2 N)$

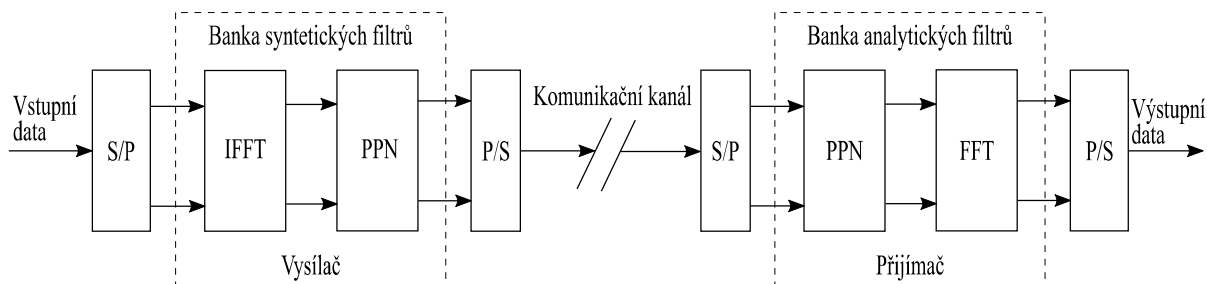
### 3.5 FBMC

FBMC (Filter Bank Multicarrier Modulation) převyšuje OFDM v oblasti spektrální účinnosti, robustnosti a spektrální ochrany, ovšem za cenu vyšší složitosti [26]. Základním rozdílem oproti OFDM je nahrazení systémem s více nosnými, založeným na filtračních bankách, kde IFFT a vstupní CP jsou nahrazeny bankou syntézního filtru (SFB), zatímco FFT a výstupní CP jsou nahrazeny bankou analytických filtrů (AFB) [17].

#### 3.5.1 Popis FBMC

FBMC překonává nedostatky OFDM přidáním zobecněných filtrů pro tvarování impulzů, které poskytují dobře lokalizovaný subkanál v časové i frekvenční oblasti. V důsledku toho mají systémy využívající FBMC více spektrálních zadržovacích signálů a nabízejí efektivnější využití zdrojů tam, kde není vyžadován CP [17].

Banky filtrů lze definovat jako pole  $N$  filtrů, které zpracovávají  $N$  vstupních signálů a vytváří  $N$  výstupů. Pokud jsou vstupy z těchto  $N$  filtrů spojeny dohromady, systém může být analogickým způsobem považován jako analyzátor k vstupnímu signálu založený na charakteristice každého filtru. Proto se tento typ banky filtrů nazývá banka analytických filtrů (AFB). Zatímco na druhé straně přidáváním výstupů z filtračního pole je syntetizován nový signál, proto název bank syntézního filtru. Na Obrázku 9 je vidět, že na straně přijímače signál prochází kanálem, dále je převodníkem převeden z paralelního signálu na sériový a prošel bankou analytických filtrů. Konfigurace ze syntézního na analytický filtr se nazývá transmultiplexer [18] (TMUX) a používá se v systémech s více nosnými.



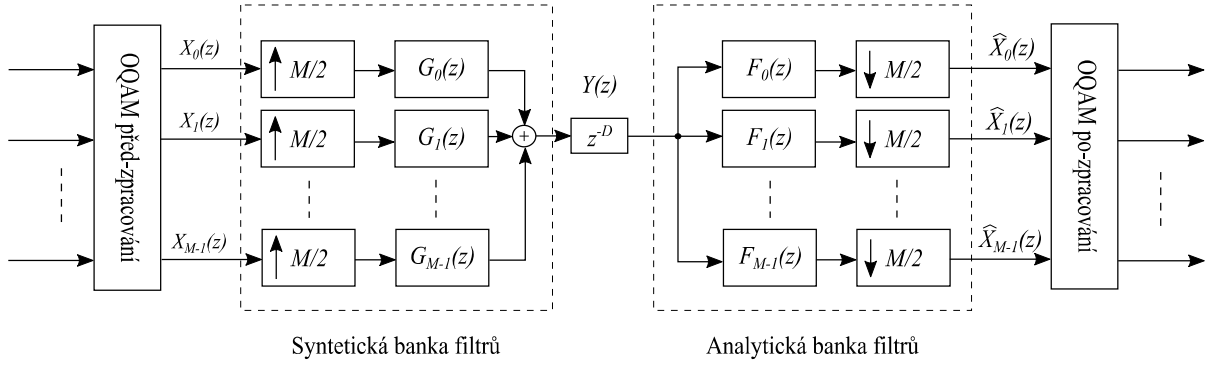
Obrázek 9: Blokové schéma FBMC [17].

### 3.5.2 Konfigurace transmultiplexeru filtračních bank více nosných

Jádrem FBMC systému je TMUX konfigurace, znázorněna na obrázku 10. Hlavními bloky zpracování v tomto přímém zobrazení jsou OQAM před-zpracování, banka syntetických a analytických filtrů a po-zpracování OQAM. Hlavními složkami jsou banky syntetických a analytických filtrů. Využití filtračních bank je velmi široké, sudě modulované filtry mohou být rozděleny na různé typy v závislosti na výběru filtrů, modulačních funkcí a požadovaných vlastností. Například M-subkanálové filtry, které lze rozdělit následovně:

1. Komplexně modulované – Aby bylo dosaženo dobré spektrální účinnosti, je pro účely přenosu potřebný komplexní I/Q signál základního pásma a komplexně modulované filtrační banky.
2. Uniformní – všechny subkanálové filtry mají stejnou šířku pásma a rovnoměrně rozdělují dostupnou šířku pásma kanálu.
3. Konečná impulsní odezva (FIR) – banka FIR filtrů se používá místo jejich protějšků nekonečné impulsní odezvy, protože filtry FIR jsou vždy stabilní a relativně snadno se navrhují a implementují.
4. Ortogonální – pro banky ortogonálních filtrů je nutný pouze jeden prototyp filtru. Typicky se používají prototypové filtry s lineární fází, a proto mohou exponenciální modulační schémata poskytovat filtry subkanálů s lineární fází. Pak výsledné zpoždění celého systému závisí na pořadí prototypového filtru.
5. Téměř dokonalá rekonstrukce (NPR) – Výstupní signály jsou pouze téměř zpožděnými verzemi vstupních signálů, tj. Zajištěné množství změn struktury banky filtrů může být tolerováno, pokud jsou méně spojeny se změnami způsobené přenosovým kanálem [19].





Obrázek 10: TMUX konfigurace filtrační banky více nosných [20].

### 3.5.3 OQAM Pre/Post Processing

TMUX systém vysílá místo OQAM symbolů QAM symboly. Blok před-zpracování, který využívá transformaci mezi QAM a OQAM symboly, je znázorněn na obrázku 11. Jak je vidět, první operací je jednoduchá konverze komplexního části na reálnou, kde reálné a imaginární části komplexního symbolu  $c_{k,l}$  jsou odděleny, aby vytvořili dva nové symboly  $d_{k,2l}$  a  $d_{k,2l+1}$ . Pořadí těchto původních symbolů závisí na čísle subkanálu, tj. Konverze se je různá pro sudé a liché subkanály. Převod z komplexní na reálné zvyšuje rychlost vzorkování faktorem dvě. Po této druhé operaci je násobení podle  $\theta_{k,n}$  pořadí [20].

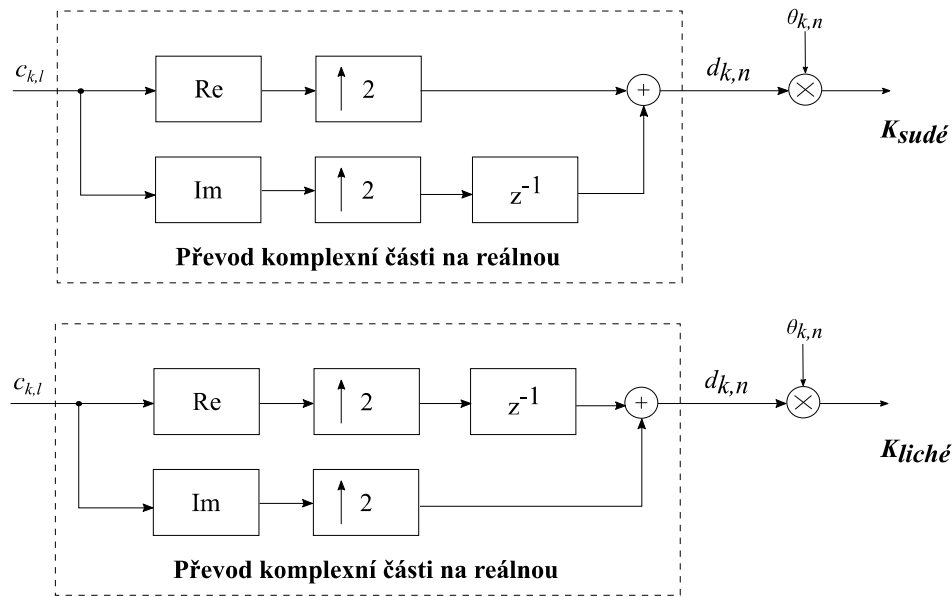
Možnou volbou je:

$$\theta_{k,n} = j^{(k+n)} \quad (9)$$

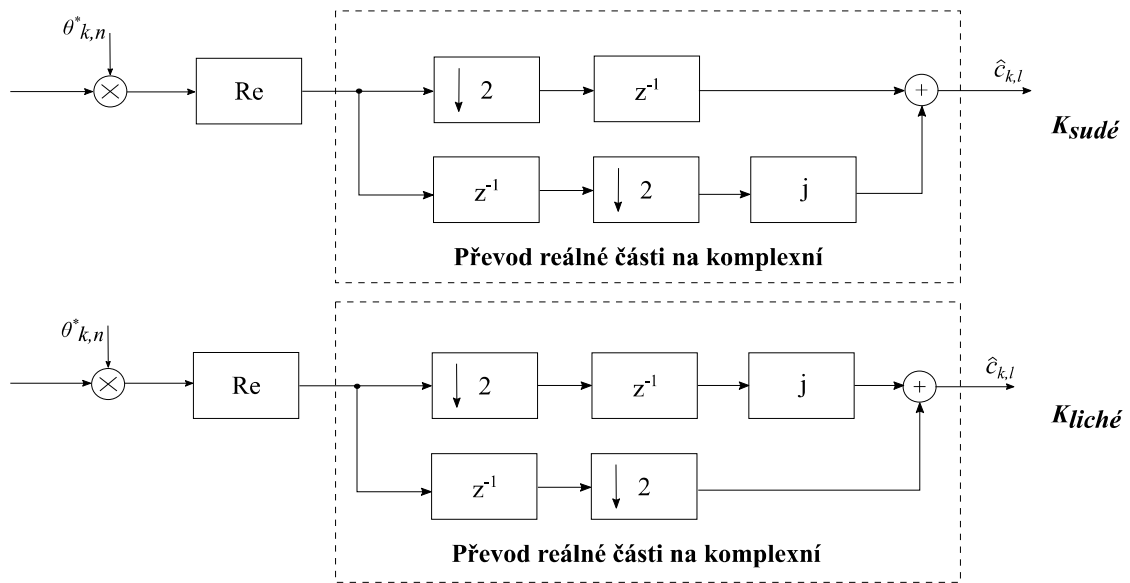
Je však třeba zmínit, že příznaky  $\theta_{k,n}$  pořadí lze zvolit libovolně, ale vzor reálných a imaginárních vzorků musí splňovat výše uvedenou definici. Například alternativní sekvence:

$$\theta_{k,n} = \begin{cases} 1, j, 1, j \cdots \text{pro } k \text{ sudé} \\ j, 1, j, 1 \cdots \text{pro } k \text{ liché} \end{cases} \quad (10)$$

Vstupní signály jsou čistě reálné nebo imaginární po OQAM před-zpracováním.



Obrázek 11: OQAM před-zpracování [20].



Obrázek 12: OQAM po-zpracování [20].

Na obrázku 12 je znázorněn blok po-zpracování a opět jsou vidět dvě mírně odlišné struktury v závislosti na čísle subkanálu. První operací je násobení  $\theta_{k,n}^*$ , po které následuje převod na reálnou část. Další operací je převod z reálné na komplexní, ve kterém dva po sobě jdoucí reálné symboly (s jedním vynásobený  $j$ ) tvoří komplexní symbol  $\hat{C}_{k,l}$ . Převod z reálné na komplexní snižuje vzorkovací frekvenci o faktor dvou. Jak je možné vidět, první operace je jednoduchá konverze komplexní na reálnou, kde reálná a imaginární část je část komplexně vyjádřeného

symbolů  $C_{k,l}$  jsou odděleny, aby vytvořili dva nové symboly  $d_{k,l}$  a  $d_{k,2l+1}$ . Pořadí symbolů závisí na čísle subkanálu, tj. Konverze je různá pro sudá a lichá čísla subkanálů. Převod komplexní na reálnou zvyšuje vzorkovací frekvenci o faktor dvou. Další operací je násobení podle pořadí  $\theta_{k,n}$ .

