

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

**SIMULACE MODULAČNÍCH FORMÁTŮ PRO KOHERENTNÍ
OPTICKÉ KOMUNIKACE**

**SIMULATION OF MODULATION FORMATS FOR COHERENT OPTICAL
COMMUNICATION**

2013

Miroslav Potočný

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

Zadání bakalářské práce

Student: **Miroslav Potočný**
Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie
Studijní obor: 2612R059 Mobilní technologie
Téma: **Simulace modulačních formátů pro koherentní optické komunikace**
Simulation of Modulation Formats for Coherent Optical Communication

Zásady pro vypracování:

Cílem dané bakalářské práce je seznámení se problematikou modulačních formátů využívajících se v optických komunikacích primárně pro oblast s využitím koherentních zdrojů. Student má za úkol nastudovat danou problematiku z pohledu fyzikálního i matematického popisu a poté zhotovit studijní podpůrný materiál a flash animace, které bude nápomocny studentům pro pochopení dané problematiky v předmětech zaměřených na vláknově optické komunikace. V závěru budou uvedeny informace z pohledu porovnání moderních modulací s ohledem na optické parametry pro vláknově optické komunikace.

1. Popis stávajících formátů používaných v optoelektronice s ohledem pro koherentní komunikace .
2. Simulace modulačních formátů v prostředí Optiwave Optiwave.
3. Vytvořte studijní materiál o koherentních modulačních formátech ve formě Flash animací.
4. Závěr a zhodnocení simulací.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] SALEH, Bahaa E. A.; TEICH, Malvin Carl. *Základy fotoniky*. Vydání 1. Praha: Matfyzpress, 1994. 226 s. ISBN 80-85863-01-4.
- [2] WILFERT, O.; *Optoelektronika*, UREL FEKT VUT v Brně, 2002.
- [3] KAZOVSKY, Leonid G., et al.; *Broadband Optical Access Networks*. Canada: Wiley, 2011. 283 p.. ISBN 978-0-470-18235-2.
- [4] MA, Maode. *Current Research Progress of Optical Networks*. 1st Edition. [s.l.]: Springer, 2009. 282 p. ISBN 978-1402098888
- [5] LAM, Cedric. *Passive Optical Networks: Principles and practice*. Oxford: Elsevier Onc., 2007. 324 p. ISBN 978-0-12-373853-0
- [6] DHAINI, Ahmad R. *Next-Generation Passive Optical Networks*. Saarbrücken: VDM Verlag, 2008. 132 p. ISBN 978-3836435062
- [7] XIONG, Fuqin. *Digital modulation techniques*. Boston: Artech House, 2000, xv, 653 s. ISBN 08-900-6970-0.

Další literatura dle pokynů vedoucího bakalářské práce.

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

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Látal**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013



prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.
vedoucí katedry

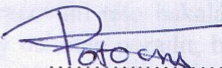


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

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

Dne: 3.5.2013


.....
podpis studenta

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval všem, kteří mi pomáhali při vypracování této bakalářské práce. Především bych chtěl poděkovat Ing. Janu Látalovi, který mi byl vždy ochoten poradit, byl vstřícný, trpělivý a já velmi oceňuji jeho profesionalitu. Z jeho profesionálního přístupu usuzuji, že jeho práce není jen každodenním zaměstnáním, ale i jeho koníčkem. Jeho stupeň porozumění a vědomostí je opravdu na vysoké úrovni. Panu inženýru Látalovi patří mimojiné ještě velký dík za metodické vedení a cenné rady, bez kterých by práce neměla tuto podobu.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je prostudovat a poté simulovat modulační formáty pro koherentní detekce, poté provést simulace ve formě Flash animací a na závěr zhodnocení jednotlivých modulačních formátů. Bakalářská práce je rozdělena do čtyř hlavních částí, které vycházejí ze zadání.

V první části jsou shrnuty teoretické poznatky. Jsou zde popsány modulace z pohledu matematického. Tyto poznatky jsou zahrnuty v kapitole 1-3.

Druhá část se zabývá simulacemi modulací v softwarovém nástroji Optiwave Optisystem 11 (64 bit), popsáním rozhraní jednotlivých modulačních formátů. V této části se také zabývám popsáním prostředí Optiwave. Rovněž je zde analýza simulací a popsání rozhraní v programu Optiwave. Tato část je obsažena v kapitole 4.

V třetí části se zabývám vyhodnocením simulací. Jsou zde zhodnoceny dosavadní výsledky a je určena nejvhodnější modulace pro koherentní detekce. Tato část je obsažena v kapitole 5.

Ve čtvrté části se zabývám tvorbou animací v nástroji Macromedia Flash 8. Čtvrtá část je popsána v kapitole 6.

Klíčová slova

ASK, PSK, FSK, QAM, QPSK, OFDM, MZM

Abstract

The topic of this bachelor thesis is to make a study of and then simulate modulation formats for coherent detection, then make animation in form of Flash animation and at the end make conclusion make evaluation of modulation formats. The bachelor thesis is divide into four principal parts, which are outlined below.

In the first part deals and sums up the mathematical theory. There are described modulation format from mathematical part. The section one is described at chapter 1-3.

Second part focus on simulation of modulation formats in the software program Optiwave Optisystem 11 (64 bit), describing layouts of modulation formats. Likewise is include analyze of modulation formats and also interface of Optiwave too. It is covered in chapter 4.

In the third part is evaluated of simulation showed grafical interface of making animation in software Adobe flash. There are show. There are described previous results and it is determine most suitable modulation for coherent detecion. This section is described at chapter 5.

In the fourt part is described making of animation in tool Macromedia Flash 8. Fourth part is described in chapter 6.

Key words

ASK, PSK, FSK, QAM, QPSK, OFDM, MZM

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Anglický význam	Český význam
ASK	Amplitude Shift Keying	Klíčování amplitudy
AWG	Arbitrary Waveform Generator	Generátor náhodných průběhů
CSRZ	Carrier Suppressed Return to Zero	potlačení nosné při návratu k nule
CD	Chromatic Dispersion	chromatická disperze
DPSK	Differential PSK	Diferenciální PSK
DFT	Discrete Fourier Transform	Diskrétní Fourierova transformace
FDM	Frequency Division Multiplex	Frekvenčně dělený multiplex
FDP	Low Pass Filter	Filtr Dolní Propusti
FSK	Frequency Shift Keying	Klíčování frekvence
FPP	Band Pass Filter	Filtr Pásmové Propusti
FFT	Fast Fourier Transform	Rychlá Fourierova transformace
IFFT	Inverse FFT	Inverzní FFT
ICI	Inter-Carrier Interference	Rušení mimo nosnou
ISI	Inter-Symbol Interference	Rušení mimo symbol
IF	Intermediate Frequency	Mezifrekvence
KD	Coherent Detection	Koherentní detekce
KZLZ	Continuous Wave laser	Kontinuální zdroj laserového záření
MZDI	Mach-Zehnder Delay Interferometer	Mach Zehnderův zpožďovací interferometr
OOK	Optical FDM	Optické FDM
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex	Ortogonální frekvenčně dělený multiplex
OPLL	Optical Phase Locked Loop	Optický fázový závěs
OTRF	Optical To Radio Frequency	Převod signálu z optického na rádiovou frekvenci
PLL	Phase Locked loop	Fázový závěs
PM coupler	Polarization Maintaining coupler	Dělič zachovávající polarizaci
RF to O	Radio Frequency to Optical	Převod elektrického signálu na optický signál
OSNR	Optical Signal to Noise Ratio	Odstup optického signálu od šumu
PD	Direct Detection	Přímá detekce
PSK	Phase Shift Keying	Fázový zdvih klíčováním
RF	Radio Frequency	Rádiová frekvence
RZ	Return to Zero	Návrat k nule
SNR	Signal to Noise Ratio	Odstup signálu k šumu
VCO	Voltage Control Oscillator	Napěťový oscilátor

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Koherentní optické komunikace.....	2
	2.1 Princip koherentních komunikací.....	2
	2.2 Detekční metody.....	3
	2.2.1 Koherentní detekce.....	3
	2.2.2 Optická heterodynní detekce.....	4
	2.2.3 Optická homodynní detekce.....	6
	2.2.4 Přímá detekce.....	7
3	Modulace pro koherentní optické systémy.....	8
	3.1 Koherentní systémy s klíčováním amplitudy.....	8
	3.1.1 Detekce obálky.....	8
	3.1.2 Synchronní detekce.....	9
	3.2 Koherentní systémy s klíčováním fáze.....	10
	3.2.1 Koherentní systémy s více stavovými PSK.....	10
	3.2.2 Diferenční detekce.....	11
	3.2.3 Binární PSK.....	11
	3.2.4 Modulátor binárního PSK.....	12
	3.2.5 Demodulace koherentního binárního PSK signálu.....	13
	3.3 Koherentní systémy s kvadrurní amplitudovou modulací.....	13
	3.3.1 Úvod do QAM.....	13
	3.3.2 Výhody a nevýhody QAM.....	13
	3.4 Koherentní systémy s klíčováním fáze.....	14
	3.4.1 Demodulace koherentního FSK signálu.....	14
	3.5 Ortogonální frekvenčně dělený multiplex.....	15
	3.5.1 OFDM obecné vlastnosti.....	15
	3.5.2 Tvarování pulzu.....	21
	3.5.3 Frekvenční reprezentace OFDM symbolů.....	21
	3.5.4 Forma spektra OFDM signálu.....	22
	3.6 Optická modulace OFDM.....	22
4	Praktická část.....	25
	4.1 Úvod.....	25
	4.2 Optisystem 11 (64 bit).....	25
	4.3 Parametry trasy.....	26
	4.3.1 Bitová chybovost.....	26
	4.3.2 Q-faktor.....	26

4.3.3	Diagram oka	26
4.3.4	Konstelační diagram	27
4.4	Optický systém ASK	28
4.4.1	Modulace signálu	28
4.4.2	Převod elektrického signálu na optický signál	28
4.4.3	Optická část	30
4.4.4	Demodulace signálu	30
4.4.5	Bitová chybovost pro zapojení optické sítě s ASK	31
4.4.6	Shrnutí	32
4.5	Optický systém OFDM s přímou detekcí	32
4.5.1	Modulace signálu	32
4.5.2	Převod elektrického signálu na optický signál	33
4.5.3	Optická část	33
4.5.4	Převod optického signálu na elektrický	34
4.5.5	Demodulování signálu	34
4.5.6	Optický spektrální analyzátor	35
4.5.7	Konstelační diagramy	35
4.5.8	Bitová chybovost pro zapojení optické sítě OFDM s přímou detekcí	36
4.6	Optický systém QAM	37
4.6.1	Modulace signálu a převod signálu na optický signál	37
4.6.2	Optická část	38
4.6.3	Převod signálu na elektrický signál a demodulace signálu	38
4.6.4	Bitová chybovost pro zapojení optické sítě s modulací QAM	39
4.6.5	Konstelační diagram	40
4.7	Optický systém QPSK	41
4.7.1	Modulace signálu	41
4.7.2	Převod signálu z elektrického na optický	42
4.7.3	Optická část	42
4.7.4	Převod optického signálu na signál elektrický	42
4.7.5	Demodulace signálu	42
4.7.6	Bitová chybovost pro zapojení optické sítě s modulací QPSK	43
4.7.7	Konstelační diagramy	44
4.8	Optický systém OFDM s koherentní detekcí	44
4.8.1	Modulace signálu	45
4.8.2	Převod signálu z elektrického na optický	46
4.8.3	Optická část	46
4.8.4	Převod optického signálu na signál elektrický	47
4.8.5	Demodulace signálu	47

4.8.6	Bitová chybovost pro zapojení optické sítě OFDM s koherentní detekcí	48
4.8.7	Konstelační diagramy	49
5	Vyhodnocení simulací	51
5.1	Modulační formáty	51
5.2	Testované parametry	51
5.3	Zhodnocení	51
6	Animace Flash	53
6.1	Popsání softwarového nástroje Macromedia Flash 8	53
6.2	Grafické rozhraní	53
6.3	Vytváření animací	53
7	Závěr	55
8	Seznam použité literatury	56
9	Seznam obrázků	58
10	Seznam tabulek	58
	Seznam příloh	61

1 Úvod

V dnešní době jsou stále větší požadavky na vyšší přenosovou rychlost. Přenos dat prostřednictvím optického vlákna se jeví v budoucnu jako nejvhodnější volba, jelikož poskytuje daleko větší šířku pásma než metalické popř. bezdrátové technologie. Potřeba rychlého připojení je stále větší, neboť internet se používá prakticky všude. V počítačových sítích, v mobilních telefonech a v neposlední řadě i v chytrých televizorech. Tohle všechno je poté důvod, proč koncový zákazníci mají, tak zvýšený zájem o vysokorychlostní připojení, které bude umožňovat stažení programů, multimediálních souborů v relativně krátkém čase. Pro uskutečnění rychlého připojení je nasazování a budování optických sítí, nejen na páteřních linkách, ale i v sítích nižší hierarchie. Z těchto důvodů je rovněž důležitý výběr správné typu modulace, která může poskytnout vyšší přenosovou rychlost a větší dosah. V této práci se budu zaměřovat na simulaci modulačních formátů pro koherentní detekce.

V následujících kapitolách budou popsány optické systémy, teoretické principy koherentních komunikací, jakými jsou modulačními formáty typu *ASK*, *PSK*, *FSK* a *OFDM* s přímou detekcí a koherentní detekcí, pro lepší srovnání výhod koherentních komunikací .

Čtvrtá kapitola bude obsahovat simulace modulací v softwarovém nástroji Optiwave Optisystem 11 (64 bit). V tomto programu si popíšeme detailně tvorbu modulací a demodulací s následným rozбором jednotlivých modulací.

V páté kapitole budou porovnány simulace, která je nejlepší. Měření proběhne v softwarovém nástroji Optiwave Optisystem 11 (64 bit).

V šesté kapitole bude popsáno vývojové prostředí Macromedia Flash, které bude sloužit k vytvoření animace. Animace budou sloužit jako podpůrný materiál k výuce pro studenty a lepšímu pochopení dané problematiky.

K této bakalářské práci je přiloženo jedno CD, na kterém jsou uloženy jednotlivé modulace vytvořené v programu Optiwave 11, rovněž animace modulací a bakalářská práce.

2 Koherentní optické komunikace

Optické koherentní systémy jsou systémy, v nichž užitečný signál moduluje amplitudu, fázi nebo kmitočet koherentní optické nosné.