#### 3.5.4 Výhody FBMC

- FBMC je schopna poskytnout spektrálně efektivnější systém.
- Odpadává nutnost použití CP a tím se uvolní více prostoru pro data.
- Poskytuje robustní úzkopásmové rušičky.

#### 3.5.5 Nevýhody FBMC

- FBMC je složitější na realizaci než OFDM – zavádí režii překrývajících se symbolů v bance filtrů v časové doméně [21].

## 4 Standard IEEE 802.15.7

### 4.1 Definice

Standard definuje fyzickou vrstvu (PHY) a MAC vrstvu s krátkým dosahem pro optické bezdrátové sítě (OWC) v opticky průhledných médiích využívající vlnové délky od 10 000 nm až 190 nm. Standard poskytuje dostatečné datové rychlosti pro podporu audio a video multimediálních služeb a také bere v úvahu mobilitu optického spojení a kompatibilitu s různými světelnými infrastrukturami.

Přizpůsobuje také optickou komunikaci pro kamery, kde vysílací zařízení obsahují zdroje světla a přijímače jsou digitální fotoaparáty s objektivem a obrazovým senzorem. Standard dodržuje platné předpisy pro zrakovou ochranu [2].

#### 4.1.1 Motivace

Tento standard poskytuje globální standard pro optické bezdrátové komunikace s krátkým dosahem.

Norma stanovuje následující:

- Přístup k několika stovkám terahertzů nelicencovaného spektra.
- Odolnost vůči elektromagnetickému rušení a neovlivňování vysokofrekvenčních systémů.
- Povoluje uživateli zobrazit komunikační kanál u systémů s viditelným světlem.
- Rozšíření komunikace a doplnění stávajících služeb [2].

#### 4.1.2 Popis

V optických bezdrátových sítích jsou data přenášena optickými zdroji modulujícími intenzitu, jako jsou diody emitující světlo (LED) a laserové diody, rychlejšími, než je persistence lidského oka.

OWC slučuje světelné a datové komunikace v aplikacích, jako jsou pouliční osvětlení, vozidla, displeje, LED panel a signalizační značení. Tato norma popisuje použití OWC pro osobní optické bezdrátové sítě (OWPANs) a zahrnuje také síťové topologie, adresování, zabránění kolizím, podporu viditelnosti, kvalitu výkonu, barevnou indikaci stavu a stabilizaci barev [2].

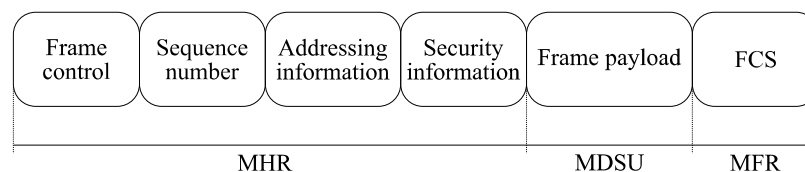
### 4.2 MAC vrstva

MAC podvrstva poskytuje dvě služby přístupné pomocí dvou přístupových bodů služby (SAP). Ke správě MAC se přistupuje pomocí správy MAC entity SAP, zatímco k MAC datům se přistupuje prostřednictvím MAC podsítě SAP. MAC vrstva zpracovává veškerý přístup k fyzické vrstvě a je zodpovědná za následující úkoly:

- Generování síťového signálu, pokud je zařízení koordinátor.
- Synchronizace síťových signálů.
- Podpora asociace zařízení.
- Podpora barevné funkce.
- Podpora ochrany zařízení.
- Poskytování stabilní spojení pro dvě různé MAC.
- Podpora mobility [2].

#### 4.2.1 Rámec MAC vrstvy

Rámec MAC vrstvy se skládá ze tří částí: hlavička (MHR), servisní datová jednotka (MSDU) a zápatí (MFR). Hlavička obsahuje rámcovou kontrolu (Frame control), sekvenční číslo na specifikaci čísla signálu (Sequence number), informaci, na jakou adresu se mají data poslat (Addressing information) a informaci o zabezpečení (Security information). MSDU část obsahuje specifickou informaci o tom, jaký typ rámce se posílá (signální, datový, potvrzovací, příkazový a požadavek na viditelnost barev). MFR část je vyhrazená pro opravu chyb [2].



Obrázek 13: Rámec MAC vrstvy [2].

### 4.3 Fyzická vrstva

Funkce a služby fyzické vrstvy jsou navázání a ukončení spojení s komunikačním médiem. Na základě standardu 802.15.7 pro VLC je fyzická vrstva zodpovědná za následující úkoly:

- Aktivace a deaktivace VLC vysílače.
- Indikátor kvality vlnové délky.
- Jasně vyhodnocení kanálu.
- Podpora stmívání.
- Přenos a příjem dat.

- Oprava chyb.
- Synchronizace.

V závislosti na zamýšlené přenosové rychlosti dat a typu prostředí zahrnuje standard IEEE 802.15.7 řadu různých typů fyzický vrstev:

1. PHY I: Tento typ fyzické vrstvy je určen pro venkovní použití v aplikacích s nízkou přenosovou rychlostí. Používá On-off klíčování (OOK) a proměnlivou pulzně polohovou modulaci (VPPM) s datovými rychlostmi mezi desítkami až stovkami kbps.
2. PHY II: Tento typ fyzické vrstvy je určen pro vnitřní použití s aplikacemi se střední rychlostí přenosu dat. Používá OOK a VPPM s datovými rychlostmi v desítkách Mbps.
3. PHY III: Tento typ fyzické vrstvy je určen pro aplikace využívající klíčování barevným posuvem (CSK), které mají více zdrojů světla a detektorů. Datové rychlosti jsou v desítkách Mbps.
4. PHY IV: Tato fyzická vrstva je určena pro použití s diskrétními světelnými zdroji s datovými rychlostmi až 22 kbps.
5. PHY V: Tento typ fyzické vrstvy je určen pro použití s rozptýlenými zdroji povrchového světla a datovou rychlostí až do 5,71 kbps.
6. PHY VI: Tento typ fyzické vrstvy je určen pro použití videopřehrávačů s datovou rychlostí ve stovkách kbps [2].

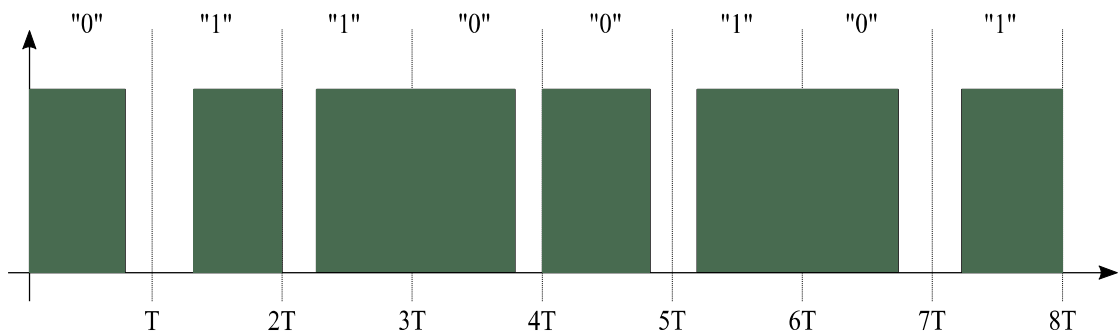
## 4.4 Metody modulace

### 4.4.1 On-off klíčování

OOK (On-off keying) je velmi jednoduché modulační schéma. Jedná se o speciální případ klíčování s posunem amplitudy (ASK) využívající dvě úrovně napětí, kde druhá je nulová [3]. Data jsou reprezentována zapnutým (On) a vypnutým (Off) stavem LED. Pro zajištění stejné doby kladných a negativních impulsů se využívá Manchester kódování. Logická nula v symbolu OOK je zapsána jako 01 a logická jednička je zapsána jako 10, aby se vyrovnal kód [12].

### 4.4.2 Proměnlivá pulzně polohová modulace

VPPM (Variable pulse position modulation) je modulační schéma přizpůsobené pro tlumení světla založené na šířce impulsu a nabízí ochranu před blikáním uvnitř snímku. Nevytváří barevný posun ve zdroji světla, který může vzniknout ze změny amplitudy, protože amplituda impulsu je ve VPPM vždy konstantní. Bity 1 a 0 se rozlišují podle polohy pulsu v jedné periodě a mají stejnou šířku impulsu v rámci své periody [22]. Je tedy možné upravit šířku impulsu na základě požadavku na snížení jasu.

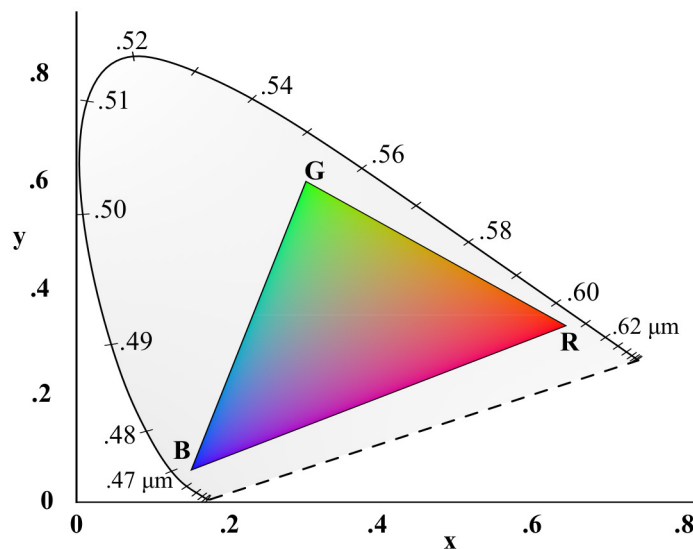


Obrázek 14: Příklad VPPM [23].

#### 4.4.3 Klíčování barevným posuvem

CKS (Color shift keying) je schéma mapující symboly datových toků na barvy. Data jsou kódována mícháním tří základních barev RGB schématu – červené, zelené a modré. Je definována 4, 8 a 16 stavová CSK [3].

Modulace FSK a CSK si jsou podobné – obě závisí na barevném kódování nebo kombinaci vlnových délek. IEEE 802.15.7 rozdělil spektrum na sedm barev, které během komunikace podporují výběr více barevných LED. Na základě níže uvedeného obrázku je toto označení středu sedmi barevných pruhů na kartézské rovině na základě definice barevných souřadnic CIE XYZ [23]. Z obrázku je možné získat barvu odstínu kombinací tří barev, které generují signál CSK. Střed vlnové délky určuje konstelaci CSK na souřadnicích x-y.

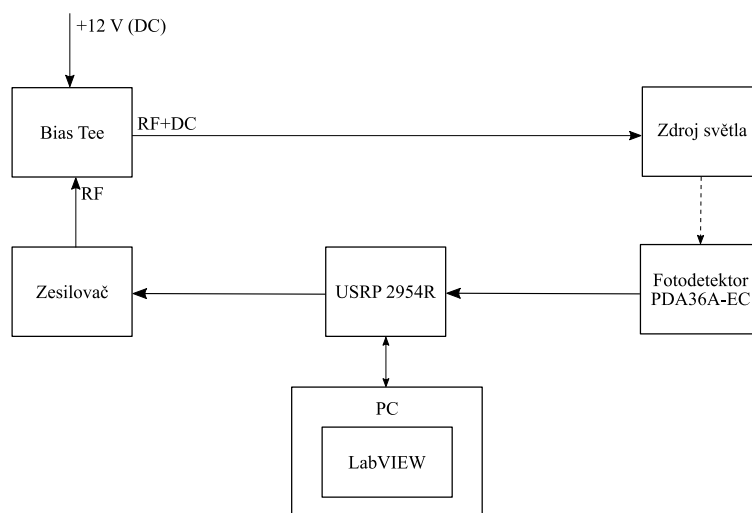


Obrázek 15: Chromatický diagram [24].

## 5 Praktická část

Měření bitové chybovosti probíhalo na technologii VLC, při které byl použit jeden světelný zdroj. Měření probíhalo se světlem Philips Fortimo LED 3000 44W/840. Při měření byla využita M-QAM modulace. Měření bylo rozdělené na dvě části. V první části se měřila hodnota BER v závislosti na vzdálenosti fotodetektoru od světelného zdroje umístěného na pracovní ploše. V druhé části se také měřila hodnota BER, ovšem světlo bylo zavěšeno na stropě.

Na obrázku 16 je zobrazeno obecné schéma zapojení. Schéma zapojení je stejné pro obě měření.



Obrázek 16: Schéma zapojení.

### 5.1 BER

Chybovost BER (Bit Error Rate) je jeden z nejdůležitějších parametrů v telekomunikacích. Jedná se o poměr chybně přijatých bitů oproti celkovému počtu přijatých bitů a je to bezrozměrná veličina. BER lze vypočítat podle následující rovnice:

$$BER = \frac{N_{err}}{N_{bits}}, \quad (11)$$

kde  $N_{err}$  je počet chybně přijatých bitů a  $N_{bits}$  je počet všech přijatých bitů [29]. Existují různé faktory, které ovlivňují hodnotu BER, některé ovšem můžeme ovlivnit.

- Interference - nemohou být změněny návrhem systému, ovšem můžeme je ovlivnit změnou vysílané šířky pásma. Snížením šířky pásma lze snížit úroveň rušení, ovšem omezuje to celkovou propustnost dat.
- Zvýšení výkonu zesilovače - můžeme zvýšit výkon zesilovače, ovšem musíme brát v potaz další faktory, jako je rušení okolních zařízení, celková spotřeba energie nebo životnost.



- Modulace - použití nižšího řádu modulace [30].

## 5.2 Použité komponenty

Měření probíhalo na počítači se softwarem LabVIEW od společnosti National Instruments. V tomto programu se měřil parametr BER (program měří více parametrů, ale v této práci se vyhodnocuje parametr BER). Také tady probíhalo nastavení celého měření.

Dále bylo použito zařízení USRP (Universal Software Radio Peripheral), fotodetektor, výkonový zesilovač, Bias Tee a světelný zdroj.

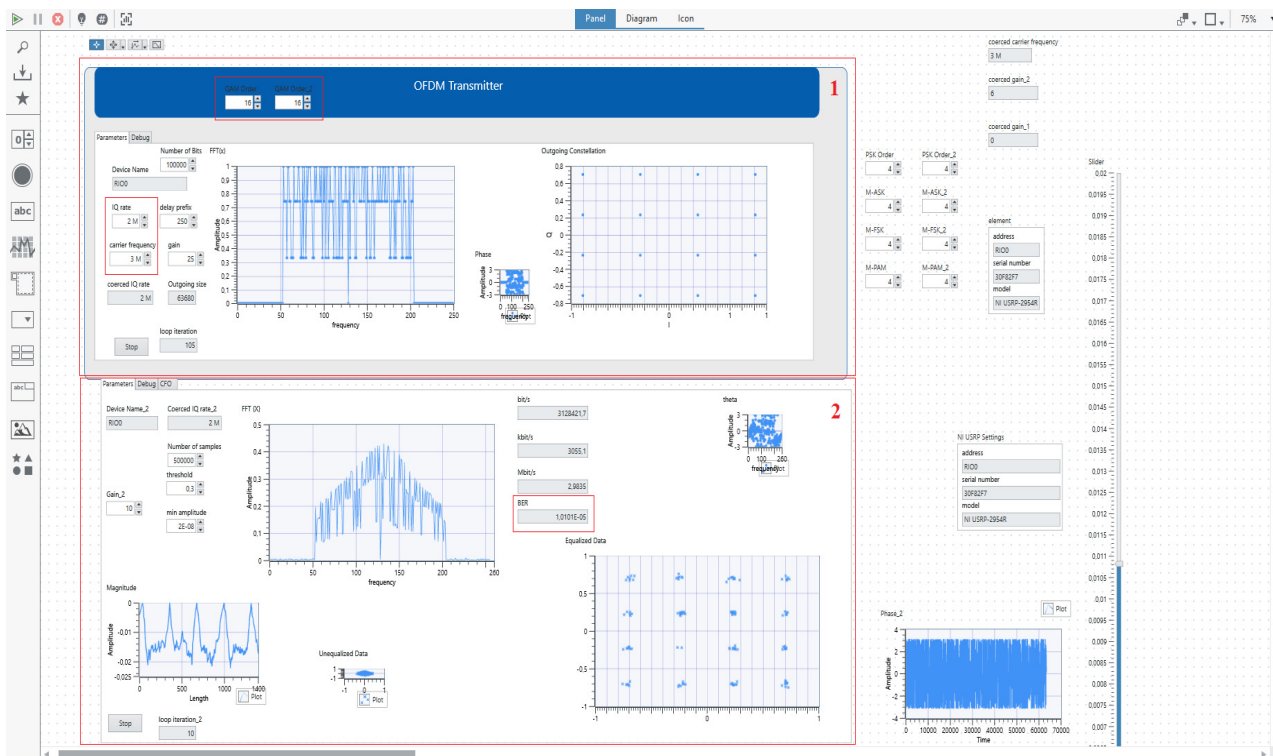
Technická dokumentace použitých zařízení je uvedena v příloze.

### 5.2.1 Program pro měření praktické části

Aplikace pro měření byla v programu LabVIEW. Na obrázku 17 je vidět čelní panel použitého programu. Obrázek je rozdělený na dva hlavní bloky.

V prvním bloku můžeme vidět nastavení řádu M-QAM modulace (pro měření byly použity řády 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM a 64-QAM), dále nastavení hodnoty IQ Rate, která nám udává šířku pásma, ale zároveň chrání pásmo tak, aby nebyla překročena hranice zkreslení spektra, a nastavení hodnoty nosné frekvence, která byla 3 MHz pro všechna měření. Na obrázku je také graf vysílaného OFDM symbolu a konstelační diagram.

V druhém bloku můžeme vidět hlavně hodnotu BER, dále přenosovou rychlost, přenesený OFDM symbol a jeho konstelační diagram.



Obrázek 17: Čelní panel aplikace LabVIEW.

### 5.2.2 NI USRP-2945R

USRP je zařízení, které spadá do skupiny softwarově definovaného rádia od společnosti National Instruments (obrázek 18). Toto zařízení je univerzální nástroj, který umožňuje široké využití limitující pouze hardwarové vlastnosti a naše omezení v podobě napsaného programu.

Zařízení použité při měření obsahuje dva vstupní a dva výstupní konektory pro připojení pomocí SMA konektoru. Pro napájení slouží napájecí konektor 9-16 V (DC), 7,5 A. Obsahuje také JTAG port pro připojení FPGA (Field Programmable Gate Array) zařízení. Maximální šířka pásma je 160 MHz a pracuje ve frekvenčním rozsahu od 10 MHz do 6 GHz.



Obrázek 18: USRP-2945R.

### 5.2.3 Světlo Philips

Pro měření bylo použito vnitřní stropní svítidlo Philips Fortimo LED DLM 3000 44 W/840 Gen3. Výběr tohoto světla byl z důvodu jeho aktuálního využití na fakultě elektrotechniky a informatiky.

Světlo dosahuje životnosti až 50 000 hodin provozu a vysokou účinností až 68 lm/W.

Tabulka 2 popisuje vybrané parametry světla.

Tabulka 2: Vybrané vlastnosti světla Philips Fortimo LED DLM 3000 44 W/840.

Philips Fortimo LED DLM 3000 44W/840	
Světelný tok	3000 lm
Příkon	44 W
Napětí	220-240 V
Životnost	50 000 hodin

### 5.2.4 Fotodetektor

Při měření byl použit fotodetektor PDA36A-EC od společnosti Thorlabs (obrázek 19). Jedná se o Si PIN detektor s nastavitelným zesílením až o 70 dB [28]. Při měření chybovosti v první části (do 3 m od zdroje světla umístěného na pracovní ploše) nebylo zesílení potřeba, následně bylo použito zesílení 10 dB. V druhé části měření bylo použito zesílení 10 dB pro všechna měření. Fotodetektor byl umístěn na pojízdném stolku, abychom mohli pohybovat s fotodetektozem a zároveň udrželi konstantní výšku.

Tabulka 3 popisuje vybrané vlastnosti fotodetektoru. Celá specifikace je uvedena v příloze.

Tabulka 3: Vybrané vlastnosti fotodetektoru PDA36A-EC.

PDA36A-EC	
Rozsah vlnových délek	350-1100 nm
Zesílení	0-70 dB, krok 10 dB
Aktivní plocha	3,6 x 3,6 mm (13 mm <sup>2</sup> )



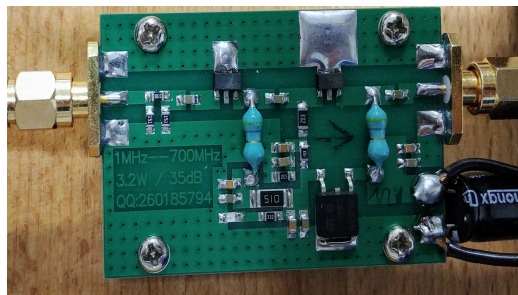
Obrázek 19: Fotodetektor Thorlabs PDA36A-EC.

### 5.2.5 Plankonvexní čočka

Jedná se o spojku, která směřuje dopadající záření do ohniska fotodetektoru. Na přední straně je čočka spojkou a na straně fotodetektoru je čočka rovinná. Plankonvexní čočka byla použita pro měření chybovosti na vzdálenosti od světelného zdroje umístěného na pracovní ploše. Při měření světla zavěšeného na stropě čočka nebyla použita.

### 5.2.6 Výkonový zesilovač

Použitý zesilovač zesiloval RF signál z USRP o 35 dB / 3,2 W. Je napájený stejnosměrným napětím 12 V. Jeho pracovní rozsah frekvencí je 1-700 MHz.



Obrázek 20: Výkonový zesilovač.

### 5.2.7 Bias Tee

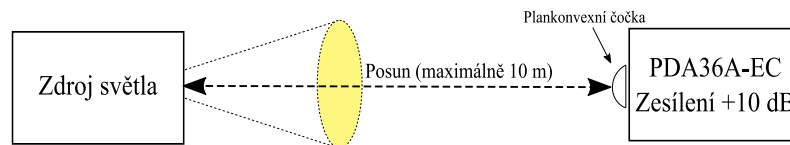
Jedná se o součtový člen, který nám sčítá vysílaný RF signál (vstup RF), který je přiveden z USRP a stejnosměrný signál ze zdroje (vstup DC). Výsledkem je signál (RF+DC), který kmitá kolem stejnosměrné úrovně signálu ze zdroje a my můžeme modulovat část optického signálu. Při modulaci celého optického signálu by docházelo k poklesu intenzity světla [27].

### 5.3 Realizace měření světla umístěného na pracovní ploše

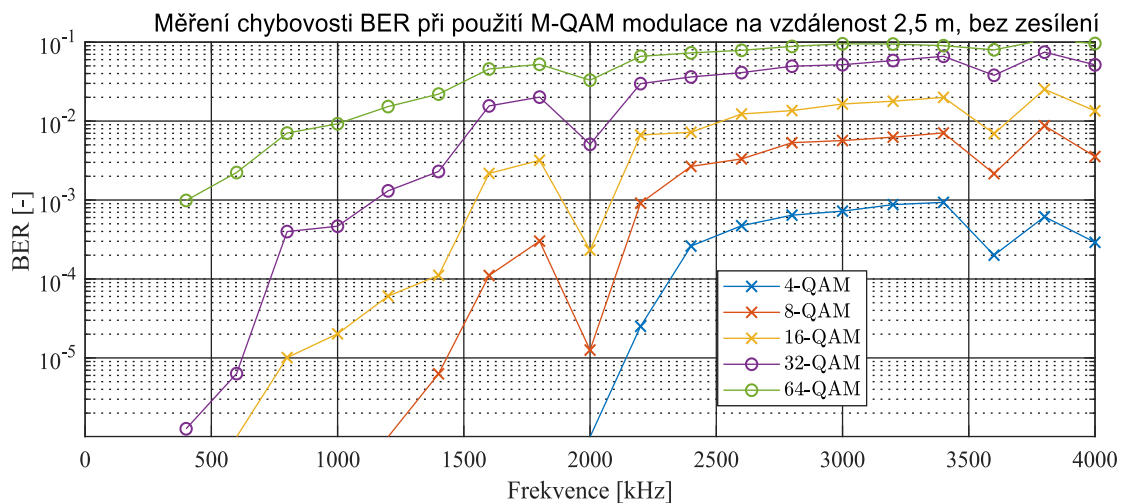
Měření probíhalo na chodbě fakulty elektrotechniky a informatiky, vedle laboratoře EB418. Světlo bylo staticky umístěno na pracovní ploše, jejíž poloha byla také stálá. Pohybovalo se pouze s fotodetektořem, který byl umístěn na stolku ve stejné výšce jako světlo, tedy 110 cm. Fotodetektor byl umístěn vždy přímo naproti středu zdroje světla, ve vzdálenosti od 2,5 m do 7,5 m, s krokem 50 cm, dále od 7,5 m do 10 m s krokem 2,5 metrů. Při měření byla použita plankonvexní čočka.