U koherentních systémů se v přijímači provádí heterodynní nebo homodynní detekce optického signálu pomocí jeho sečtení se signálem z místního optického oscilátoru. Heterodynní detekce může mít rozdílné frekvence optického signálu a signálu z lokálního oscilátoru, homodynní detekce musí použít stejné frekvence obou signálů. Vznikne elektrický mezifrekvenční signál v kmitočtovém pásmu od 0 Hz (homodynní detekce) přibližně do 10 GHz (heterodynní detekce). Tento signál je poté demodulován synchronní nebo asynchronní demodulací.

Koherentní přenos optických signálů lze využít v jednobanových i mnohobanových spojích. V případě jednobanových spojů je dosaženo velkého dosahu, mnohobanové spoje zvýší počet optických nosných, které mohou přenášet užitečné signály. [16]

Přednosti koherentních komunikací jsou tyto: signál přijatý z koherentního optického přijímače je dostupný v elektrické a optické oblasti. Dále přijímač je citlivější o 5 - 20dB. Frekvenční rozsah je 1-10 GHz. Koherentní komunikace dovolují ekvalizaci pásma v mezifrekvenci - dále jen *IF* (Intermediate Frequency). V neposlední řadě pak digitální signálový procesor - dále jen *DSP* (Digital Signal Processing), který umožňuje úpravy vzorků s vysokou frekvencí.

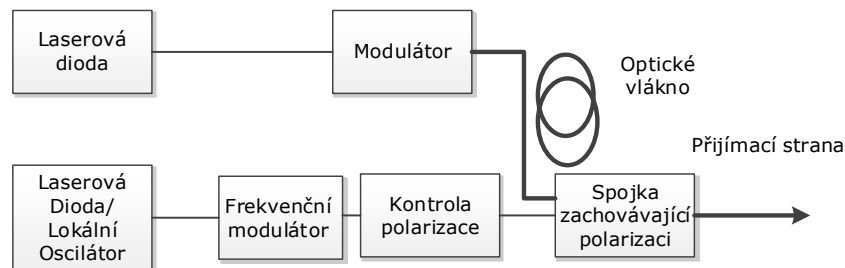
Nedostatky koherentních komunikací jsou pak tyto: koherentní detekce detekují pouze jednu polarizaci. Koherentní přijímače mají rozsah detekovatelného pásma pouze pár GHz. Koherentní detekce je elektronicky mnohem komplikovanější. A mezi nedostatky také patří, že proces koherentní detekce je citlivý na amplitudu, frekvenci a fázi příchozích optických signálů.

2.1 Princip koherentních komunikací

V koherentních systémech je důležité „vnoření“ amplitudy, frekvence nebo fáze modulačního formátu do optického paprsku. Na straně přijímače se po přenosu optický koherentní signál sčítá s optickým paprskem. Paprsek je generovaný z místního laseru nebo lokálního oscilátoru dále jen LO (Local Oscillator), sečtené optické paprsky pak dopadají na fotodiody. V homodynním detekčním systému je signál a frekvence lokálního oscilátoru stejná. Výsledný signál je přeložen do základního pásma. U heterodynní detekce jsou signály různé. Vysílač v koherentních systémech provádí modulace a skládá se z laseru s úzkou šířkou spektrální čáry. Kontinuální zdroj laserového záření, dále jen KZLZ (Continuous Wave) generuje optické nosné. Přijímače se používají pro detekce optického signálu a převod na elektrický signál. Modulační formáty používané v koherentních systémech jsou klíčování amplitudy, dále jen ASK (Amplitude Shift Keying), klíčování fáze, dále jen PSK (Phase Shift Keying) a klíčování frekvence dále jen FSK (Frequency Shift Keying).

Na přijímači jsou příchozí optické paprsky spojeny optickým děličem zachovávajícím polarizaci, dále jen PM coupler (Polarization Maintaining coupler). Spojené signály jsou přímo detekovány fotodiodou. Heterodynní detekce využívá standardního elektronického demodulátoru.

Koherentní detekce vznikne sečtením dvou koherentních vln nebo optickou nosnou, jedna z nich je nosná informace a druhá je lokální oscilátor s průměrnou energií o mnohokrát větší než signálovou energií. Demodulace obnoví základní signál z elektrického signálu.



Obrázek 2.1 Schéma standardního koherentního systému

Na obrázku 2.1 je ukázka běžného koherentního komunikačního systému. Laserová dioda/lokální oscilátor používá paprsek velmi úzké spektrální šíře. Dioda obsahuje kaskádovitý optický izolátor s externím modulátorem. Modulátory se používají pro optické vysílání. Spojka zachovávající polarizaci ve vlákně. Polarizační kontrolér je optické zařízení, které umožňuje měnit polarizační stav světla.

2.2 Detekční metody

Existují dvě detekční metody pro demodulování a obnovení dat v přijímači: metoda koherentní detekce, dále jen KD (Coherent Detection) a metoda přímé detekce, dále jen PD (Direct Detection). Koherentní detekce využívá lokální oscilátor a laser velmi úzké šířky, který slouží pro sečtení signálů koherentních vln generujících mezifrekvenční signál nebo signál v základním pásmu při zachování stavu modulační fáze. Přímá detekce používá Mach-Zehnderový zpožďovací interferometr, dále jen MZDI (Mach Zehnder Delay Interferometer) nebo také (2x4) 90° hybridní spojky. Dekódování v případě využití přímé metody detekce je dokončeno v optické oblasti, podobně je tomu ve vlastní-homodynní koherentní detekci.

2.2.1 Koherentní detekce

V koherentním přijímači se používá lokální oscilátor k sečtení signálu s příchozím signálem koherentní vlny při demodulaci. Diferenční detekce je dokončena v elektrické oblasti a je zachována fáze. Tím je dosaženo efektivního elektrického vyrovnání v koherentním detektoru. Dle hodnoty mezifrekvence jsou definovány tři koherentní metody koherentních přijímačů:

2.2.1.1 Heterodynní přijímač

Heterodynní detekce se často také nazývá koherentní detekce. Heterodynní detekce používá vstupní signál a lokální oscilátor, které se sčítají. Sečtení se provádí v oblasti s nízkou propustností. Při synchronní demodulaci může být synchronizace fáze dokončena v elektrické oblasti. Platí pro ni vzorec (2.1).

$$f_n = f_s - f_{LO} \neq 0 > B_{opt} \text{ [Hz]} \quad (2.1)$$

B_{opt} je index pro optickou šířku přijatého signálu, f_s frekvence nosné a f_{LO} označuje frekvenci LO

2.2.1.2 Homodynní přijímač

Homodynní detekce je druh heterodynní detekce. V homodynním přijímači je mezifrekvence sečtena v elektrické doméně synchronní nebo asynchronní metodou. Frekvence lokálního oscilátoru je rovna frekvenci signálu. Homodynní detekce je citlivá na fázi, protože úroveň úroveň heterodynního

signálu závisí na fázi signálu z místního oscilátoru. Homodynní přijímač provádí synchronizaci nosné v optické oblasti prostřednictvím optického fázového závěsu, dále jen OFZ (Optical Phase Locked Loop). Jestliže je synchronizace nosné neúspěšná, dojde k automatickému snížení výkonu přijímače.

Pokud se frekvence nosné (f_s) a frekvence LO (f_{LO}) rovnají, potom se jedná o homodynní přijímač viz. rovnice (2.2).

$$(f_n)f_{IF} = f_s - f_{LO} = 0 [\text{Hz}] \quad (2.2)$$

f_{IF} frekvence mezifrekvence, ostatní indexy jsou popsány u rovnice (2.1).

2.2.1.3 Intradynový přijímač

Intradynový přijímač zpracovává užší pásmo. Synchronizaci fáze je dokončena v digitální oblasti. Nevýhodou tohoto přijímače jsou vyšší nároky na čáry laseru. Přijímač musí splňovat podmínky dle vzorce (2.3).

$$f_{IF} = f_s - f_{LO} \neq 0 < B_{opt} [\text{Hz}] \quad (2.3)$$

indexy jsou vysvětleny u rovnice (2.1).

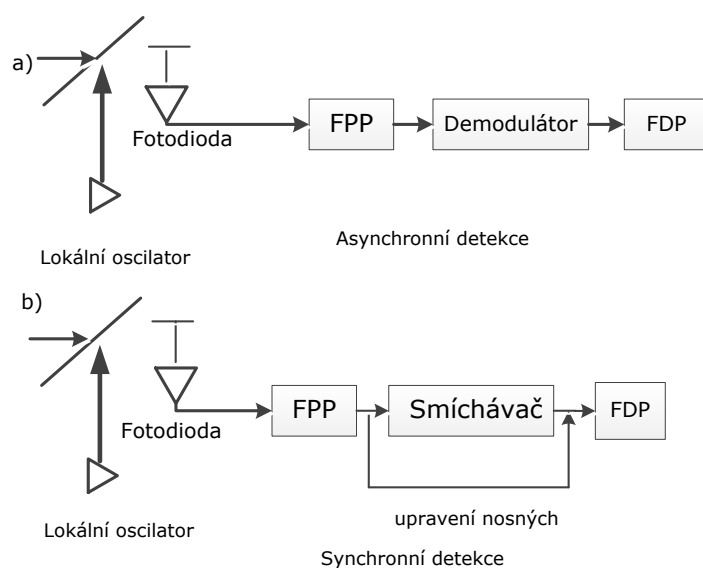
2.2.2 Optická heterodynní detekce

Frekvence lokálního oscilátoru může být vyšší nebo nižší než frekvence nosné. Nosná se poté sečte s informační nosnou, která umožňuje převod informačního signálu do horního nebo dolního převodního režimu s rozsahem mezifrekvence. Při konvertování dolů je elektrická nosná a obálka signálu přijata fotodetektořem. Koherentní vlna je převedena fotodiodou do současného elektrického signálu, který je upraven elektrickým filtrem s pásmovou propustí, dále jen FPP (Band Pass Filter) a potom demodulována demodulátorem. Filtr pásmové propusti je zařízení, které propouští frekvence z určitého rozsahu a kmitočty, jež jsou vyšší než pásmo propusti jsou potlačeny. Asynchronní detekce je, když se používá detektor obálky a synchronní detekce je tehdy, jestliže je nosná obnovena při převodu dolů a poté se sečte se signálem mezifrekvence. Detekce je provedena v elektrické oblasti a s rozsahem mezifrekvence. Je potřeba hlídat stabilitu frekvenčních mezer mezi signálem nosné a signálem lokálního oscilátoru, aby byla zajištěna optimální detekce. Výsledkem sečtení těchto kmitočtů může být nosná mezifrekvence v elektrické oblasti před mísícím procesem nebo detekce obálky pro obnovu signálu. Základní konfigurace je ukázána na obr. 2.2. Pro optimální detekci je rozhodující polarizační zarovnání polí. Elektrické pole optických signálů a lokálního oscilátoru může být vyjádřeno podle vzorce (2.4).

$$E_s(t) = \sqrt{2P_s(t)} \cos\{\omega_s t + \varphi_s + \varphi(t)\} \quad (2.4)$$

$$E_{LO} \sqrt{2P_{LO}} \cos\{\omega_{LO} t + \varphi_{LO}\} \quad (2.5)$$

$P_s(t)$ a $P_{LO}(t)$ jsou okamžitý výkon signálu, průměrný výkon signálu a lokálního oscilátoru respektive, $\omega_s(t)$ a ω_{LO} jsou signály a lokální oscilátor - signál úhlové frekvence, $\varphi_s(t)$ a φ_{LO} jsou fáze (včetně všech fázových šumů signálu a lokální oscilátor), $\varphi(t)$ označuje modulační fázi.



Obrázek 2.2 Schéma optické heterodynní detekce (a) asynchronní, (b) synchronní detekce

V obr. 2.2 představují zkratky FDP - filtr dolní propusti (Low Pass Filter) a FPP – filtr pásmové propusti.

Ideální zarovnání dvou polí fotodetekčního proudu je vyjádřeno ve vzorci (2.6).

$$i(t) = \frac{\eta q}{h\nu} \left[P_s + P_{LO} + 2\sqrt{P_s P_{LO}} \cos\{(\omega_s - \omega_{LO})t + \varphi_s - \varphi_{LO} + \varphi_t\} \right] \quad (2.6)$$

Vyšší frekvence je eliminována odpovědí fotodetektoru, η - označuje kvantovou účinnost, q symbolizuje elektronický náboj, h index Planckovy konstanty a ν značí optickou frekvenci.

Výkon lokálního oscilátoru převládá výstřelovému šumu a zároveň zvyšuje úroveň signálu zvýšením odstupu signálu od šumu, dále jen SNR (Signal to Noise Ratio). Během oscilační doby musí výstřelový šum překonat produkt mezi lokálním oscilátorem. Tato doba je úměrná signálu s amplitudou a je rovna odmocnině z produktu síly místního oscilátoru a signálu.

$$\begin{aligned} S &= 2\mathfrak{R}^2 P_s P_{LO} \\ N_s &= 2q\mathfrak{R}(P_s + P_{LO})B \\ \mathfrak{R} &= \frac{\eta q}{h\nu} = \text{responsivita} \end{aligned} \quad (2.7)$$

S označuje výkon elektronického signálu, N_s je index pro výstřelový šum, B je rovno hodnotě 3 dB a představuje označení šířku pásma přijímače. Poměr optického SNR je dán podle vzorce (2.8).

$$OSNR = \frac{2\mathfrak{R}^2 P_s P_{LO}}{2q\mathfrak{R}(P_s P_{LO})B + N_{eq}} \quad (2.8)$$

N_{eq} udává celkový počet elektrického šumu ekvivalentního výkonu ze vstupu do elektronického předzesilovače přijímače. Z tohoto vzorce vyplývá, že výkon lokálního oscilátoru je významně zvýšen, pak výstřelový šum ovládá ekvivalentní šum. Jestliže dojde k významnému zvýšení odstupu

signálu od šumu, citlivost koherentního přijímače může být omezena kvantovým šumem ve fotodetekčním procesu. Pro množství menší než limit $OSNR_{QL}$ platí vzorec (2.9).

$$OSNR_{QL} = \frac{\Re P_S}{qB} \quad (2.9)$$

2.2.3 Optická homodynní detekce

Optická homodynní detekce vyžaduje vhodnou fázi mezi signálem nosné a signálem LO . Schéma optické homodynní detekce je na obr. (2.4). Vhodná fáze je definována vzorcem (2.10).