Měřila se hodnota chybovosti BER při použité modulaci 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM a 64-QAM. Hodnota nosné frekvence byla 3 MHz, stejná pro všechna měření. Dále se nastavovala hodnota IQ Rate (vysvětleno v části 5.2.1) od 400 do 4000 kHz, s krokem 200 kHz a řád M-QAM modulace.

Všechny naměřené hodnoty včetně grafů a kódů v MATLABu jsou uvedeny v příloze.



Obrázek 21: Schéma měření světla na pracovní ploše.

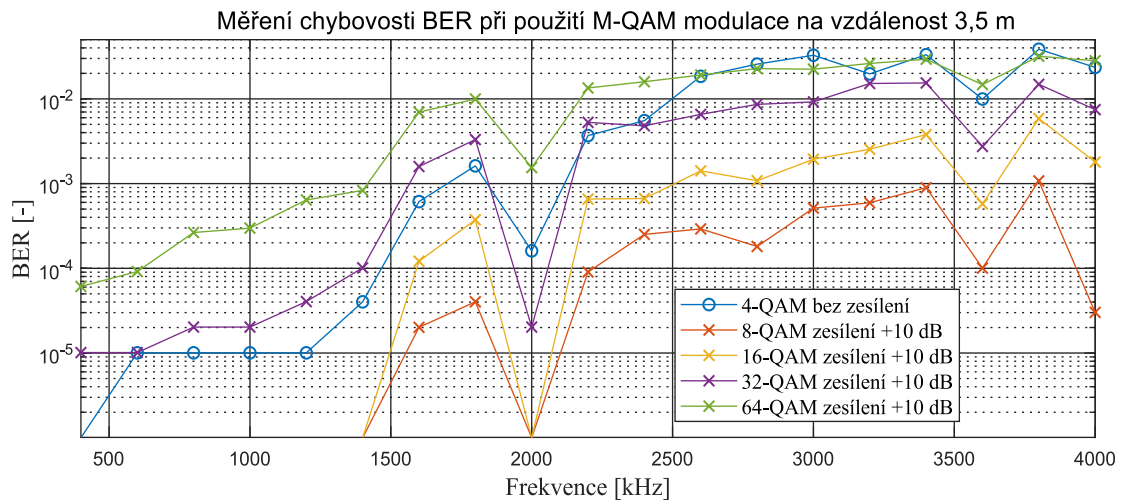


Obrázek 22: Měření chybovosti BER na vzdálenost 2,5 metrů od zdroje světla.

Na obrázku 22 můžeme vidět srovnání použité modulace a hodnotu chybovosti BER pro daný frekvenční rozsah ve vzdálenosti 2,5 m od zdroje světla. Při měření na tuto vzdálenost nebylo použito zesílení na fotodetektoru pro všechny typy měřených modulací. Je zřejmé, že použití nižších řádů modulací má za následek nižší chybovost. Při použití 4-QAM modulace je bitová chybovost do šířky pásma 2000 kHz tak malá, že je pro nás neměřitelná (to je ovšem způsobeno omezeným počtem přenášených symbolů, také hardwarovými vlastnostmi USRP), následně se

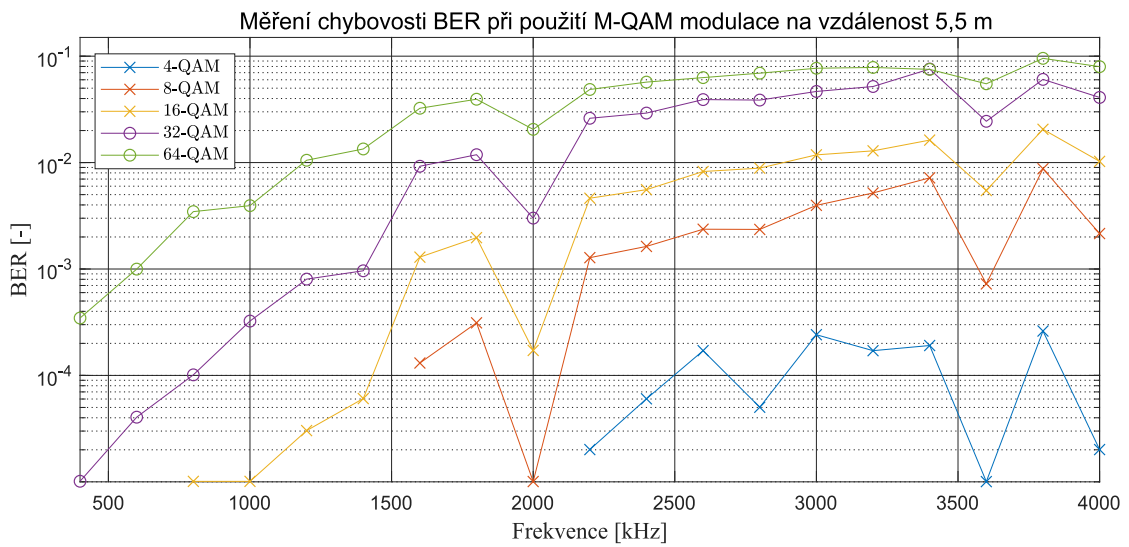
zvyšuje, ovšem maximálně na řád E-03. U vyšších řádů modulací, tedy 64-QAM je hodnota BER již na 2,5 metrech od světla při použití šířky pásma 400 kHz potenciálně nevyhovující hodnota, ovšem při měření nebylo použito zesílení signálu na fotodetektoru.

Obrázek 23 ukazuje použití zesílení na fotodetektoru, kdy přidáním +10 dB dosahujeme od šířky pásma 2200 kHz skoro stejných výsledků u 64-QAM a 4-QAM bez použití zesílení, a to na 3,5 metrech od zdroje.

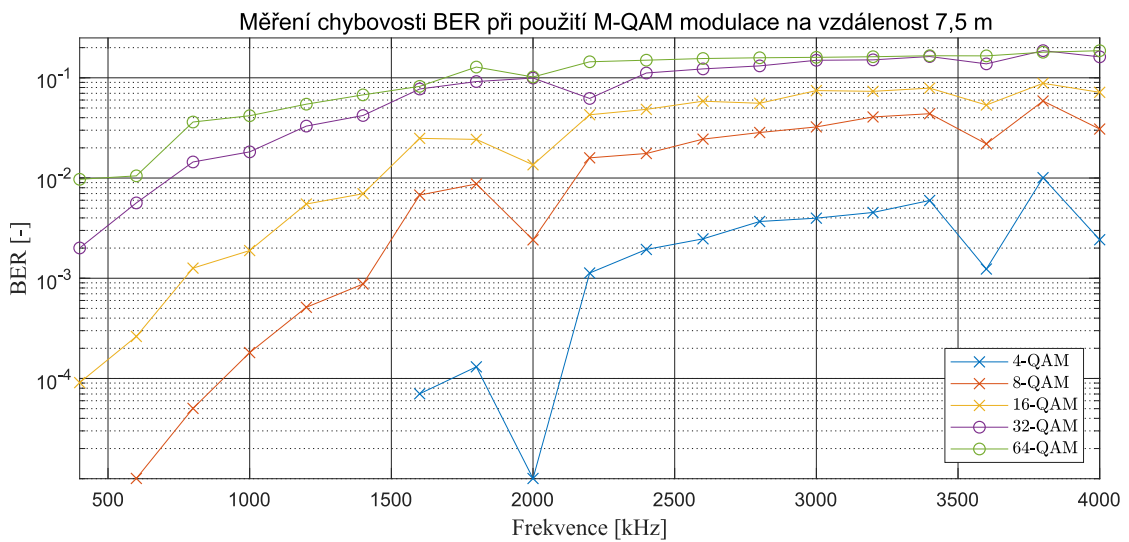


Obrázek 23: Měření chybovosti BER na vzdálenost 3,5 metrů od zdroje světla.

Na obrázku 24 můžeme vidět srovnání použitých modulačních schémat na vzdálenost 5,5 metrů od zdroje světla. Pro měření bylo použito zesílení +10 dB na fotodetektoru. V oblasti od 2200 kHz můžeme vidět narůst hodnoty BER u všech typů modulací, kromě 4-QAM, která je velmi spolehlivá, avšak za cenu méně přenesených symbolů a tím i nižší přenosové rychlosti.



Obrázek 24: Měření chybovosti BER na vzdálenost 5,5 metrů od zdroje světla.

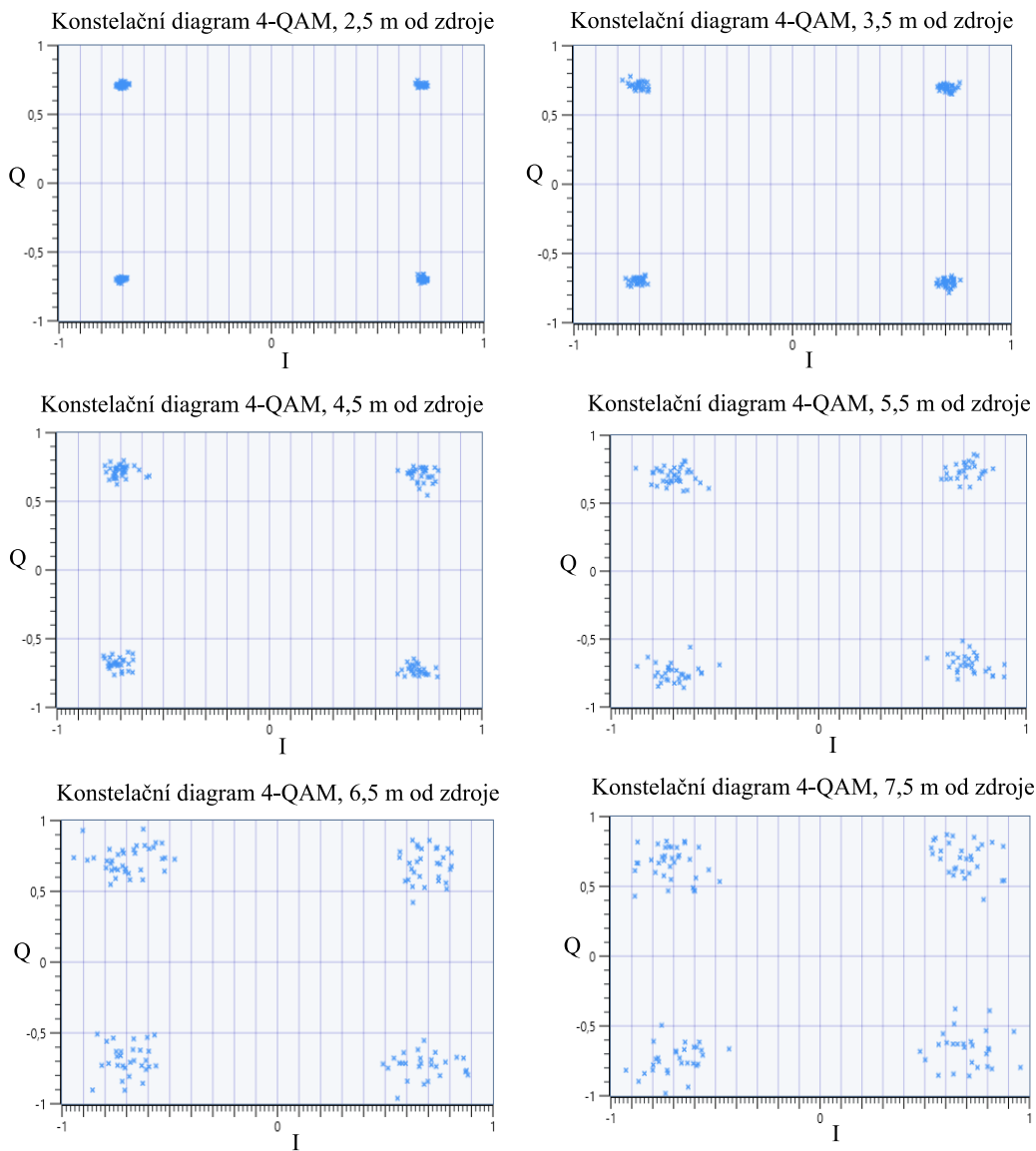


Obrázek 25: Měření chybovosti BER na vzdálenost 7,5 metrů od zdroje světla.