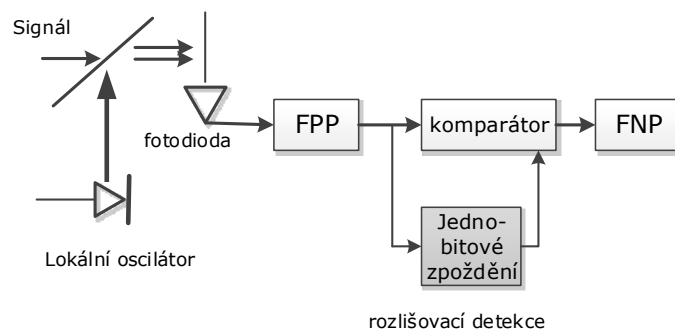
$$r(t) = 2\sqrt{P_S P_{LO}} \cos[\pi A_k s(t)] \quad (2.10)$$

Kde $s(t)$ označuje index pro modulační křivku, A_k představuje bit "1" nebo "0", to je ekvivalentní signálu v základním pásmu. Poměr chybně přijatých bitů k celkovému počtu přijatých bitů, dále jen BER (Bit Error Ratio), udává maximální limit signálu základního pásma. Kvadratický šum převládá výstřelovému šumu kvantového lokálního oscilátoru a kvadratický šum proudu je vyjádřen podle vzorce (2.11).

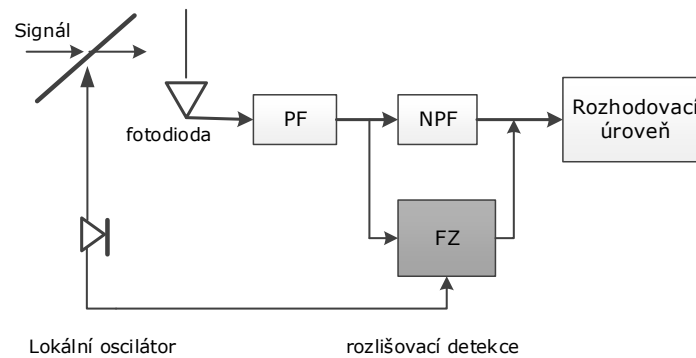
$$i_{N-sh}^2 = 2q\Re(P_S + P_{LO}) \int_0^\infty |H(j\omega)|^2 d\omega \quad (2.11)$$

$H(j\omega)$ je přenosová funkce přijímačového systému, obvykle transimpedanční elektrický předzesilovače s vhodným filtrem. Výkon LO je mnohem větší než signál, proto je použita integrace přes dB šířku pásma přenosové funkce. Proud lze poté aproximovat podle vzorce (2.12).

$$i_{N-sh}^2 = 2q\Re P_{LO} B \quad (2.12)$$



Obrázek 2.3 Optická heterodynní detekce pro PSK, FNP představuje označení pro filtr s nízkou propustí, FPP je index pro filtr pásmové propusti



Obrázek 2.4 Optická homodynní detekce, FZ – fázový závěs, ostatní zkratky jsou vysvětleny v předchozím obr. 2.3

Odstup signálu od šumu se určuje podle vzorce (2.13):

$$SNR \equiv \delta \approx \frac{2\mathfrak{R}P_s}{qB} \quad (2.13)$$

Bitová chybovost se určuje dle vzorce (2.14).

$$BER_{\text{homodyne}} \approx \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\delta} \quad (2.14)$$

Citlivost u homodynní detekce je o 3 dB lepší než u heterodynní detekce. Šířka detekovaného pásma u homodynní detekce je poloviční, heterodynní detekce má zdvojnásobené postranní pásmo.

2.2.4 Přímá detekce

U přímé detekce, dále jen PD (Direct Detection), je diferenční dekódování dokončeno v optické oblasti, podobně tomu je u vlastní homodynné koherentní detekce. Nevýhodou této detekční metody je, že vysílaná absolutní fáze je ztracena právě při diferenčním dekódování, avšak relativní fáze (fáze diferenčního dekódovaného signálu) zůstává v elektrické oblasti a tím umožňuje elektrickou ekvalizaci. Ekvalizace s relativní fází je mnohem náročnější a výsledky jsou mnohem horší než při absolutní fázi. Výhoda detekce přímou metodou oproti koherentní detekci je, že synchronizace lokálního laseru se signálem koherentní vlny je vynechána. Metodu přímé detekce lze implementovat dvěma způsoby buď Mach-Zehnderovým zpožďovacím interferometrem nebo (2x4) 90° hybridní spojky.

3 Modulace pro koherentní optické systémy

3.1 Koherentní systémy s klíčováním amplitudy

Synchronní detekce vyžaduje klíčování nosné a frekvenci z místního oscilátoru. Ladění frekvence probíhá v lokálním oscilátoru do doby, než je prohledána frekvenční složka signálu. V asynchronní detekci diagram obdrží aktuální vzorky, které jsou obnovovány v hodinovém signálu. Demodulovaná obálka je vyjádřena podle vzorce (3.1).

$$\begin{aligned} r(t) &= 2\Re\sqrt{P_S P_{LO}} \cos(\omega_{IF}) t + n_x \cos(\omega_{IF}) t + n_y \sin(\omega_{IF}) t, \\ \omega_{IF} &= \omega_s - \omega_{LO} \end{aligned} \quad (3.1)$$

ω_{IF} je rozdíl mezi lokálním oscilátorem a signálem nosné, n_x a n_y jsou hodnoty ortogonálních složek elektrického šumu. Hodnoty ortogonálních složek jsou náhodně vybrány, jak je ukázáno ve vzorci (3.2).

$$\begin{aligned} r(t) &= \sqrt{[2\Re P_S P_{LO} + n_x]^2 + n_y^2} \cos(\omega_{IF} t + \Phi) t \\ s \quad \Phi &= \tan^{-1} \frac{n_y}{2\Re P_S P_{LO} + n_x} \end{aligned} \quad (3.2)$$

3.1.1 Detekce obálky

Gausovým rozdělením pravděpodobnosti se řídí podmínky výkonu šumu a jsou vzájemně nezávislé s nulovou střední hodnotou a rozptylu σ . Funkce pravděpodobnosti hustoty, dále jen PDF (Probability Density Function) je zapsána dle vzorce (3.3).

$$p(n_x, n_y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(n_x^2 + n_y^2)}{2\sigma^2}} \quad (3.3)$$

S ohledem na fázi a amplitudu

$$p(\rho, \varphi) = \frac{\rho}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(\rho^2 + A^2 - 2A\rho \cos \varphi)}{2\sigma^2}} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \rho &= \sqrt{[2\Re\sqrt{P_S(t)P_{LO}} + n_x(t)]^2 + n_y^2(t)}, \\ A &= 2\Re\sqrt{P_S(t)P_{LO}} \end{aligned} \quad (3.5)$$

PDF amplitudy může být získána, jestliže obsahuje fáze amplitudy PDF v rozmezí od 0 do 2π , jak je ukázáno ve vzorci (3.6).

$$P(\rho) = \frac{\rho}{\sigma^2} e^{-\frac{(\rho^2 + A^2)}{2\sigma^2}} I_0 \left\{ \frac{A\rho}{\sigma^2} \right\} \quad (3.6)$$

I_0 je upravená Besselová funkce. Pokud je rozhodovací úroveň nastavená na určení úrovně "1" a "0", pak hodnoty bitové chybnosti můžeme určitě chybami mezi "jedničkou" a "nulou", podle vzorce (3.7).

$$BER = \frac{1}{2}P_e^1 + \frac{1}{2}P_e^0 = \frac{1}{2} \left(1 - Q(\sqrt{2\delta}, d) + e^{-\frac{d^2}{2}} \right) \quad (3.7)$$

Q je hlavní funkce a δ se určí podle vzorce (3.8).

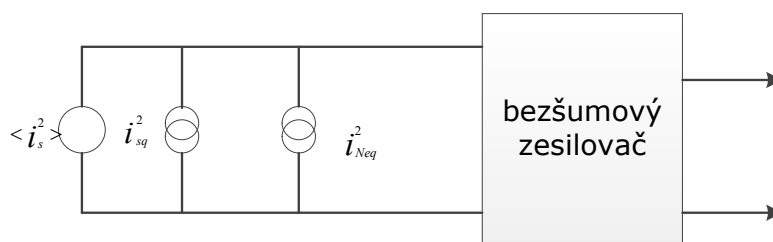
$$\delta = \frac{A^2}{2\sigma^2} = \frac{2\Re^2 P_S P_{LO}}{2q\Re(P_S + P_{LO})B + i_{N_{eq}}^2} \quad (3.8)$$

Když je výkon lokálního oscilátoru podstatně větší než výkon signálu a ekvivalentního výkonu proudového šumu, tak se odstup signálu od šumu mění podle vzorce (3.9).

$$\delta = \frac{\Re P_S}{qB} \quad (3.9)$$

BER je optimální při nastavování její diferenciace s ohledem na rozhodovací úroveň δ , přibližné hodnoty rozhodovací úrovně můžeme získat podle vzorce (3.10).

$$d_{opt} \cong \sqrt{2 + \frac{\delta}{2}} \Rightarrow BER_{ASK-e} \cong \frac{1}{2} e^{-\frac{\delta}{4}} \quad (3.10)$$



Obrázek 3.1 Současný model ekvivalentního vstupu optického přijímače

3.1.2 Synchronní detekce

ASK systém může být využit k detekování synchronní detekce, BER je dáno podle následujícího vzorce (3.11).

$$BER_{ASK-S} \cong \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \frac{\sqrt{\delta}}{2} \quad (3.11)$$

3.2 Koherentní systémy s klíčováním fáze

Modulační formát s klíčováním fáze, dále jen PSK (Phase Shift Keying) používá podobnou detekci, jako optická heterodynní detekce, až k pásmovému filtru. Schéma je na obr. (3.12). Za pásmovým filtrem je elektrický sčítavač, který se používá pro vyhledání fáze hledaného signálu. Přijatý signál se zjišťuje podle vzorce (3.12).

$$r(t) = 2\Re\sqrt{P_S P_{LO}} \cos[(\omega_{IF}) t + \varphi(t)] + n_x \cos(\omega_{IF}) t + n_y \sin(\omega_{IF}) t \quad (3.12)$$

Informace je zahrnuta v časově závislé fázi $\varphi(t)$

Fáze a frekvence oscilačního napětového regulátoru, dále jen VCC (Voltage Control Oscillator), je porovnána s přijatým signálem, který je pak zjednodušen podle vzorce (3.13).

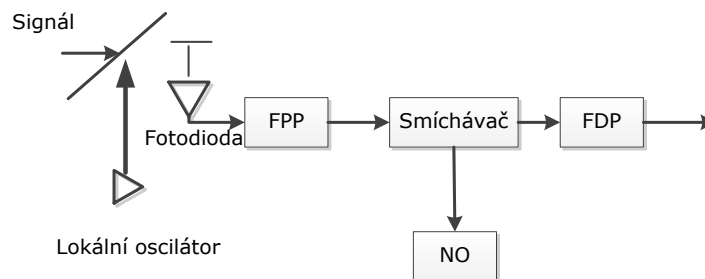
$$\begin{aligned} r(t) &= 2\Re\sqrt{P_S P_{LO}} a_n(t) + n_s \\ a_n(t) &= \pm 1 \end{aligned} \quad (3.13)$$

Podle Gaussovy statistiky je pravděpodobnost přijímaného signálu "1" dána tímto vzorcem (3.14).

$$P(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(r-u)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.14)$$

Předpokládá se, že pravděpodobnost "0" a "1" je stejná. Hodnotu bitové chybovosti BER se určuje, jako celková pravděpodobnost přijímané "1" a "0" dle vzorce (3.15).

$$BER_{PSK} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\delta) \quad (3.15)$$



Obrázek 3.2 optická heterodynní detekce pro PSK

FPP – filtr pásmové propusti, FDP – filtr dolní propusti a NO – napětový oscilátor

3.2.1 Koherentní systémy s více stavovými PSK

Koherentní systémy s klíčováním fáze se používají již velmi dlouho, avšak v dnešní době je nahrazují pokročilé modulační formáty, protože je neustále větší potřeba na efektivnější a robustnější modulační formáty, které zvládnou mnohem vyšší přenosovou rychlost. PSK je digitální modulace,

v níž se mění fáze vysílaného signálu pro přenos informací. Existuje několik metod, které mohou být použity k dosažení PSK. Nejjednodušší modulace PSK je binární PSK, které používá dva protilehlé signály fáze 0 a 180°. Digitální signál je rozdělen časově do jednotlivých bitů (binárních číslic). Stav každého bitu se určuje podle stavu předcházejícího bitu. Pokud se fáze vlny nemění, pak je signál stejný. Pokud se však fáze vlny obrátí, dochází ke změně stavu signálu (z 0 do 1, nebo z 1 do 0). Vzhledem k tomu, že existují dvě možné fáze, je BPSK často označováno jako dvoufázovou modulaci.

V současné době se používají vícestavové modulace označované jako MPSK, pokud například použijí 0, 90°, -90° a 180°, pak se jedná o kvadraturní PSK, které se označuje QPSK. PSK s více stavy se pak již označuje 8, 16, 32, 64, 128, 256 PSK.

3.2.2 Diferenční detekce

V diferenční detekci je nosná obnovena fázovým závěsem, dále jen PLL (Phase Locked Loop). Signál se detekuje vlastním homodynním procesem tak, že překoná nosnou v periodě jednoho bitu jako další po sobě jdoucí bity a tak se nazývá "diferenční detekce". Detekční proces může být upraven, jak je znázorněno na obr. 2.3., ve kterém je fáze mezifrekvence nosné jednoho bitu porovnána s další bitem a rozdíl je nahrazen pro reprezentování bitu "1" nebo "0". To vyžaduje diferenciální kódování na vysílači a další fázi pro obnovovací proces. Diferenciální PSK je diferenční dekódování, které se provádí ve fotonické oblasti přes fotonický fázovací porovnávač s MZ interferometrem zahrnující tepelné ladění optického zpoždění linky. BER lze zjistit vzorcem (3.16).

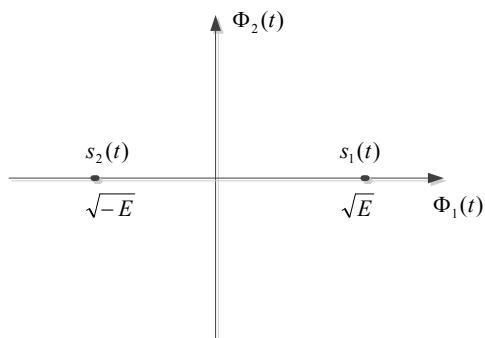
$$BER_{DPSK-e} \cong \frac{1}{2} e^{-5} \quad (3.16)$$

3.2.3 Binární PSK

Binární data jsou reprezentována dvěma signály rozdílné fáze. Typicky jsou tyto fáze 0 a π .

$$\begin{aligned} s_1(t) &= A \cos 2\pi f_c t, \quad 0 \leq t \leq T, \text{ pro } 1 \\ s_2(t) &= -A \cos 2\pi f_c t, \quad 0 \leq t \leq T, \text{ pro } 0 \end{aligned} \quad (3.17)$$

Signály se nazývají opačné. Jsou vybrány proto, že korelační koeficient je -1, což vede k minimální pravděpodobnosti chyby pro stejné E_b / N_o . Tyto signály mají stejnou nebo podobnou frekvenci a energii.



Obrázek 3.3 BPSK konstelační signál

Konstelační signál má 2 dimenze a jsou zde vidět dva body $s_1(t)$ a $s_2(t)$ na horizontální ose, E se vypočte dle vzorce (3.10), $\phi_1(t)$ a $\phi_2(t)$ se vypočte podle vzorce (3.18).

$$E = \frac{A^2 T}{2} \quad (3.18)$$

$$\phi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \cos 2\pi f_c t, \quad 0 \leq t \leq T \quad (3.19)$$

$$\phi_2(t) = -\sqrt{\frac{2}{T}} \sin 2\pi f_c t, \quad 0 \leq t \leq T$$

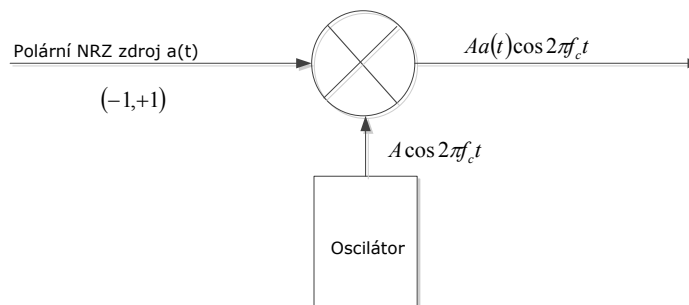
V $\phi_2(t)$ je záměrně přidáno -, aby se výrazy PSK sčítali a neodčítali. Mnoho dalších signálů, především QAM signály, jsou vyjádřeny tímto způsobem.

3.2.4 Modulátor binárního PSK

Modulátor generující signál BPSK je jednoduchý. Bipolární datový tok $a(t)$ je tvořen z binárního datového toku podle vzorce (3.12), kde $a_k \in \{+1, -1\}$, $p(t)$ je obdélníkový impuls s jednotkovou amplitudou definován na $(0, T)$. Poté se $a(t)$ vynásobí se sinusovou nosnou $A \cos 2\pi f_c t$, čímž je získán BPSK signál, viz vzorec (3.20).

$$a(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k p(t - kT) \quad (3.20)$$

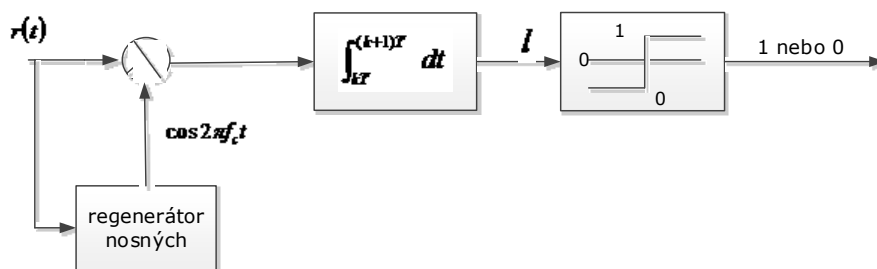
$$s(t) = Aa(t) \cos 2\pi f_c t, \quad -\infty < t < \infty \quad (3.21)$$



Obrázek 3.4 Schéma BPSK modulátoru

3.2.5 Demodulace koherentního binárního PSK signálu

Koherentní demodulátor patří do skupiny koherentních detektorů pro binární signály. Koherentní detektor může být korelátor nebo přizpůsobivý filtr. Referenční signál z korelátoru je odlišný ($s_d(t) = 2A \cos 2\pi f_c t$). Koherentní BPSK demodulátor je koherentní přijímač používající regenerátor, kde je referenční signál upraven na signál odlišný. Referenční signál musí být synchronizovaný s přijatým signálem ve frekvenci a fázi. Tento proces se provádí v regenerátoru nosných. Používá se přizpůsobivý filtr místo korelátoru, který se nedoporučuje pro pásmovou propust od filtru s $h(t) = \cos 2\pi f_c t (T - t)$, protože je náročný na implementaci.



Obrázek 3.5 Koherentní BPSK demodulátor

3.3 Koherentní systémy s kvadraturní amplitudovou modulací

3.3.1 Úvod do QAM

Kvadraturní amplitudová modulace, dále jen QAM (Quadrature Amplitude Modulation) je složená modulace, která používá klíčování amplitudy a klíčování fáze. QAM kombinuje dva amplitudově modulované (AM) signály do jednoho kanálu, čímž je zdvojnásobena efektivní šířka pásma. V QAM signálu jsou dvě nosné, každá z nich má stejnou frekvenci, ale rozdílné fáze o 90° , jedna čtvrtina cyklu, ze kterého kvadraturní vzniká). QAM je vícestavová modulace, která umožňuje přenášet n bitů pomocí m symbolů. Matematicky může být jeden signál reprezentován sinusovou vlnou a druhý cosinovou vlnou. Dvě nosné vlny jsou kombinovány ve zdroji pro přenos. V přijímači jsou pak odděleny a extrahovány z každé z nich, poté jsou spojeny do původní datové sekvence.

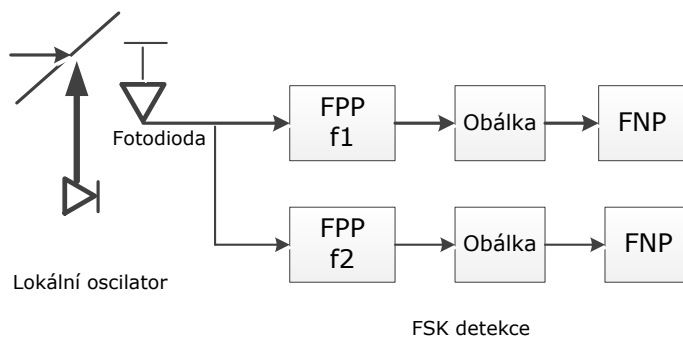
3.3.2 Výhody a nevýhody QAM

Hlavní výhodou používání vícestavové modulace je, že umožňuje šetřit šířku pásma nebo naopak se stejnou šířkou pásma zvýšit přenosovou rychlost. Značný nedostatek modulace je při více stavových typech, protože jsou méně rezistivní na rušení a také mají složitější identifikaci symbolu, proto jsou vyšší požadavky na kvalitu vysílaného i přijatého signálu a je požadován větší odstup signálu od šumu na vstupu demodulátoru. V některých případech se používají i modulace s nepravidelným konstelačním diagramem, což umožňuje lépe využít přenosové vlastnosti vysílacího řetězce a dosahovat vyššího dosahu.

3.4 Koherentní systémy s klíčováním fáze

FSK je založeno na dvou frekvenčních komponentech, které rozhodují bit "1" a "0". Obsahují čísla formátů související s FSK, které jsou závislé na tom, zda změny frekvencí reprezentujících bitů jsou kontinuální nebo nekontinuální. FSK nebo CPFSK modulační formáty:

Detekce u nekontinuálního FSK používá dvoufrekvenční diskriminátor. Pro extrakci signálu jsou použity dva filtry s úzkým pásem propusti. CPFSK, v tomto modulačním formátu je použit frekvenční diskriminátor a vyvážený přijímač pro PSK detekci. Frekvenční diskriminace je preferovaná pro srovnání s vyváženou přijímací strukturou, protože eliminuje fázový podíl lokálním oscilátorem nebo optickým zesilovačem, který by měl být použit jako předzesilovač.



Obrázek 3.6 Optická homodynní detekce pro systém FSK

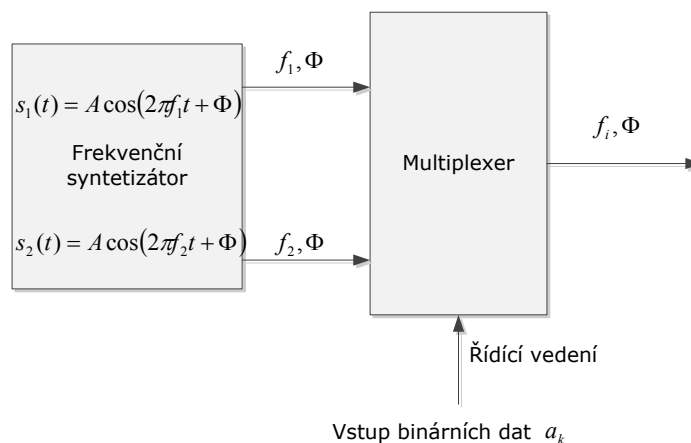
FPP – filtr pásmové propusti, FNP – filtr s nízkou propustí

3.4.1 Demodulace koherentního FSK signálu

V koherentním FSK mají dva signály stejný začátek fáze Φ v $t = 0$.

$$s_1(t) = A \cos(2\pi f_1 t + \Phi), \quad kT \leq t \leq (k+1)T, \text{ pro } 1 \tag{3.22}$$

$$s_2(t) = A \cos(2\pi f_2 t + \Phi), \quad kT \leq t \leq (k+1)T, \text{ pro } 0$$



Obrázek 3.7 koherentní FSK modulátor

Frekvenční syntetizátor generuje dva kmitočty, f_1 a f_2 , které jsou synchronizovány.

Vstup binárních dat řídí multiplexer. Časování bitů musí být synchronizováno s nosnými. Pokud je

na vstupu 1, projde přes $s_1(t)$ a pokud 0, tak přes $s_2(t)$. s_1 ani s_2 nezohledňují data na vstupu, při srovnání kteréhokoliv bitového intervalu fáze $kT \leq t \leq (k+1)T$ zjistíme, že počáteční bod času je 0 ne kT . Pro demodulaci koherentního FSK signálu se vyberou dvě frekvence tak, aby byly dva signály ortogonální. Postupuje se podle vzorce (3.23).

$$\begin{aligned}
 & \int_{kT}^{(k+1)T} s_1(t)s_2(t)dt = 0 \\
 & \int_{kT}^{(k+1)T} \cos(2\pi f_1 t + \Phi)\cos(2\pi f_2 t + \Phi)dt \quad (3.23) \\
 & = \frac{1}{2} \int_{kT}^{(k+1)T} [\cos[2\pi(f_1 + f_2)t + 2\Phi] + \cos 2\pi(f_1 - f_2)t]dt \\
 & = \frac{1}{4\pi(f_1 + f_2)} [\cos 2\Phi \sin 2\pi(f_1 + f_2)t + \sin 2\Phi \cos 2\pi(f_1 + f_2)t] \Big|_{kT}^{(k+1)T} + \frac{1}{4\pi(f_1 - f_2)} \sin 2\pi(f_1 - f_2)t \Big|_{kT}^{(k+1)T} \\
 & = 0
 \end{aligned}$$

Je potřeba, aby $2\pi(f_1 + f_2)T = 2n\pi$ a $2\pi(f_1 - f_2)T = m\pi$, kde n a m jsou celá čísla. Pokračuje se podle vzorce (3.24)

$$\begin{aligned}
 f_1 \frac{2n+m}{4T} \\
 f_2 \frac{2n-m}{4T} \quad (3.24) \\
 2\Delta f = (f_1 - f_2) = \frac{m}{2T}
 \end{aligned}$$

Tím bylo zjištěno, že pro ortogonalitu f_1 a f_2 musí být celočíselným násobkem $1/4T$ a jejich rozdíl musí být celočíselným násobkem $1/2T$. Použitím Δf můžeme tyto dvě frekvence přepsat podle tohoto vzorce (3.25)

$$\begin{aligned}
 f_1 &= f_c + \Delta f \\
 f_2 &= f_c - \Delta f \quad (3.25) \\
 f_c &= \frac{f_1 + f_2}{2} = \frac{n}{2T}
 \end{aligned}$$

Kde f_c je nominální nosná frekvence, která musí být celé číslo a násobkem $1/2T$, aby byla ortogonální.

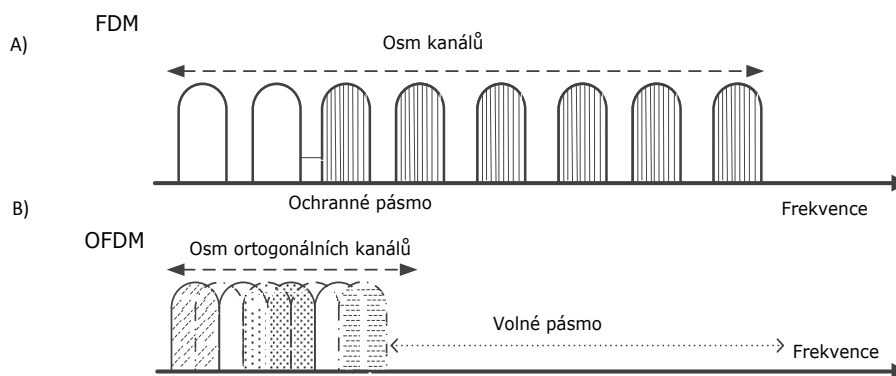
3.5 Ortogonální frekvenčně dělený multiplex

3.5.1 OFDM obecné vlastnosti

Ortogonalní frekvenčně dělený multiplex, dále jen OFDM (Orthogonal Frequency Devision Multiplex), je široce známá přenosová technologie. Obecně lze říci, že přenos dat prostřednictvím OFDM je velice odolný na rušení signálu, chromatické disperze nebo polarizační vidové disperze, je to přenosová technologie, která byla doposud použita v bezdrátových sítích a nyní se začíná používat i v optických. OFDM v oblasti optických přístupových sítí byla ovlivněna nutností zvýšení přenosové rychlosti bez navýšení šířky pásma optoelektronických vysílačů. Frekvenční dělení jednotlivých kanálů umožňují přenos mnohonásobného-nosného signálu pomocí jediného optického modulátoru. Sub-kanály jsou ortogonální a k překrývání ve frekvenci dochází tak, že vrchol každého dílčího kanálu je shodný s 0 z ostatních dílčích kanálů. Každému sub-kanálu je přiřazena sub-nosná, který je

v rozsahu povoleném pro optický kanál v rámci DWDM optické přenosové soustavy. Na rozdíl od normálního kmitočtu FDM, v nichž jsou spektra dílčích kanálů oddělena od ochranného pásma tak, aby nedocházelo k překrývání mezi nimi. V OFDM termín ortogonalita znamená, že přilehlé kanály jsou ortogonální, tj. že jsou kolmé nebo skalární součin kanálu je nulový. To umožňuje překrývání spekter sousedních kanálů, aniž by došlo k jakémukoli rušení. Je to zvláštní případ široce známého multiplexu s frekvenčním dělením, při němž jsou analogová nebo digitální data modulována do určitého počtu nosných přenesených přes podobné přenosové médium. Hlavní motivací pro použití FDM je paralelní přenos dat ve frekvenční oblasti, každý kanál zabírá jen malé frekvenční pásmo. Ke zkreslení signálu dochází při výběru přenosových kanálů a vlivem chromatické disperzce. Zkreslení však může být minimalizováno. OFDM se vyznačuje velmi vysokou spektrální účinností. Zatímco pro konvenční FDM, je spektrální účinnost omezena výběrem pásmových filtrů potřebných pro demodulaci, OFDM je navržen tak, aby jednotlivé nosné páry nosných byly kolmé. Tímto způsobem jsou vzorky mezi nosnými kmitočty rušení mimo nosnou, dále jen ICI (Inter Carrier Interference), potlačeny, ačkoli kanály se mohou překrývat spektrálně. Mezi nedostatky OFDM patří, požadavek na vysoké rozlišení převodníků analogický na digitální, dále jen ADC (Analog to Digital Converter),

a převodníky digitální na analogický, dále jen DAC (Digital to Analog Converter), na vysílači je nutný převodník nejméně s 7-8 bity, zatímco na přijímači ADC s 8 bitovým rozlišením. Kapacita ADC je omezena počtem jednotlivých nosných na OFDM kanálu. Další nedostatkem je spotřeba energie a náklady potřebné pro obnovení informace. V optických komunikacích OFDM existují dva hlavní způsoby, koherentní optické (CO)-OOFDM, který zahrnuje modulaci optického pole, má lepší výkon, ale vyžaduje více optických nebo elektronických IQ modulátorů, RF sčítačů nebo koherentních přijímačů. Druhým způsobem je přímá detekce optické, dále jen PDO (Direct Detection Optical)-OFDM, který zahrnuje modulaci optické intenzity.