Obrázek 26 srovnává bitovou chybovost 4-QAM modulace se zvyšující se vzdáleností od zdroje světla. Uvedené spektra jsou zobrazené v základním pásmu, tudíž osy X a Y neodpovídají reálným frekvencím. Uvedené hodnoty jsou měřeny pro šířku pásma 2000 kHz. Jak je vidět na obrázku, při vzdálenosti do 3,5 m je bitová chybovost skoro nulová, tedy pro nás neměřitelná hodnota a s postupující vzdáleností se zvyšuje. To je ale také dáno malou náchylností na rušení, protože 4-QAM modulace obsahuje pouze 4 stavy. Na 7,5 metrech od světla do šířky pásma 2000 kHz se bitová chybovost 4-QAM modulace pohybuje v řádech maximálně E-05, jakmile překoná tuto pomyslnou hranici, BER se již při použití šířky pásma 2200 kHz zvýší na řád E-03, kde se

dále stabilně udržuje. Srovnání všech měřených modulačních schémat na 7,5 metrech od svítidla ukazuje obrázek 25.

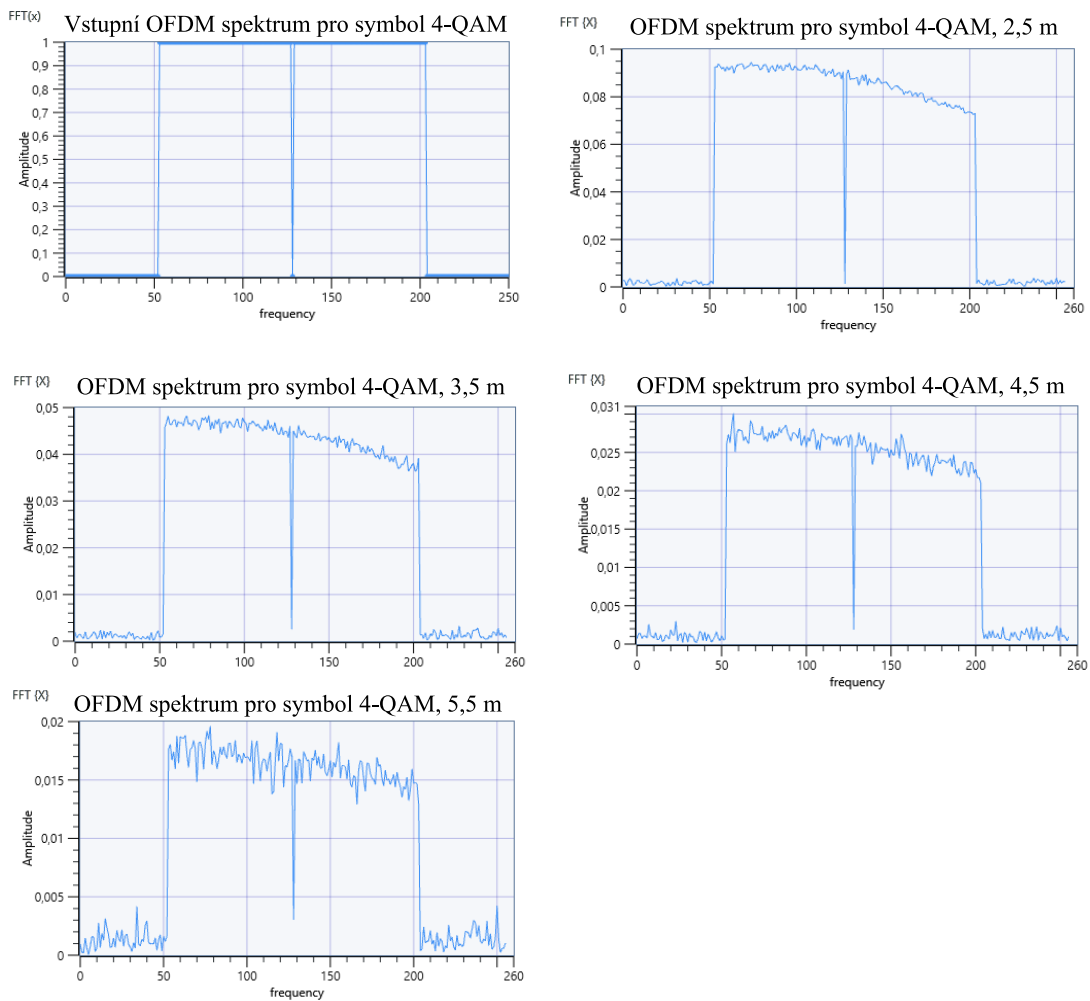
Tady je vidět, že hodnota BER pro 32-QAM a 64-QAM modulace je na tuto vzdálenost poměrně vysoká, ani v okolí šířky pásma 2000 kHz BER neklesá. Ovšem počet přenesených symbolů je na těchto modulacích vyšší, tudíž se zvyšuje i celková chybovost.



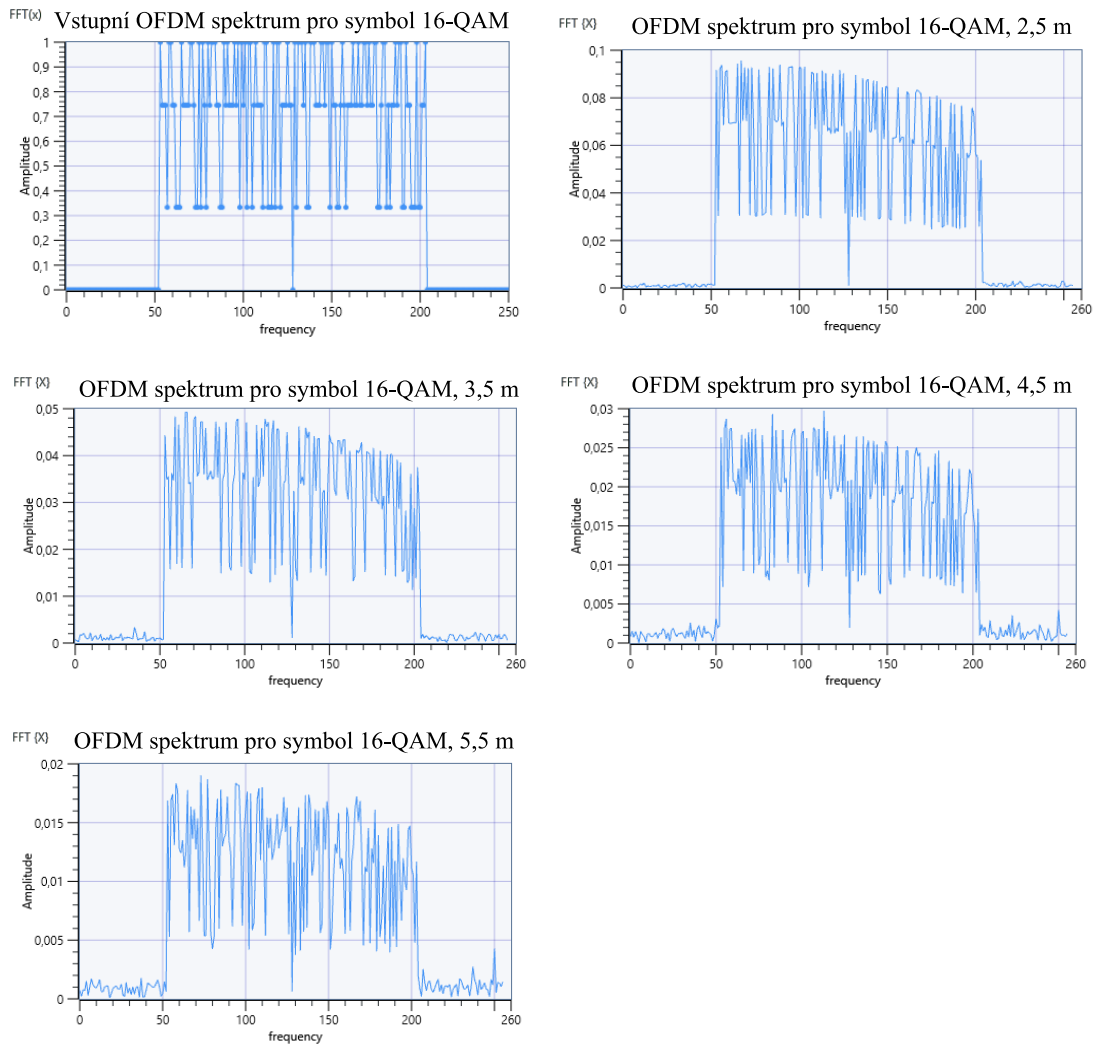
Obrázek 26: Srovnání BER 4-QAM modulace se vzdáleností od zdroje, krok 1 m.



Obrázky 27 a 28 ukazují, jak se zvyšující se vzdáleností od zdroje světla degraduje přijímaný OFDM symbol 4-QAM a 16-QAM modulace. Uvedené hodnoty jsou pro šířku pásma 2000 kHz a nosnou frekvenci 3 MHz. Osy X a Y nejsou relevantní vůči prováděnému měření. Výsledný symbol v sobě reflektuje hodnotu nosné frekvence (pokles uprostřed symbolu), dále šířku pásma (rovnoměrně rozložené vlevo a vpravo od poklesu uprostřed). Tyto hodnoty na ose X neodpovídají skutečně nastaveným parametrům. Deformace výsledného symbolu nastává nejen v důsledku kvality přijímané výkonové úrovně, tedy vzdáleností fotodetektoru od zdroje světla, ale také jej ovlivňují další nepříznivé jevy, jako nelinearita zesilovače nebo nedokonalost USRP.

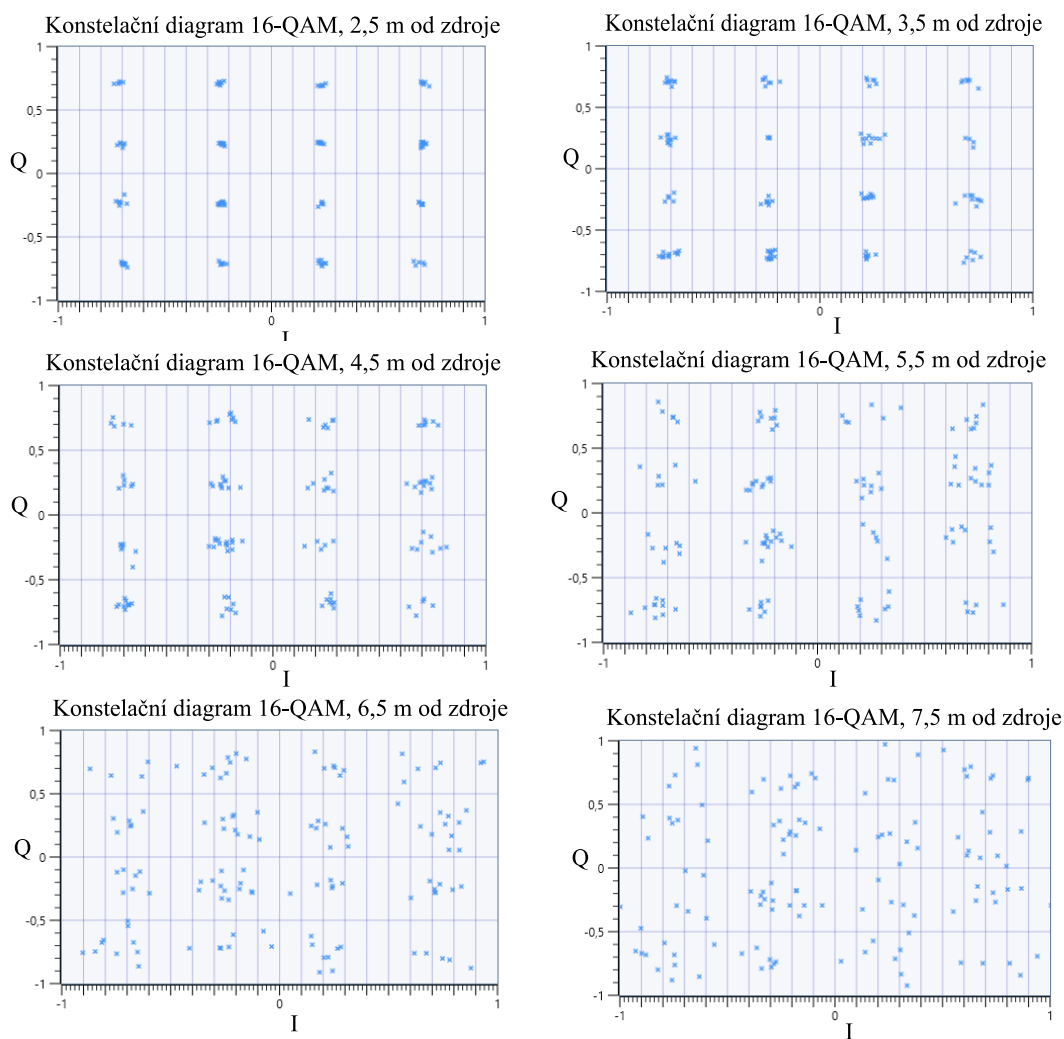


Obrázek 27: Srovnání vysílaného spektra OFDM s přijímaným pro 4-QAM, krok 1 m.