Obrázek 3.8 a) schéma osmi kanálů s ochranným intervalem spektrum FDM multinosné modulace, b) schéma osmi kanálů bez ochranného intervalu, spektrum OFDM multinosné modulace

Pásmo OFDM signálu $s(t)$ lze zapsat jako:

$$s(t) = \sum_k \sum_{n=0}^{N-1} a_n(k) g_n(t - kT) \quad (3.26)$$

Kde k je index času, N je celkový počet sub-nosných, $T = NT$ je nastavení OFDM symbolu periody jako výsledek přepočtu ze sériového na paralelní s T_s , které je vzorkovací perioda. $a_n(k)$ je k ý údajový symbol n ého sub-nosného a $g_n(t)$ je datové pásmo dané pulsem.

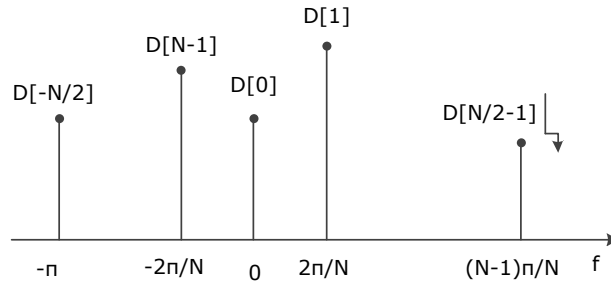
$$g_n(t) = e^{j2\pi f_n t} g(t) \quad (3.27)$$

$$f_n = f_c \pm n\Delta f \quad (3.28)$$

Obsahuje sub-nosné složky frekvenčně přeřazené ze střední nosné podle množství frekvenčních vzdáleností mezi jednotlivými sub-nosnými frekvencemi, $g(t)$ je pulsně tvarovací funkce, která je obvykle velmi blízko Gaussově rozmnožovací technice přes optický Mach Zehnderův modulátor, dále jen MZM (Mach Zehnder Modulator). Ortogonalita kanálu se určuje dle vzorce (3.29).

$$\int_{-\infty}^{\infty} f_n(t) f_m^*(t) dt = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f_n(t) f_m^*(t) dt \begin{cases} 1 & n = m \\ 0 & n \neq m \end{cases} = \mathcal{D}_0[n - m] \quad (3.29)$$

Hvězdička označuje komplexní časování. Vyžaduje výběr nosné frekvence a pulsně tvarovací funkce vhodným způsobem, aby bylo dosaženo ortogonalitu. Na obrázku je ukázán blokový diagram v diskretním časovém modelu systému OFDM pomocí N -bodové rychlé Fourierovy transformace, dále jen FFT (Fast Fourier Transform), a inverzní rychlé Fourierovy transformace, dále jen IFFT (Inversal Fast Fourier Transform). Výsledný analogový signál na výstupu D-A převodníku používá pro modulace optický modulátor. Na obrázku 3.11 je frekvenční zastoupení OFDM symbolu.



Obrázek 3.9 Re prezentování symbolů ve frekvenční oblasti OFDM

Sériový datový tok je rozdělen do N paralelních sub toků přes převodník sériové na paralelní, dále jen S/P (Serial to Paralel). Každý řádek sub kanálu je pak vynásoben jednotlivými RF nosnými, které jsou v elektrické doméně a potom jsou spojeny ke generování signálů časové oblasti pro úpravu optických koherentních vln. Signál $s(t)$ může být v časové oblasti zapsán podle vzorce (3.30).

$$s(t) = \sum_k \sum_{i=0}^N a_i[k] g_i(t - kT) \quad (3.30)$$

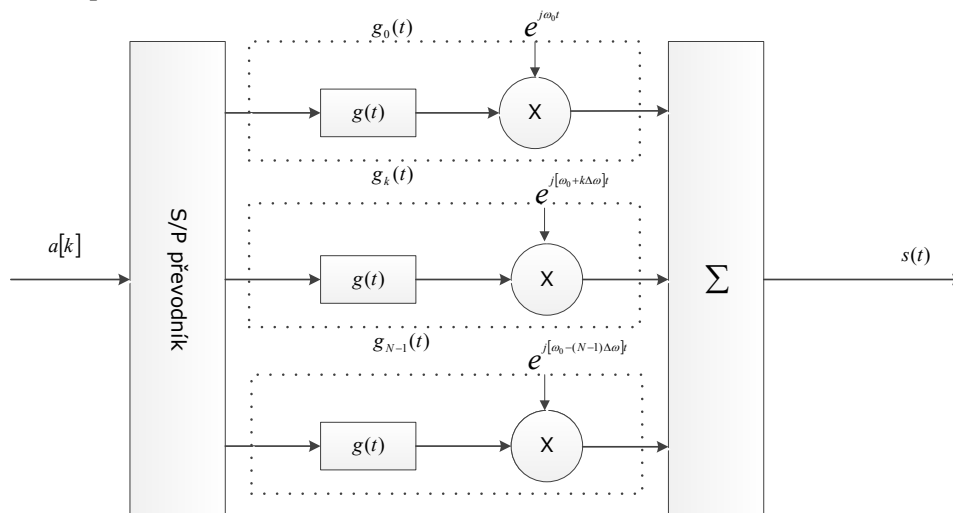
k je index času, N počet dílčích nosných, $T = NT_s$ natažení OFDM symbolů periody kvůli převodu S/P, $a_i[k]$ je k ý datový symbol sub i é nosné ($i = 0, 1, \dots, N$) a $g_i(t)$ značí puls základního pásma a je dán vzorcem (3.31).

$$g_i(t) = e^{j\omega_i t} g(t) \quad (3.31)$$

Podmínka ortogonalitu spočívá v uspokojení pulsů základního pásma a taky každá sub nosná musí být celé číslo z cyklů po období symbolu T . Počet cyklů se mezi sousedními sub nosnými liší přesně o jednu jednotku, $g(t)$ označuje funkci pro tvarování impulzu (na více harmonických základních frekvencí, která je inverzní k symbolu periody). Pulz se formuje podle sinusové funkce nebo vyvýšené cosinusové funkce. To představuje přenosovou funkci filtru, která vyžaduje průchod nulovou polohou u každého symbolu periody. Tato vlastnost je také přeložena do frekvenční oblasti a frekvence spektra jednotlivých dílčích kanálů tehdy, když ostatní spadají do nulových hodnot.

Ortogonalita a diskretní spektrum dílčích kanálů je vyřešeno diskretní Fourierovou transformací, dále jen DFT (Discrete Fourier Transform). Elektronické zpracování signálové části

může provést zařízením Tektonix s vysokou vzorkovací frekvencí. Blokové schéma diskrétního modelu pro OFDM s použitím N bodové FFT / IFFT lze vidět na obrázku 3.10.

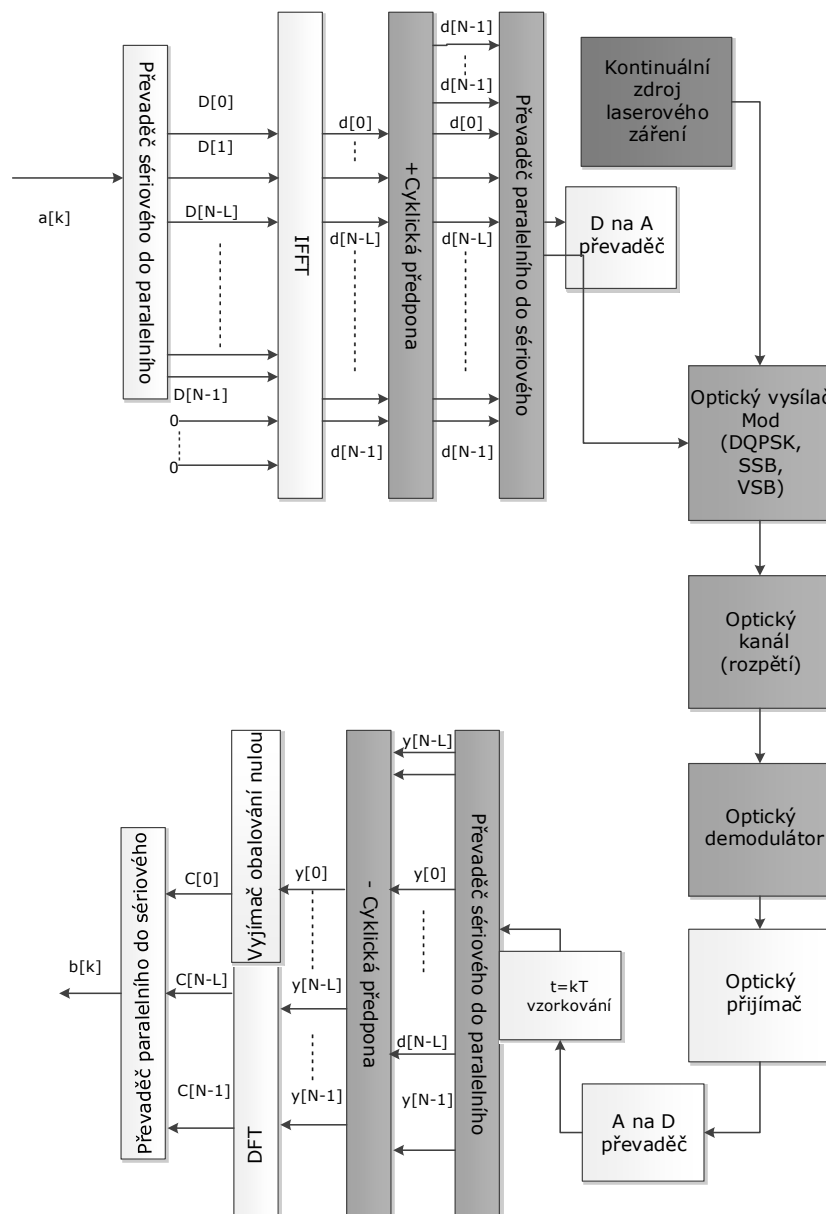


Obrázek 3.10 Schéma generování časové domény OFDM sub-nosné modulace

Sub-nosné můžou být generovány automaticky díky inverzní diskrétní Fourierovy transformaci, $g(t)$ je impuls zodpovědný za tvarovací funkci filtru.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} g_i(t)g_j^*(t)dt = \int_{-T/2}^{+T/2} g_i(t)g_j^*(t)dt = \delta_0(i-j) \quad (3.32)$$

Pro obnovení nebo demodulaci sub-nosných kanálů se používá banka filtrů nebo lokální oscilátor pro ladění nebo oddělení sub-kanálů, které je velmi náročné, zejména pokud se jedná o velký počet sub-kanálů. Hlavním podstatou FFT a IFFT je, že jejich vzorky převedené do sub-kanálů jsou kolmé a tak mohou být efektivně využity jako vysílače a přijímače OFDM systémů. OFDM diskrétní model je uveden na obrázku 3.10. Signál je definován ve frekvenční oblasti na vysílači. Odebere se vzorek digitálního signálu, který je definován tak, že diskrétní Fourierova spektra existuje pouze v diskrétních kmitočtech. Každý OFDM sub-kanál odpovídá jednomu prvku diskrétního Fourierova spektra. Velikost a fáze nosné závisí na přenesených datech. Sériový tok vstupní datové sekvence je přeměněn na paralelní, který pak lze vyjádřit jako složky kmitočtového spektra. $D[n]$ s rovnoměrně rozloženou frekvencí $f_n = 2\pi n/N$ pro $n = 0, 1, \dots, N$. Tedy $D[0]$ představuje DC složky frekvenčního spektra signálu OFDM.



Obrázek 3.11 Blokový diagram vzorků diskrétního časového modelu systému OFDM s použitím N -bodové FFT a IFFT.

N -bodový inverzní FFT blok (DSP procesor), pak generuje prefixové komponenty časové oblasti. Signál v této fázi je v analogové formě, nuly se přidávají pro cyklickou diskrétní Fourierovu transformaci. Signály jsou pak převedeny z paralelního do sériové podoby a používají se pro úpravu optickým modulátorem. V propustném pásmu jsou optické signály přenášeny přes kanál. Definice N -bodové inverzní diskrétní Fourierovy transformace je definována vzorcem (3.33).

$$d[k] = IDFT \{D[n]\} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} D[n] e^{j2\pi nk/N} \quad n, k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3.33)$$

N je symbol délky. Po formování pulsu obdélníkové funkce.

$$\text{rect}\left[\frac{k}{N}\right] = \begin{cases} 1 & \text{pro } k = 0, 1 \dots N-1 \\ 0 & \text{jinak} \end{cases} \quad (3.39)$$

Posloupnost $d[n]$ v časové oblasti je dána vztahem (3.40)

$$\begin{aligned} d[k] &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} D[n] e^{j2\pi k n / N} \text{rect}\left[\frac{k}{N}\right] \quad n, k = 0, 1 \dots N-1 \\ &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} D[n] g_n[k] \\ s \quad g_n[k] &= e^{j2\pi k n / N} \text{rect}\left[\frac{k}{N}\right] \end{aligned} \quad (3.40)$$

Základní puls pásma $g_n[k]$ je považován za ortogonální a musí splňovat podmínku dle vztahu (3.41).

$$g_n[k] = e^{j2\pi k n / N} \text{rect}\left[\frac{k}{N}\right] \quad (3.41)$$

Obdélníkový nebo sinusový tvar impulsu je vložen mezi S/P a IFFT bloky, potom jsou vynásobeny sub-nosné frekvence, následně se překrývají a poté se vynásobí koeficientem $1/N$. V přijímači po fotodetekci a elektronickém předrozdělení jsou zašumené vzorky z časové oblasti vzorků OFDM převedeny na odpovídající frekvenční symboly od N -bodu FFT. Koeficienty N -bodové DFT vycházejí ze vztahu níže (3.42).

$$\begin{aligned} C[n] &= DFT \left\{ y[k] \right\} = \sum_{k=0}^{N-1} y[k] e^{j2\pi k n / N} \quad n, k = 0, 1 \dots N-1 \\ &= \sum_{-\infty}^{+\infty} y[k] e^{j2\pi k n / N} \text{rect}\left[\frac{k}{N}\right] \end{aligned} \quad (3.42)$$

N -bodové DFT je ekvivalentní k bance s N -ortogonálními filtry. Odpovídá na signály ze základního pásma v IDFT. Vzorky jsou jedním z N symbolů. Signály porovnaného filtru jsou zapsány dle vztahu (3.43).

$$g_n^*[-k] = e^{j2\pi k n / N} \text{rect}\left[\frac{-k}{N}\right] \quad (3.43)$$

Následuje sekvence dle vztahu (3.43)

$$\begin{aligned} C[n] &= y[k] * g_n^*[-k] = y[n] * e^{j2\pi k n / N} \text{rect}\left[\frac{k}{N}\right] \quad n, k = 0, 1 \dots N-1 \\ &= \sum_{-\infty}^{+\infty} y[k] e^{j2\pi k n / N} \text{rect}\left[\frac{-(k-u)}{N}\right] \end{aligned} \quad (3.43)$$

Po odběru vzorků, kdy $k = 0$, se frekvence spektrální složky $C[n]$ mění dle vztahu (3.45)

$$C[n] = \sum_{-\infty}^{+\infty} y[u] e^{j2\pi u/N} \text{rect}\left[\frac{u}{N}\right] \quad (3.45)$$

$$s \quad u \rightarrow k \rightarrow \quad C[n] = \sum_{-\infty}^{+\infty} y[u] e^{j2\pi u/N} \text{rect}\left[\frac{k}{N}\right] = \sum_{k=0}^{N-1} y[k] e^{j2\pi k/N} \text{rect}\left[\frac{k}{N}\right] = \sum_{k=0}^{N-1} y[k] e^{j2\pi k/N}$$

DFT je $y[k]$

3.5.2 Tvarování pulzu

Každá sub-nosná by měla být ortogonální a měla by obsahovat počet cyklů po dobu symbolu T . Počet cyklů musí být celé číslo. Počet opakování mezi sousedními sub-nosnými se liší přesně o jednotky. To znamená, že kmitočty sub-nosné jsou násobky každé jiné. Tvar pulsu signálu může mít také tvar obdélníku nebo sinusové funkce, je psána podle vzorce níže (3.46).

$$g(t) = \frac{\frac{4\alpha t}{T} \left\{ \cos(1 + \alpha) \frac{\pi}{T} + \sin(1 + \alpha) \frac{\pi}{T} \right\}}{\frac{\pi}{T} \left(1 - \left[\frac{4\alpha t}{T} \right]^2 \right)} \quad (3.46)$$

α je dorovnávacím faktorem funkce kosinus. Pro puls tvaru obdélníku platí vzorec (3.47)

$$g(t) = \begin{cases} 1 & |t| \leq \frac{t}{2} \\ 0 & \text{jinak} \end{cases} \quad (3.47)$$

Ortogonalita může být dosaženo stanovením $\Delta f = 1/T$. Pro zjednodušení můžeme předpokládat, že signál bude mít stejný tvar funkce pro všechny sub-nosné kanály.

3.5.3 Frekvenční reprezentace OFDM symbolů

N udává počet bitů sériového datového toku přiváděného do jednotlivých sub-nosných kanálů z výstupu převodníku sériového na paralelní. Rovnice (4.18) znázorňuje Fourierovu transformaci.

$$s(t) = \sum_{n=0}^N a_n g_n(t - kT) = \sum_{n=0}^N a_n g(t) e^{j2\pi(f_c + n\Delta f)t} \quad (3.48)$$

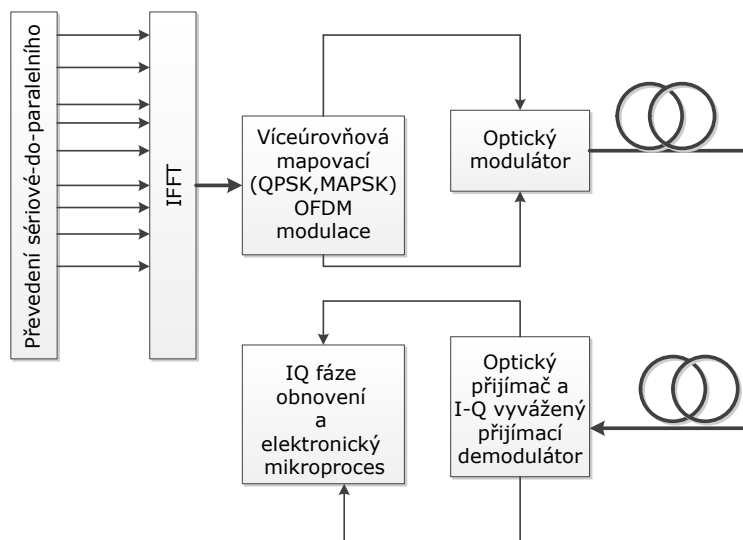
$$S(f) = \sum_{n=0}^N a_n G(f - (f_c + n\Delta f)) \quad (3.49)$$

Rovnice je součtem všech sinusových funkcí, pokud je puls obdélníkového tvaru. Spektrální sinusové funkce by měly přejít do nuly v její špičce a každé jiné. Na druhou stranu pokud je časová funkce dat

každého sub-nosného kanálu, pak frekvenční spektrum kanálu může být obdélník a můžou být oddělené, jak znázorňuje vzorec (3.50).

$$g(t) = \frac{1}{T} \operatorname{sinc}\left(\pi \frac{t}{T}\right) = \Delta f \operatorname{sinc}(\pi \Delta f t) \rightarrow G(f) = \operatorname{rect}\left(\frac{f}{\Delta f}\right) \quad (3.50)$$

$$\Delta f = 1/T$$



Obrázek 3.12 Schématický diagram optického OFDM vysílače na dlouhé vzdálenosti používající mnohonásobné modulační formáty

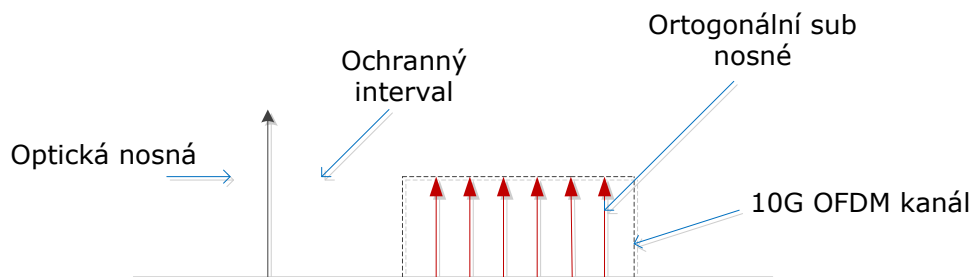
3.5.4 Forma spektra OFDM signálu

Forma spektra je dána podle vzorce (3.51). Signál je tvořen řadou odděleného obdélníkového spektra Δf . Dostupnost časových impulsů obdélníkového tvaru není zcela ideální, avšak s určitou dorovnávací funkcí cosinus ano. Při sinusovém tvaru impulsů může vzniknout bez obtíží pomocí přenosového filtru v elektrické oblasti. Spektrum OFDM signálu je tedy shrnutí z sinusového tvaru spektra všech sub-kanálů. Počet sub-přenosových kanálů je dostatečně vysoký, než by se dalo získat z plochého obdélníkového spektra. Ortogonalita sub-kanálů může být generována IFFT a FFT. Je dostupná z digitálního signálového procesoru. V systému FDM jsou sub-kanály obvykle odděleny při filtrování bankami filtrů a demodulátorů. Pro ortogonální signály mohou být sub-kanály odděleny korelátory.

$$S(f) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n \operatorname{rect}\left(\frac{f - f_c + n\Delta f}{\Delta f}\right) \quad (3.51)$$

3.6 Optická modulace OFDM

Údaje jednotlivého optického kanálu jsou vysílána na více úzkých úzko pásmových subnosných ortogonálních pásmech. Každá subnosná pracuje na nízké přenosové rychlosti. V OFDM frekvence multiplexování jednotlivých kanálů dovoluje přenos multi-nosného signálu pomocí jediného optického modulátoru. Jednotlivé kanály jsou kolmé a překrývání na frekvenci je tak, že vrchol každého sub-kanálu se shoduje s nulou na druhém dílčím kanálu.



Obrázek 3.13 OFDM přenos přes více ortogonálních sub-nosných

Ortogonalita je dosaženo obdélníkovým pulsem a nosné RF mají pevnou frekvenci sítě. Pro OFDM je signál popisován jako výstup DFFT bloku pomocí paralelních komplexních datových symbolů na vstupu. Tato vlastnost je jedním z hlavních hnacích aspektů OFDM v minulosti, protože modulace a demodulace z velkého počtu nosných je možné realizovat pomocí jednoduchého DSP místo použití mnoha LO na vysílací a přijímací části. OFDM se zdá být velmi atraktivní, protože pomalé připojení obsazené jednoho OFDM kanálu zvyšuje odolnost vůči vláknové disperzi, umožňuje přenos dat rychlostí 40 Gb.s^{-1} a přenos na stovky kilometrů bez nutnosti kompenzace disperze. Stejně jako u modulačních formátů jako DPSK z DQPSK, které byly zavedeny v posledních letech. Problém s OFDM pro optické systémové inženýry je upravit klasickou technologii na speciální vlastnosti optického kanálu a požadavky optických vysílačů a přijímačů. Optická SSB modulace může asistovat v kombinovatelnosti vláknové disperze. SSB lze dosáhnout řízením MZIM dvěma mikrovlnnými signály $\pi/2$ fázovým zdvihem mezi sebou nebo optickým filtrováním. Avšak SSB vysílač pomocí duálního ovladače a $\pi/2$ fázového zdvihu je přednostní v zájmu zachování energie obsažené v pásmu signálů. V optickém SSB lze informace o fázi zachovat po kvadratické detekci fotosnímače a koherentní detekce je omezena tím, že sníží optickou spektrální šířku pásma.

Intuitivní přístup využívá k tomu, že vlnový multiplex (WDM) techniky realizuje přenos dat po určitém počtu různých nosných. Pomocí speciálního formování signálu a výběru nosné vlny lze dosáhnout ortogonalita mezi různými vlnovými délkami kanálů tzv. ortogonální technikou WDM (OWDM). Nicméně tímto způsobem nelze využít možnost jednoduché modulace a demodulace pomocí DFT, protože tento druh digitálního zpracování signálu není k dispozici v optické oblasti.

Alternativní metodou je výroba elektrických signálů OFDM pomocí elektrického zpracování signálu, za ním následuje modulace signálu na optické nosné. Tento přístup je znám jako optické OFDM (OOFDM). Proces modulace obsahuje dvě fáze. V první fázi je elektrický signál modulován na optické nosné. Signál je v přeloženém pásmu a modulován OFDM. Druhá fáze umožňuje pro zvýšení datové propustnosti kombinaci s oOFDM WDM, přenosová rychlost končí v bytových TB.s^{-1} . Přesto oOFDM samo o sobě nabízí různé možnosti provedení. Důležitou otázkou je optická demodulace, která může být realizována prostřednictvím přímé detekce nebo koherentní detekcí zahrnující lokální laserový oscilátor. PD je vhodnější kvůli její jednoduchosti, avšak optická intenzita musí být modulována. Vzhledem k tomu, že elektrický signál OFDM je kvazi-analogový s nulovou střední

a vysokou špičkou, většina optické mohutnosti musí být zachována pro optické nosné. To znamená, že je další DC-hodnota komplexního pásma signálu, což vede k nízké citlivosti přijímače. Kromě toho je u koherentní detekce, využití šířky pásma dvakrát tak vysoká jako u PD, protože čistá míra modulace přirozeně vytváří dvojí postranní pásmo. U KD je komplexní optický I-Q modulátor složený ze dvou skutečných modulátorů souběžně s následnou superpozicí s $\pi/2$ fázovým zdvihem umožňující přenos dvakrát tolik dat ve stejné šířce pásma. Pro intenzitu modulace může být šířkou pásma zvýšena účinnost a potlačením jednoho z propuštěných postranních pásem vedoucí k oOFDM s jedním postranním pásmem přenosu. První sériová data mohou být převedena do paralelních proudů, jsou mapovány na QAM konstelační diagram v kmitočtové oblasti, pak jsou pomocí IFFT převedeny zpět do časové oblasti. Signály v časové oblasti jsou v I a Q komponentech, které jsou pak využívány v optickém IQ modulátoru. Tato optická modulace může být DQPSK nebo jakékoli jiné víceúrovňové modulace sub-systému. Na konci přenosu optického vlákna jsou I a Q složky detekovány buď přímo

detekcí, nebo koherentní detekce. Pro koherentní detekce se používá (2x4) 90° hybridní spojka vytvořená z polarizované optické oblasti místního oscilátoru a z přijatých signálů. Výstupy spojek jsou pak vkládány do vyrovnaných optických přijímačů. Sečtením místního laserového zdroje a signálů zachová fáze signálů, které jsou pak zpracovávány vysokorychlostní elektronickým digitálním procesorem. Pro PD jsou I a Q komponenty zjištěny různě a amplituda je s fázovou detekcí následně porovná a zpracuje se podobně jako v případě koherentní detekce.