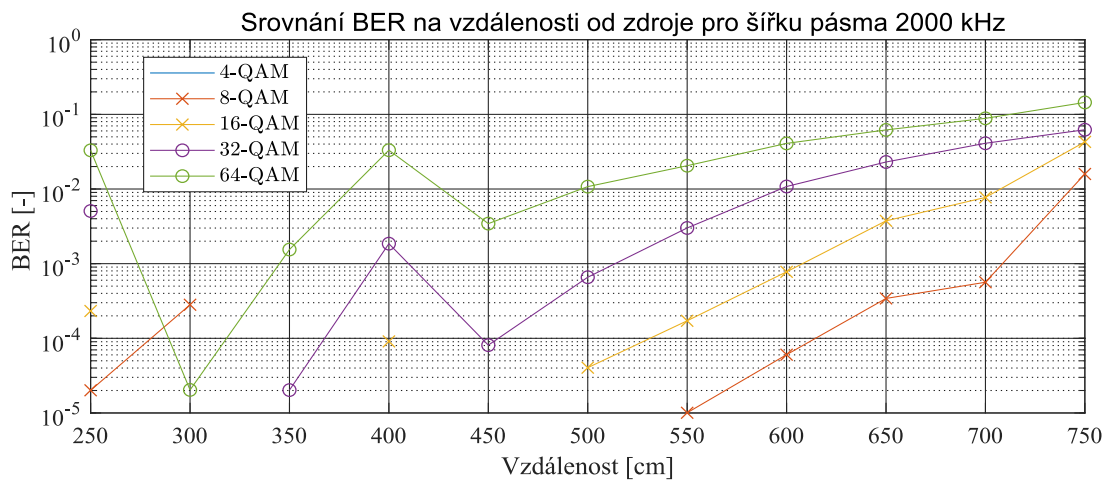
Obrázek 28: Srovnání vysílaného spektra OFDM s přijímaným pro 16-QAM, krok 1 m.

Obrázek 29 srovnává konstelační diagramy 16-QAM modulace se zvyšující se vzdáleností od zdroje světla, s krokem 1 m. Uvedené hodnoty jsou pro šířku pásma 2000 kHz. Zde můžeme vidět, že modulační schéma 16-QAM je více náchylnější na rušení, protože při šestnácti stavech jsou přenášené symboly blíže k sobě. Při vzdálenosti do 3,5 metrů od zdroje je hodnota BER téměř neměřitelná (viz. obrázky 22 a 23), postupně se ale zvyšuje až na řád E-03 na 6,5 metrech a E-02 na 7,5 metrech.



Obrázek 29: Srovnání BER 16-QAM modulace se vzdáleností od zdroje, krok 1 m.

Obrázek 30 popisuje celkové srovnání všech použitých modulací v závislosti na vzdálenosti od zdroje světla. 4-QAM modulace na grafu chybí, to je ale způsobeno tím, že její hodnota BER je tak malá při celém průběhu měření, že je téměř neměřitelná. Ostatním měřeným modulacím se na 2,5 metrech od zdroje světla různě mění řád BER, ovšem na této vzdálenosti nebylo použito zesílení na fotodetektoru. Modulace 8-QAM a 16-QAM se projevují od 5 a 5,5 metrů od zdroje světla, kdy se řád BER pohybuje v řádech E-05. S rostoucí vzdáleností se ale obě modulace dostávají na řád E-01. Pro modulace 32-QAM a 64-QAM vidíme, že se začínají projevovat již při vzdálenosti 300-350 cm od zdroje světla. Na 750 cm od zdroje světla se také dostávají na řád BER E-01.



Obrázek 30: Srovnání BER se vzdáleností od zdroje světla, šířka pásma 2000 kHz.

## 5.4 Realizace měření na vnitřním stropním světle

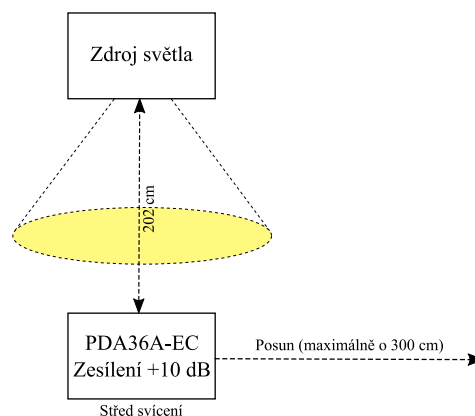
Druhá část měření probíhala v laboratoři EB205 (budova FEI), kde bylo světlo zavěšeno na stropě. Fotodetektor byl umístěn na stolku přímo pod zdrojem světla, ve vzdálenosti 202 cm. Při tomto měření nebyla použita plankonvexní čočka, ale bylo použito zesílení +10 dB na fotodetektoru pro všechna měření. Opět se měřil parametr chybovosti BER při použité modulaci 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM a 64-QAM. Se stolkem se pohybovalo po jedné ose až do vzdálenosti 300 cm od vyzářeného středu kužele světla s krokem 25 cm. Nemělo smysl měřit všechny osy, protože vyzářený kužel světla svítí do všech směrů stejně.

Při měření se nastavovala hodnota nosné frekvence 3 MHz, která byla stejná pro všechna měření, a opět stejné nastavení hodnoty IQ Rate a řádu M-QAM modulace.

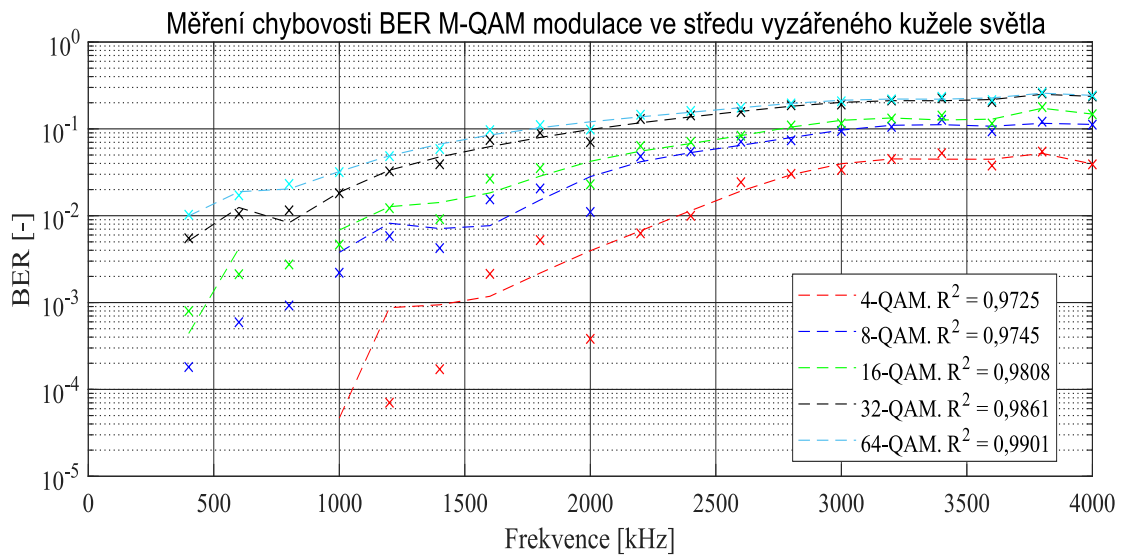
Laboratorní podmínky při měření nebyly dokonalé, i když okna byla v celém průběhu zatažená, do místnosti stále pronikala malá část venkovního světla. Dále mohli měření narušovat i okolní zařízení nebo elektrická síť.

Všechny naměřené hodnoty včetně grafů a kódů v MATLABu jsou uvedeny v příloze.

Na obrázku 32 můžeme vidět chybovost BER v závislosti na šířce frekvenčního pásma ve středu vyzářeného kuželu světla. Ve všech grafech, které ukazují chybovost BER pro světlo zavěšené na stropě jsou hodnoty proloženy regresní křivkou. Ta ukazuje trend v posloupnosti bodů. Již přímo pod zdrojem světla vidíme větší bitovou chybovost při použití 4-QAM modulace u použité šířky pásma 1600 kHz. Hodnota BER u 4-QAM modulace je za užití nižší šířky pásma (do 1000 kHz) neměřitelná, dále se pohybuje kolem řádu E-03 a od 2200 kHz postupně stoupá až nad řád E-02. Modulace 8-QAM a 16-QAM se u nižších šířek pásma pohybují v řádech E-03, poté se však jejich bitová chybovost přibližuje až k řádu E-01. U modulací 32-QAM a 64-QAM vidíme velkou poměrně značnou bitovou chybovost (řád E-02) již při základní měřené šířce pásma 400 kHz. Jejich hodnota BER se blíží až k 0,25, což znamená že každý čtvrtý přenesený symbol je chybný. Toto je ovšem z části zapříčiněno nepoužitím plankonvexní čočky, která by směřovala vyzářené paprsky do středu ohniska detektoru.

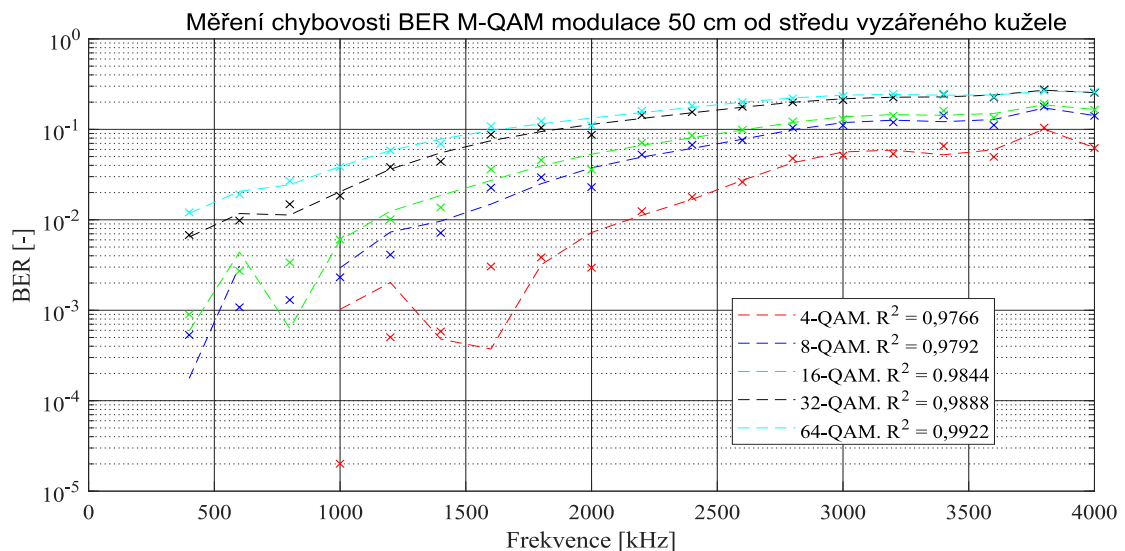


Obrázek 31: Schéma měření světla zavěšeného na stropě.