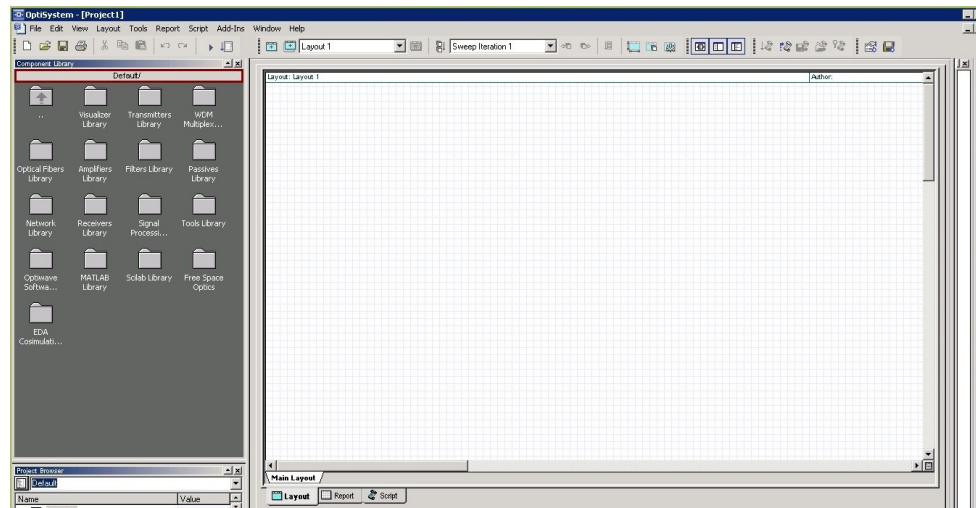
4 Praktická část

4.1 Úvod

Praktická část obsahuje návrh optické topologie s různými typy modulace v simulačním prostředí Optisystem 11 (64bit), pro praktickou část byly vybrány modulační formáty optických systémů: klíčování amplitudy, kvadraturní amplitudová modulace, kvadraturní fázové klíčování a optický systém ortogonální frekvenčně dělený multiplex s koherentní detekcí a přímou detekcí. Optické systémy s FSK se moc v praxi nepoužívají, proto nejsou zahrnuty v praktické části a místo něj byla použita kvadraturní amplitudová modulace. Především se používají optické systémy s pokročilými modulačními formáty, protože jsou robustnější a tím více jsou rezistivní proti disperzi, šumu a chybovosti. V praktické části byly simulovány jednotlivé formáty zmíněné výše, porovnával se maximální dosah. Výstupy z konstelačních diagramů byly použity pro znázornění degradace signálu, protože všechny modulační formáty, kromě ASK neumožňují zobrazení reálného diagramu oka, protože je použit binární signál generovaný pulzním generátorem.

4.2 Optisystem 11 (64 bit)

Pro praktickou část bakalářské práce byl zvolen simulační program, který vydala společnost Optiwave. Byla použita nejnovější verze Optisystem 11 (64bit), optisystem je sofistikovaný profesionální nástroj, rozhraní je příjemné a program je lehce ovladatelný. Na levé straně je umístěn panel s komponenty, které jsou uspořádány dle kategorií, uprostřed je pracovní plocha a na pravo je panel s nástroji, jako jsou přiblížení, oddálení, označení atd. Modulace se spouští modrou šipkou „play“. Pro lepší znázornění je níže vložen obrázek grafického rozhraní programu Optisystem 11 (64 bit).



Obrázek 4.1 Pohled na rozhraní Optiwave Optisystem 11 (64 bit)

4.3 Parametry trasy

4.3.1 Bitová chybovost

V reálných digitálních komunikačních systémech je rozhodnutí, v jakém časovém úseku vzorkovat a zda vzorkovaná hodnota reprezentuje hodnotu logické úrovně „1“ nebo „0“, ovlivněno šumem a rušením signálu, což vede k tomu, že je nenulová pravděpodobnost chybného rozhodnutí. Proto kvalita přijatého signálu souvisí s bitovou chybovostí, která je hlavním indikátorem kvality celkového systému. Rovnice 2 ukazuje výpočet chybovosti ze znalosti bezrozměrné hodnoty Q-faktoru. [4]

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{\exp\left(\frac{-Q^2}{2}\right)}{Q\sqrt{2\pi}} \quad (4.1)$$

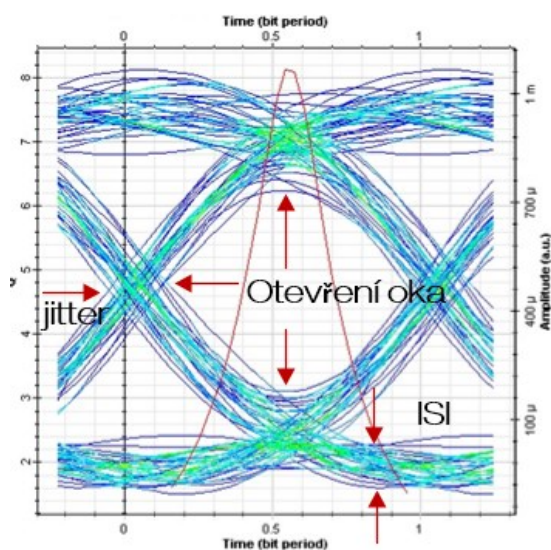
4.3.2 Q-faktor

Q-faktor vyjadřuje kvalitu analogového signálu s ohledem na jeho odstup signál-šum. Zahrnuje všechna fyzikální zhoršení působící na signál jako je šum, nelineární jevy, disperze (chromatická a polarizační). Tato zhoršení degradují signál a způsobují bitové chyby. Z toho plyne, že vyšší hodnota Q-faktoru znamená vyšší odstup signál-šum a tedy nižší bitovou chybovost. V rovnici je uveden způsob výpočtu Q-faktoru optického signálu. Kde I_1 je logická úroveň „1“, I_0 je logická úroveň „0“, σ_1 je standardní odchylka logické úrovně „1“ a σ_0 je standardní odchylka logické úrovně „0“. [4]

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (4.2)$$

4.3.3 Diagram oka

Diagram oka představuje superpozici všech navzájem překrytých bitů v signálu. Obr. Ukazuje diagram oka NRZ signálu. Na diagramu oka jsou vidět dva typy nežádoucích efektů. První je efekt mezisymbolových interferencí ISI a druhý je efekt zpoždění (jitter). ISI je způsobeno překrýváním jednotlivých modulačních impulzů. Kolísání zpoždění je definováno jako krátkodobá odchylka digitálního signálu z jeho ideální pozice. Větší otevření oka značí menší útlum nebo rušení a tedy vyšší kvalitu signálu. [4]



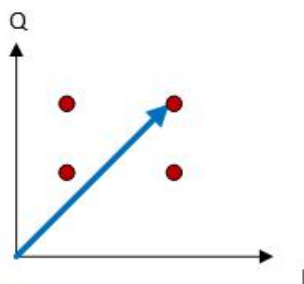
Obrázek 4.2 Diagram oka

4.3.4 Konstelační diagram

Konstelační diagram zobrazuje do roviny IQ pouze jednotlivé stavy. Tyto stavy jsou výslednicí obou modulačních složek. Z diagramu lze vyhodnotit degradaci signálu.

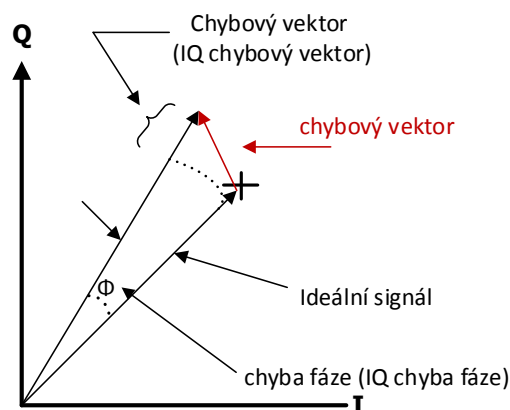
Konstelační diagram je zobrazení digitálního modulovaného signálu daného modulačního formátu. Signál je zobrazen jako dvourozměrný bodový diagram v komplexní rovině v okamžicích vzorkování symbolu. V konstelačním diagramu lze rozpoznat rušení a zkreslení signálu. Symboly jsou reprezentovány jako komplexní čísla, mohou být zobrazena jako body v komplexní rovině. Reálné a imaginární osy jsou často nazývány ve fázi, nebo I a kvadrurní nebo Q. Vykreslení několika symbolů v bodovém diagramu vytváří toto schéma. Jednotlivé zobrazené body v konstelačním diagramu jsou pojmenovány, jako konstelační body. Sady modulačních symbolů tvoří modulační abecedu.

Tím, že reprezentuje vysílaný symbol jako komplexní číslo a modulovaný nosný cosinový a sinusový signál s reálnou a imaginární částí, může být zaslán symbol se dvěma nosnými na stejné frekvenci, které jsou často označovány jako kvadrurní nosné. Koherentní detektor provádí demodulaci nosných. Tento princip použití dvou nezávislých modulovaných nosných je základem kvadrurní modulace.



Obrázek 4.3 Konstelační diagram

Chybový vektor je definován jako vzdálenost od ideální polohy symbolu k aktuální poloze přijatého symbolu. Výsledek je v dB.[6]



Obrázek 4.4 Popis amplitudy chybového vektoru

4.4 Optický systém ASK

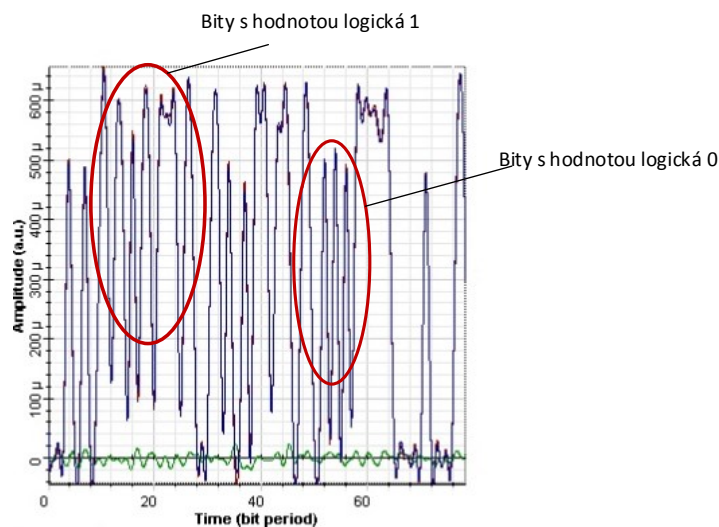
4.4.1 Modulace signálu

Trasu u této modulace zahajuje sekvenční generátor pseudonáhodných bitových sekvencí. Za ním je zvolen generátor NRZ pulzů, z kterého pokračuje trasa do elektrického amplitudového modulátoru, za ním je elektrická sčítačka, která sčítá výstup z elektrického amplitudového modulátoru a generátoru nosné.

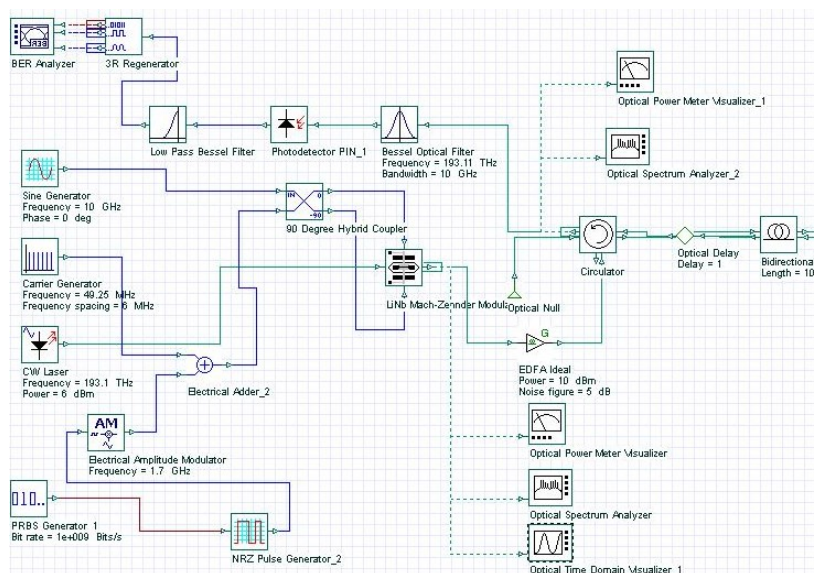
4.4.2 Převod elektrického signálu na optický signál

Poté trasa signálu pokračuje do hybridní 90° spojky. Spojka má dva vstupy a dva výstupy. Do druhého vstupu je zapojený generátor sinusového signálu. Za ním následuje Mach-Zehnderový modulátor, který má 3 vstupy a moduluje elektrický signál vzhledem k laseru. Do horního slotu je napojen jeden výstup ze spojky a do spodního druhý. Prostřední slot obsadil výstup z kontinuálního zdroje laserového záření. Z Mach-Zehnderového modulátoru již vystupuje optický signál. Dalším prvkem trasy je optický zesilovač, který je připojen do spodního slotu cirkulátoru. Do levého vstupu je připojen výstup z větve, která obsahuje BER analyzátor, 3R generátor, Besselův filtr s nízkou propustí, za nímž následuje fotodetektorová PIN dioda a optický Besselův filtr, který vstupuje do cirkulátoru. Výstupní slot na levé straně obsahuje optickou nulu. 3R generátor se skládá z více komponent. Skládá se z regenerátoru dat a pulzního NRZ generátoru. Stěžejní funkce je obnova elektrického signálu. 3R generátor generuje původní (originální) bitovou sekvenci a modulovaný elektrický signál proto, aby jej bylo možné zobrazit v BER analyzátoru. 3R generátor má 3 výstupy. První výstup je pro bitovou sekvenci, druhý je pro modulovaný NRZ signál a poslední je kopie původního signálu. Tyto tři signály jsou zapojeny do analyzáru chybovosti BER, aby se eliminovalo další spojení mezi vysílací a přijímací stanicí.

Pro lepší představu je na obrázku 4.5 znázorněn detail signálu ASK. Z obrázku lze vypořadovat změny amplitudy.