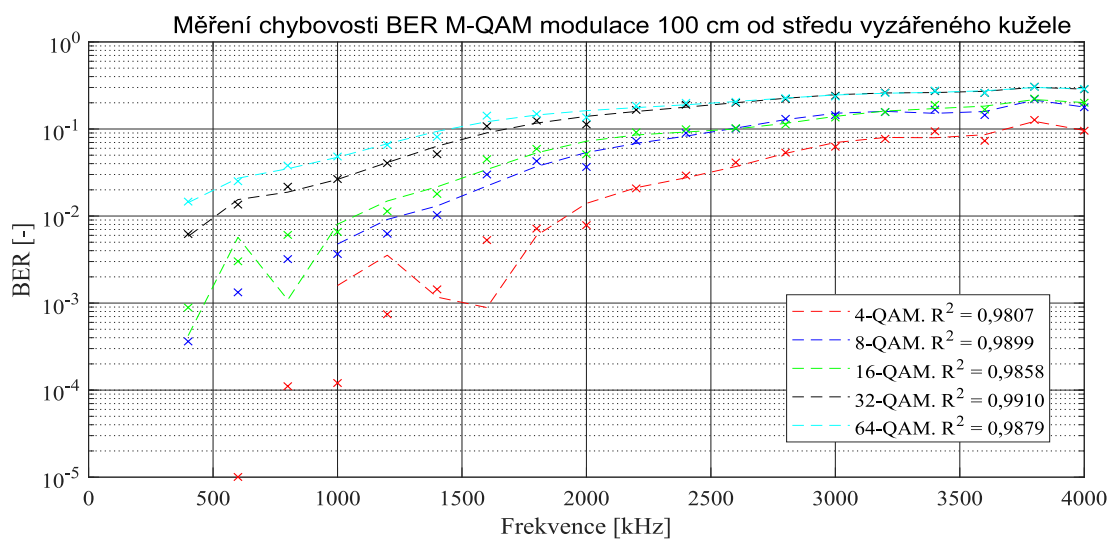


Obrázek 32: Měření chybovosti BER ve středu vyzářeného kužele světla.

Obrázek 33 ukazuje bitovou chybovost na 50 cm od středu vyzářeného kužele světla. Na této vzdálenosti je BER 4-QAM modulace neměřitelná hodnota pouze do šířky pásma 800 kHz, dále se na 1000 kHz pohybuje v řádu E-05 a od šířky pásma 1200 kHz už se hodnota bitové chybovosti blíží k řádu E-03. Při použití velké šířky frekvenčního pásma (od 2400 kHz) se BER pohybuje v řádech E-02 až postupně na E-01. Modulační schémata 8-QAM a 16-QAM začínají na řádu E-03 a postupně se také dostávají na řád E-01. Modulační schémata 32-QAM a 64-QAM mají podobný průběh jako při měření přímo pod zdrojem světla. Na obrázku 34 můžeme vidět podobný průběh jako při měření na 50 centimetrech od středu vyzářeného kužele.



Obrázek 33: Měření chybovosti BER 50 cm od středu vyzářeného kužele světla.

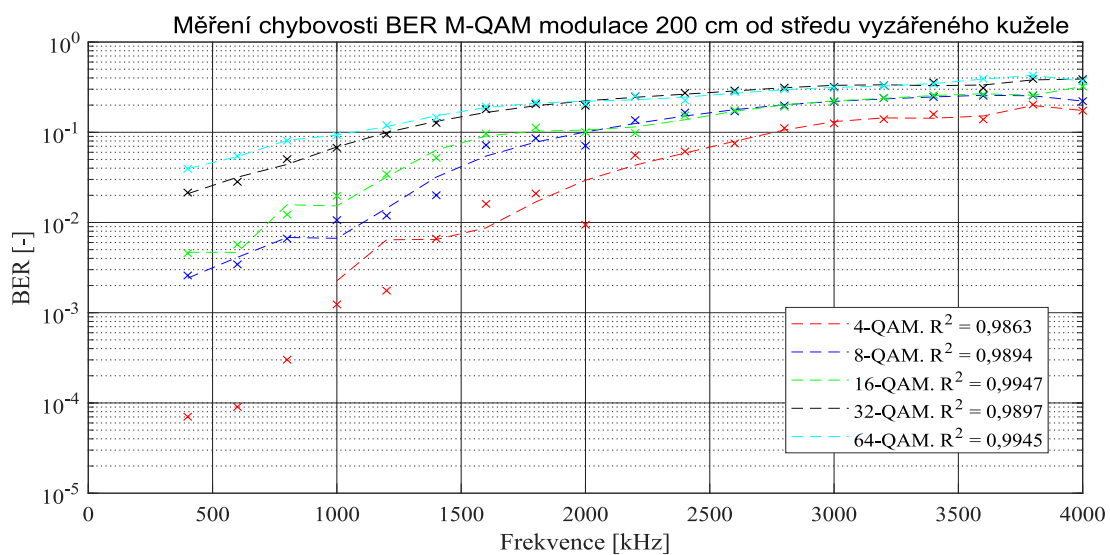


Obrázek 34: Měření chybovosti BER 100 cm od středu vyzářeného kužele světla.

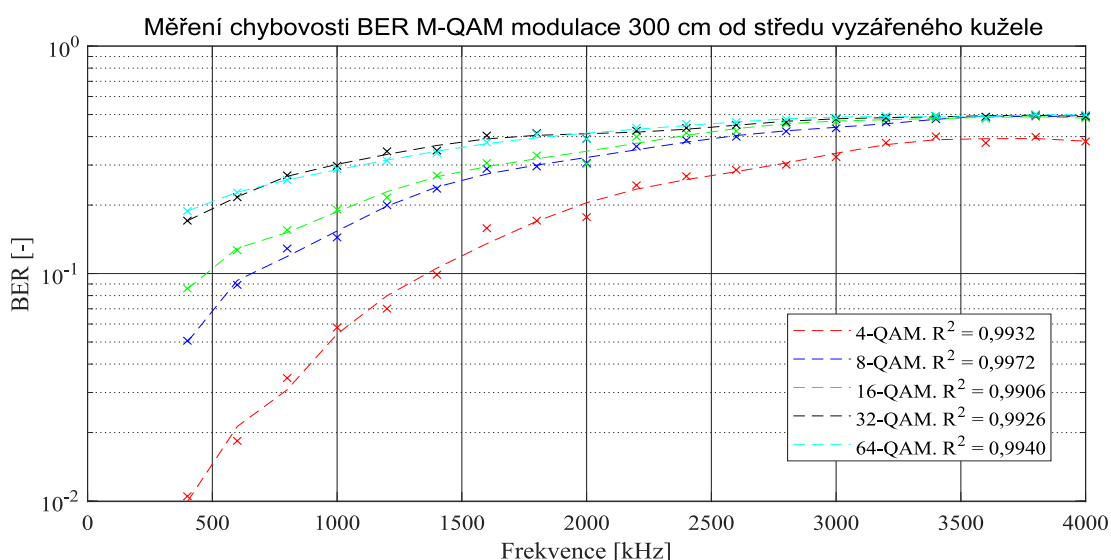
Obrázky 35 a 36 popisují měření BER na vzdálenosti 200 a 300 cm od vyzářeného středu kužele. Jejich průběh je velice podobný, jen řád BER je rozdílný pouze od jeden, a to na začátku průběhu u 200 cm je řád E-02, kdežto u 300 cm od středu vyzářeného kužele se pohybuje kolem E-01. To ovšem neplatí pro 4-QAM modulaci, která je na 200 centimetrech do šířky pásma do 600 kHz na řádu E-04, tedy v porovnání s ostatními modulacemi dobrá hodnota.

Na 300 cm od středu kužele je do šířky pásma 1400 kHz 4-QAM modulace na řádu E-02, ale od 1600 kHz se zvýší na řád E-01 a nadále stoupá až k hodnotě 0,4. Další měřené modulační schémata se při použití šířky pásma 400 kHz pohybují kolem řádu bitové chybovosti E-01 a postupně se zvyšují až k hodnotě 0,5.

Použití plakonvexní čočky nemá na těchto vzdálenostech smysl, protože vyzářený úhel je tak velký, že paprsky se korektně neodrazí do středu ohniska detektoru, takže čočka spíše brání vstupu světla do detektoru.



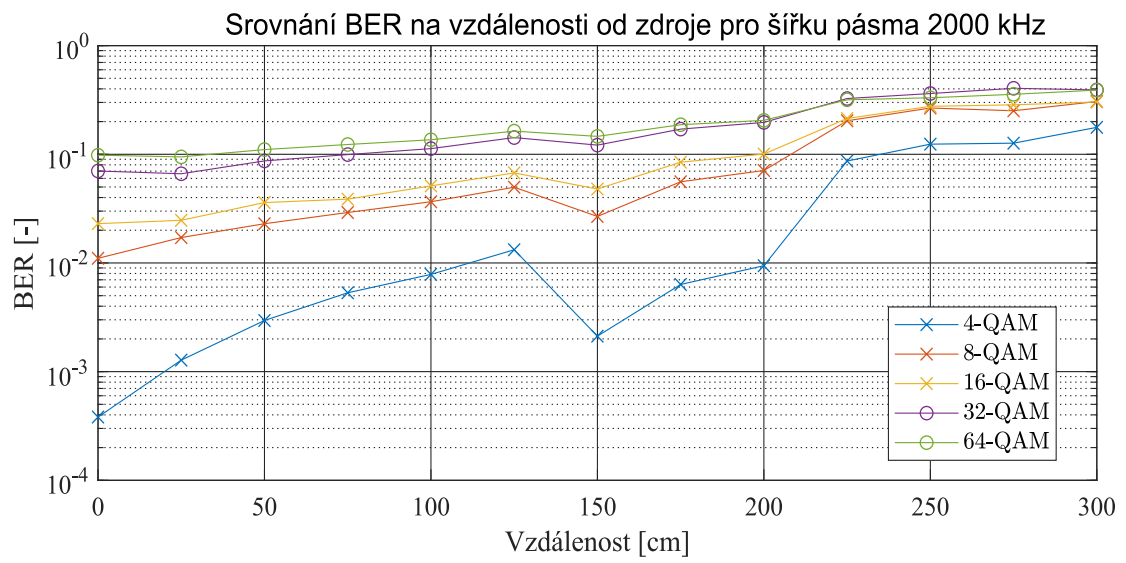
Obrázek 35: Měření chybovosti BER 200 cm od středu vyzářeného kužele světla.



Obrázek 36: Měření chybovosti BER 300 cm od středu vyzářeného kužele světla.

Obrázek 37 popisuje celkové srovnání všech použitých modulací v závislosti na vzdálenosti od zdroje světla. Je jasně vidět, že 4-QAM modulační dosahuje nejlepších výsledků do 200 cm od vyzářeného kužele světla. od 225 cm se ovšem hodnota BER zvýší o řád a její hodnota je srovnatelná s ostatními modulačními schémata. Modulační 8-QAM a 16-QAM již přímo pod světlem začínají na řádu E-02 a se zvyšující se vzdáleností jejich hodnota BER roste až k 0,5. Stejný průběh mají i modulační 32-QAM a 64-QAM, ovšem ty začínají již na řádu BER E-01.





Obrázek 37: Srovnání BER se vzdáleností od zdroje světla, šířka pásma 2000 kHz.

## 6 Závěr

Tato práce pojednává o využitelnosti komunikace viditelným světlem pomocí LED svítidla při použití OFDM modulace. V teoretické části popsány princip VLC a její využití, dále rozbor modulačních schémat využitelných při přenosu informací viditelným světlem a je zde popsán standard IEEE 802.15.7, který definuje použití VLC.

V praktické části je popsán měřený parametr bitové chybovosti (BER), dále použité přístroje a použité LED světlo. Také je tu popsán software, který nám umožnil měnit všechny nastavované parametry.

Bylo provedeno měření BER v závislosti na vzdálenosti a použité šířky pásma. Měření bylo rozdělené do dvou částí. V první části bylo světlo umístěno na pracovní ploše a v druhé části bylo světlo uchyceno na strop.

Při měření se pracovalo s modulačními schématy M-QAM. Řád modulace se nastavoval na 4, 8, 16, 32 a 64. Nastavovala se hodnota nosné frekvence 3 MHz, která byla stejná pro všechny měření. Dále se nastavovala hodnota IQ Rate, od 400 do 4000 kHz.

V první části měření se ukázalo, že použití nižších řádů modulací má za následek nejnižší chybovost. Hodnota BER 4-QAM modulace se stabilně udržovala kolem řádu E-05 až E-04 do 5,5 metrů od zdroje světla. Modulace 32-QAM a 64-QAM vykazují velkou bitovou chybovost na vzdálenosti od 5 metrů, ovšem při použití velké šířky pásma - od 2200 kHz. Na 7,5 metrech se hodnoty BER již při použití šířky pásma 400 kHz pohybují v řádech E-03, respektive E-02. Je zde také popsáno srovnání konstelačních diagramů modulací 4-QAM a 16-QAM, kde je názorně vidět, jak se projevuje mezisymbolové rušení při použití 16-QAM modulace na větší vzdálenosti od zdroje světla.

V druhé části měření bylo světlo zavěšeno na strop a pohybovalo se s fotodetektořem po ose od středu vyzářeného kužele světla. Toto měření ukázalo, že při absenci plankonvexní čočky se hodnoty BER značně zhoršují. Už při umístění fotodetektoru přímo pod zdrojem světla za použití 4-QAM modulace se hodnota BER při šířce pásma 1400 kHz pohybuje v řádu E-03. Postupně se zvyšuje až na řád E-02. Modulace 32-QAM a 64-QAM vykazují poměrně značnou bitovou chybovost při šířce pásma 400 kHz - pohybují se v řádech E-02 a postupně se dostávají až na řád E-01. Jak se zvyšuje vzdálenost od středu vyzářeného kužele, modulace 32-QAM a 64-QAM mají téměř stejné hodnoty, kdy se postupně dostávají až na řád E-01 u všech měřených vzdáleností. Ostatně u 300 cm od středu vyzářeného kužele se jen 4-QAM drží na řádu bitové chybovosti E-02 u šířky pásma do 1000 kHz, ostatní modulace při stejné šířce pásma pohybují kolem řádu BER E-01.

V obou částech měření je možné si povšimnout, že v okolí pásma 2000 kHz a 3600 kHz se bitová chybovost značně sníží, někdy i o celý řád. Tento jev je zapříčiněný hardwarovými vlastnostmi použitého USRP, který zřejmě pracuje v okolí 2000 kHz nejlépe.

Z dosažených výsledků vyplývá, že modulace 4-QAM se jeví jako nejlepší. Vykazuje nejlepších výsledků jak při použití různých šířek frekvenčního pásma, tak i měřené bitové chybovosti.

Použití modulací 32-QAM a 64-QAM je při použití nosné frekvence 3 MHz, zesílení +10 dB a použití čočky reálně možné na menších šířkách pásma (do 2000 kHz pro 32-QAM, kolem 1000 kHz pro 64-QAM) a vzdáleností do 5 metrů.

Nevýhodou měření bylo celkové zapojení všech měřících komponent. V první části bylo světlo napevno umístěno na pracovní plochu, ale ta byla velmi těžká, tedy se s ní špatně manévrovalo. Zdroj světla byl umístěný ve výšce 110 cm od podlahy, taktéž i fotodetektor na stolku. Fotodetektor na přijímací straně nebyl vždy přesně ve středu osy vyzářeného světla, tudíž docházelo k nepřesnosti měření. Jako nejlepší možnost se jeví použití prostředků, u kterých by nedocházelo k vychýlení z přímé viditelnosti, například kolejový typ uchycení měřící soustavy. V druhé části, kdy bylo světlo přichyceno na stropě by za reálně použitelné hodnoty BER mohli být při měření považovány ty, kdy je rozsvíceno více světel na stropě. Pak by se bitová chybovost snížila, protože ve velkých vyzařovacích úhlech, kde jsou hodnoty BER pro jedno světlo vysoké, by již tentýž úhel vyplňovalo světlo druhé a naopak.

Toto je ovšem i možná malý náhled do budoucnosti, kdy by se světlo využívalo pro přenos užitečné informace a nahradilo by dnešní nejvyužívanější technologii pro bezdrátový přenos, Wi-Fi.

## Literatura

- [1] MATHEUS, Luiz Eduardo Mendes, Alex Borges VIEIRA, Luiz F. M. VIEIRA, Marcos A. M. VIEIRA a Omprakash GNAWALI. Visible Light Communication: Concepts, Applications and Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* [online]. 2019, 21(4), 3204-3237 [cit. 2020-01-02]. DOI: 10.1109/COMST.2019.2913348. ISSN 1553-877X. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8698841>
- [2] IEEE Standard for Local and metropolitan area networks–Part 15.7: Short-Range Optical Wireless Communications,"in *IEEE Std 802.15.7-2018 (Revision of IEEE Std 802.15.7-2011)* , vol., no., pp.1-407, 23 April 2019, [cit. 2020-01-02]. doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8697198
- [3] NDJIONGUE, Alain Richard & Ferreira, Hendrik & Ngatched, Telex. (2015). Visible Light Communications (VLC) Technology. *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering* [cit. 2020-01-02]. 1-15. 10.1002/047134608X.W8267.
- [4] SHANG, Y-Man, WANG, Gen-Shuh, SLINEY, David H., YANG, Chang-Hao, LEE Li-Ling. Light-emitting-diode induced retinal damage and its wavelength dependency in vivo. *International Journal of Ophthalmology* [online]. 2017 [cit. 2020-01-02]. DOI: 10.18240/ijo.2017.02.03. ISSN 22223959. Dostupné z: [http://www.ijo.cn/gjyken/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20170203&flag=1](http://www.ijo.cn/gjyken/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170203&flag=1)
- [5] FERREIRA, Ricardo X. G., Enyuan XIE, Jonathan J. D. MCKENDRY, et al. High Bandwidth GaN-Based Micro-LEDs for Multi-Gb/s Visible Light Communications. *IEEE Photonics Technology Letters* [online]. 2016, 28(19), 2023-2026 [cit. 2020-01-02]. DOI: 10.1109/LPT.2016.2581318. ISSN 1041-1135. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7492305>
- [6] DISSANAYAKE, Sarangi Devasmitha (2017): Applications of OFDM in vehicular and indoor optical wireless communication. figshare. Thesis. [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://doi.org/10.4225/03/58a64f4d01b05>
- [7] CHO, Yong Soo, Jaekwon KIM a Won Young Yang KANG. *MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB* [online]. Singapur: Wiley, c2010 [cit. 2020-01-02]. ISBN 978-0-470-82563-7. Dostupné z: [https://www.academia.edu/31879492/MIMO-OFDM\\_Wireless\\_Communications\\_with\\_MATLAB\\_Yong\\_Soo\\_Cho\\_et\\_al.\\_](https://www.academia.edu/31879492/MIMO-OFDM_Wireless_Communications_with_MATLAB_Yong_Soo_Cho_et_al._)
- [8] *Modulace s více nosnými kmitočty* [online]. [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/234/02.html>
- [9] *Opatření k eliminaci vlivu vícecestného šíření* [online]. [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: [http://www.urel.feec.vutbr.cz/MTRK/?Syst%EDce\\_nos%FDmi%2C\\_OFDM:Opat%F8en%ED\\_k\\_eliminati\\_vlivu\\_v%EDcecestn%EDho\\_%B9%ED%F8en%ED](http://www.urel.feec.vutbr.cz/MTRK/?Syst%EDce_nos%FDmi%2C_OFDM:Opat%F8en%ED_k_eliminati_vlivu_v%EDcecestn%EDho_%B9%ED%F8en%ED)

- [10] *OFDM and Multi-Channel Communication Systems* [online]. 3 Mar 2019 [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: [https://www.ni.com/cs-cz/innovations/white-papers/06/ofdm-and-multi-channel-communication-systems.html#\\$section--1503165215](https://www.ni.com/cs-cz/innovations/white-papers/06/ofdm-and-multi-channel-communication-systems.html#$section--1503165215)
- [11] *Hermitian symmetry in OFDM systems* [online]. 26 May 2014 [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://dsp.stackexchange.com/questions/16515/hermitian-symmetry-in-ofdm-systems>
- [12] ALIABERI, Amna, Paschalis C. SOFOTASIOS a Sami MUHAIDAT. Modulation Schemes for Visible Light Communications. In: *2019 International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking (CommNet)* [online]. IEEE, 2019, 2019, s. 1-10 [cit. 2020-01-02]. DOI: 10.1109/COMMNET.2019.8742376. ISBN 978-1-5386-8317-0. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8742376/>
- [13] KABLI, Adil El a Moulay AHMED FAQIHI. Optical OFDM (O-OFDM) for Intensity Modulated/Direct Detection Optical Systems. In: *2018 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (Comnetsat)* [online]. IEEE, 2018, 2018, s. 34-38 [cit. 2020-01-02]. DOI: 10.1109/COMNETSAT.2018.8684118. ISBN 978-1-5386-6717-0. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8684118/>
- [14] GEBEYEHU, Zelalem Hailu, Philip Kibet LANGAT a Ciira Wa MAINA. BER Performance of Stratified ACO-OFDM for Optical Wireless Communications over Multipath Channel. *Journal of Computer Networks and Communications* [online]. 2018, 1-14 [cit. 2020-01-02]. DOI: 10.1155/2018/9575281. ISSN 2090-7141. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/jcnc/2018/9575281/>
- [15] DANG, Jian, Liang WU a Zaichen ZHANG. OFDM Systems for Optical Communication with Intensity Modulation and Direct Detection. ROKA, Rastislav, ed. *Optical Fiber and Wireless Communications* [online]. InTech, 2017, 2017-06-21 [cit. 2020-01-02]. DOI: 10.5772/intechopen.68199. ISBN 978-953-51-3275-2. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/optical-fiber-and-wireless-communications/ofdm-systems-for-optical-communication-with-intensity-modulation-and-direct-detection>
- [16] DISSANAYAKE, Sarangi Devasmitha a Jean ARMSTRONG. Comparison of ACO-OFDM, DCO-OFDM and ADO-OFDM in IM/DD Systems. *Journal of Lightwave Technology* [online]. 2013, 31(7), 1063-1072 [cit. 2020-01-02]. DOI: 10.1109/JLT.2013.2241731. ISSN 0733-8724. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6415964/>
- [17] DEVITENSUBAM, Bidyalaxmi, Nongmaithem LALLEIMA CHANU a Sonika SINGH. Comparative Analysis of FBMC and OFDM Multicarrier Techniques for Wireless Communication Networks. *International Journal of Computer Applications* [online]. 2014, 100(19), 27-31 [cit. 2020-01-02]. DOI: 10.5120/17636-8382. ISSN 09758887. Dostupné z: <http://research.ijcaonline.org/volume100/number19/pxc3898382.pdf>

- [18] HIDALGO STITZ, Tobias. *Filter Bank Techniques for the Physical Layer in Wireless Communications* [online]. Tampere, 2010 [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://theses.eurasip.org/theses/336/filter-bank-techniques-for-the-physical-layer-in/>. Tampere University of Technology.
- [19] KANSAL, Parnika a Ashok Kumar SHANKHWAR. FBMC vs OFDM Waveform Contenders for 5G Wireless Communication System. *Wireless Engineering and Technology* [online]. 2017, 08(04), 59-70 [cit. 2020-01-02]. DOI: 10.4236/wet.2017.84005. ISSN 2152-2294. Dostupné z: <http://www.scirp.org/journal/doi.aspx?DOI=10.4236/wet.2017.84005>
- [20] FP7-ICT Future Networks PHYDYAS—PHYSical Layer for DYnamic AccesS and Cognitive Radio Project (ICT-211887). [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <http://www.ict-phydyas.org/delivrables/PHYDYAS-D5-1.pdf/view>
- [21] *Filter Bank Multicarrier Modulation* [online]. [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://www.electronics-notes.com/articles/radio/multicarrier-modulation/fbmc-filter-bank-multicarrier.php>
- [22] MINSEOK, Oh. *A flicker mitigation modulation scheme for visible light communications* [online]. 2013 [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6488333>
- [23] POYNTON, Charles. *Frequently Asked Questions about Color* [online]. 28.11.2006 [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://poynton.ca/PDFs/ColorFAQ.pdf>
- [24] CIE RGB In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2020 [cit. 2020-02-08]. Dostupné z: [https://fr.wikipedia.org/wiki/CIE\\_RGB](https://fr.wikipedia.org/wiki/CIE_RGB)
- [25] *The electromagnetic spectrum* [online]. [cit. 2020-02-08]. Dostupné z: <https://spark.iop.org/electromagnetic-spectrum-0>
- [26] TENSUBAM, Bidyalaxmi Devi a Sonika SINGH. *A Review on FBMC: An Efficient Multicarrier Modulation System* International Journal of Computer Applications [online]. 2014, 98(17), 6-9 [cit. 2020-02-09]. DOI: 10.5120/17273-7698. ISSN 09758887. Dostupné z: <http://research.ijcaonline.org/volume98/number17/pxc3897698.pdf>
- [27] *What is a Bias Tee* [online]. [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://www.onesdr.com/2020/01/19/what-is-a-bias-tee/>
- [28] *Thorlabs: PDA36A-EC* [online]. [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=PDA36A-EC&pn=PDA36A-EC#11887>

- [29] *How Do I Measure the Bit Error Rate* [online]. [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <https://www.keysight.com/main/editorial.jspx?ckey=1481106&id=1481106&nid=-11143.0.00&lc=eng&cc=CZ>
- [30] *What is Bit Error Rate: BER tutorial* [online]. [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <https://www.electronics-notes.com/articles/radio/bit-error-rate-ber/what-is-ber-definition-tutorial.php>

## A Seznam příloh

1. Datasheety
2. Grafy
3. Tabulky naměřených hodnot