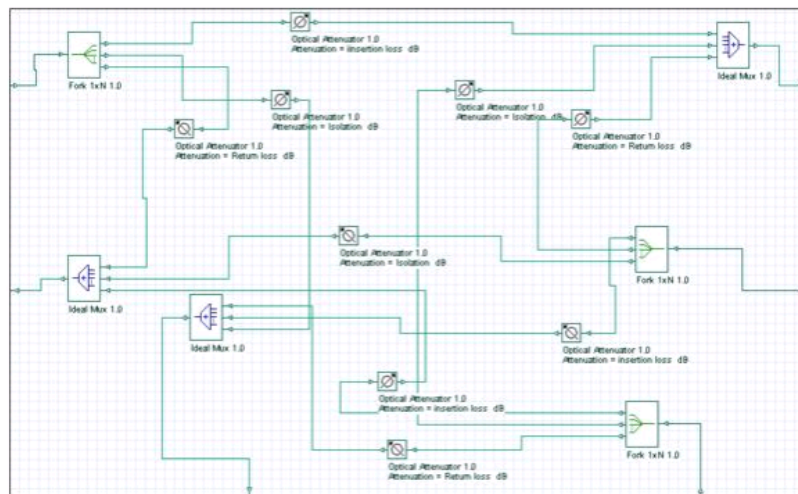


Obrázek 4.5 Detail signálu ASK pro délku trasy 35 km



Obrázek 4.6 Modulační schéma a převod elektrického signálu na optický signál pro ASK

Cirkulátor se v trase používá pro správné nasměrování signálu. Cirkulátor má tři obousměrné porty oddělené mezi sebou, za cirkulátorem pokračuje topologie do optického zpožďovače, za nímž je obousměrné optické vlákno, které následuje cirkulátor_1. Výstupní port jde zpět do prvního cirkulátoru. Směrem dolů trasa pokračuje do cirkulátoru_2. Na výstupu do dolního slotu cirkulátoru_1 je optická nula. Trasa, která vede z výstupního slotu cirkulátoru_2 pokračuje reflektivním obousměrným filtrem, z něj vede zpět výstup do optického zpožďovače a do cirkulátoru_2. Z pravé strany jsou další dva porty, opět jeden vstupní a druhý výstupní. Do vstupního portu je připojena optická nula. Cirkulátor umožňuje změřit vložné ztráty, zpětný odraz a izolaci. Cirkulátorový subsystém tvoří více komponent. Skládá se ze tří děličů, které mají tři vstupy a tři přístroje měřící zpětný odraz, tři přístroje měřící izolaci dB a tři přístroje měřící vložné ztráty. Pro lepší představení struktury cirkulátoru je vložen obrázek schéma cirkulátorového subsystému. Parametry cirkulátoru jsou nastaveny na hodnoty zpětný odraz 60 dB, izolace 60 dB a 60 dB vložné ztráty 1 dB.



Obrázek 4.7 Vnitřní schéma cirkulátoru

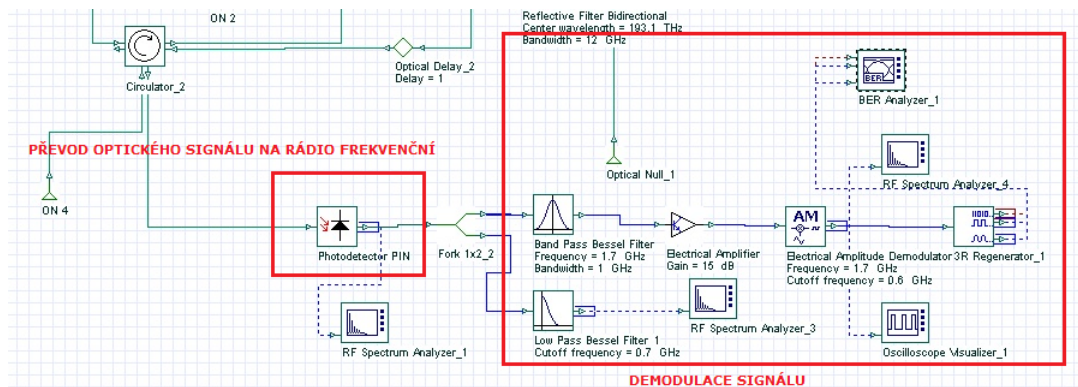
Výstupním portem trasa pokračuje do amplitudového modulátoru. Amplitudový modulátor je zařízení, do nějž vstupuje modulační elektrický signál, optická nosná a vystupuje z něj modulovaná optická nosná. Do horního slotu amplitudového modulátoru je připojen výstup z pulzního generátoru před nímž je elektrický generátor pseudonáhodné bitové sekvence. Výstup z ASK pokračuje do optického zpoždovače z něhož vede do cirkulátoru_1. Do spodního vstupního portu cirkulátoru_2 je přivedena optická nula. Výstupním slotem trasa pokračuje do fotodetektorové PIN diody. Za níž je provoz rozdělen do filtru s pásmovou propustí a do Besselového filtru s nízkou propustí. Filtr s pásmovou propustí následuje elektrický filtr, který má zisk 15 dB. Z něj vede signál do elektronického amplitudového demodulátoru. Za ním je další 3R generátor, který je připojen do BER analyzáru.

4.4.3 Optická část

V této modulaci je použito obousměrné jednovidové vlákno o délce 10 km. Vlákno pracuje na vlnové délce 1550 nm. Útlum vlákna na jeden kilometr je 0,22 dB.

4.4.4 Demodulace signálu

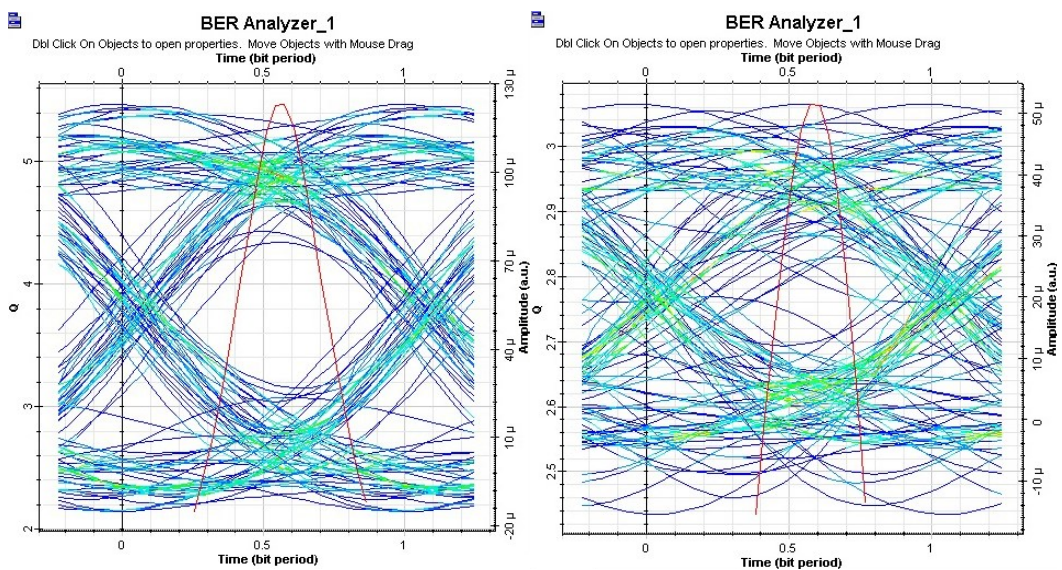
Z cirkulátoru_2 trasa pokračuje do fotodetektorové PIN diody, která převede signál z optické oblasti do elektrické. Za ní je poté děličem trasa rozvedena do filtru s nízkou propustí a filtru s pásmovou propustí. Za filtrem s pásmovou propustí je elektrický zesilovač se ziskem 15 dB, následuje jej elektrický amplitudový demodulátor.



Obrázek 4.8 Demodulace ASK

4.4.5 Bitová chybovost pro zapojení optické sítě s ASK

Na obrázcích níže jsou vidět výstupy z analyzátoru BER pro trasy 35 a 50 km s přenosovou rychlostí $1 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$. Pod diagramy oka jsou uvedeny tabulky s parametry, které byly získány z BER analyzátoru.



Obrázek 4.9 Diagramy oka pro délku trasy 35 a 50 km s modulací ASK

Níže je tabulka s hodnotami z BER analyzátoru. Pro vzdálenost přenosové trasy 35 km je Q faktor 5.46715, což je dle stupnice Q faktoru dobrý signál. Pro vzdálenost 50 km jsou již hodnoty špatné, protože úroveň Q faktoru je 3.06423, což znamená, že signál je špatně detekovatelný, pokud vůbec je detekovatelný.

Tabulka 1 parametry bitové chybovosti modulace ASK

Vzdálenost	Max. Q faktor	Min. BER	Velikost oka	Práh	Rozhodování
35 km	5.46715	2.28089e-008	4.11135e-005	5.53547e-005	0.574468
50 km	3.06423	0.00108664	7.3606e-007	1.90247e-005	0.574468

4.4.6 Shrnutí

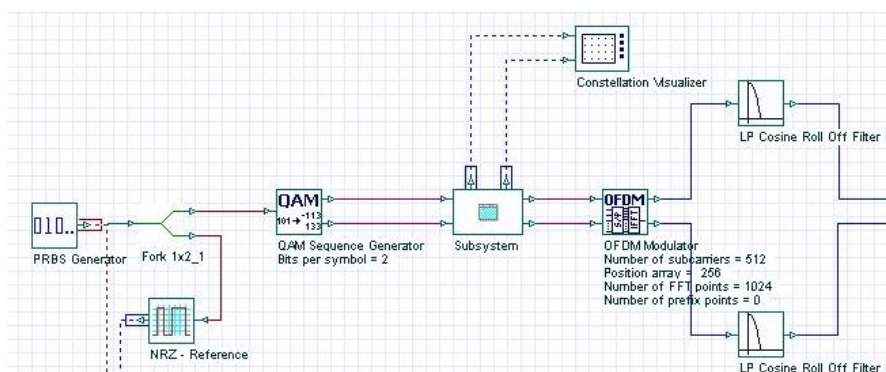
Modulace ASK se v současnosti moc nepoužívá, protože neposkytuje uspokojivé parametry, pro přenos o rychlosti $10\text{Gb}\cdot\text{s}^{-1}$ ji vůbec nelze použít, proto je nahrazena pokročilými formáty například více stavové QAM modulace, nebo QPSK, DP-QPSK.

4.5 Optický systém OFDM s přímou detekcí

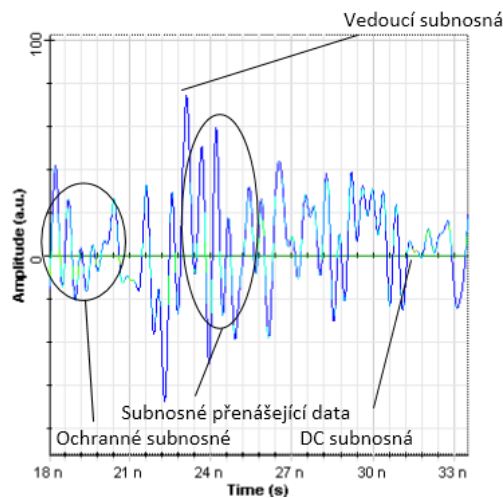
Topologie komunikačního systému ortogonální frekvenčně dělený multiplex s přímou detekcí, dále jen OFDM-PD (Direct detection Optical OFDM) se skládá z 5 bloků: OFDM vysílač, převod elektrického signálu na optický signál, optická část, převod optického signálu na elektrický signál a OFDM přijímač.

4.5.1 Modulace signálu

Na začátku topologie je sekvenční generátor pseudonáhodných bitových sekvencí, dále jen SGPBS (Pseudo Random Bit Sequence Generator), za ním je dělič, v jedné větvi vstupuje do generátoru pulzního NRZ generátoru a druhou větví trasa pokračuje k sekvenčního 4 stvového QAM generátoru, pak jde do subsystému. Subsystém se skládá ze dvou více stavových pulzních generátorů. Poté signál jde do OFDM modulátoru. Na obrázku níže je ukázána část topologie, kde je provedena modulace signálu. Za OFDM modulátorem je signál rozdvojen, na každé straně je LP cosinový Roll off filtr, který se používá pro odfiltrování vysokofrekvenční složky a minimalizaci intersymbolové interference.



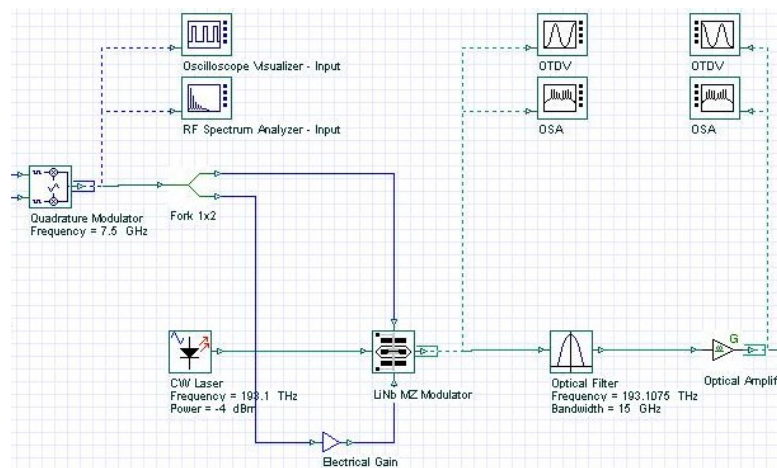
Obrázek 4.10 Modulace signálu OFDM s přímou detekcí



Obrázek 4.11 detail signálu pro modulaci OFDM s délkou trasy 35 km

4.5.2 Převod elektrického signálu na optický signál

Za filtry trasa pokračuje do kvadrurního modulátoru, ze kterého je signál rozveden děličem do Mach-Zehnderového modulátoru, který sjednotí paprsek. V jedné větvi je před vstupem do MZ elektrický zesilovač. Do třetího vstupu je zapojen kontinuální zdroj laserového záření (Continuous Wave). Trasa pokračuje vstupem do optického (Besselového) filtru, kde je signál upraven. Šířka pásma je 15 GHz a vlnová délka 1552 nm. Za ním je optický zesilovač, který je nastaven na zisk 13 dB a šum 4 dB, používá funkci random seed, tzv. náhodné semínko. Funkce se používá při inicializaci generátoru pseudonáhodných čísel.

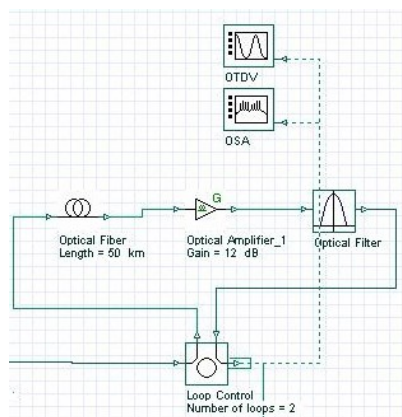


Obrázek 4.12 Převodu elektrického signálu na optický u OFDM s přímou detekcí

4.5.3 Optická část

Trasa signálu vstupuje do zařízení s kontrolou smyčky, provoz je vyveden slotem se vstupem, ze kterého pokračuje optickým vláknem, optickým zesilovačem, který má zisk 12 dB, pak je optický filtr, za ním je výstup zpět do zařízení s kontrolou smyčky, provoz je vyveden třetím výstupním

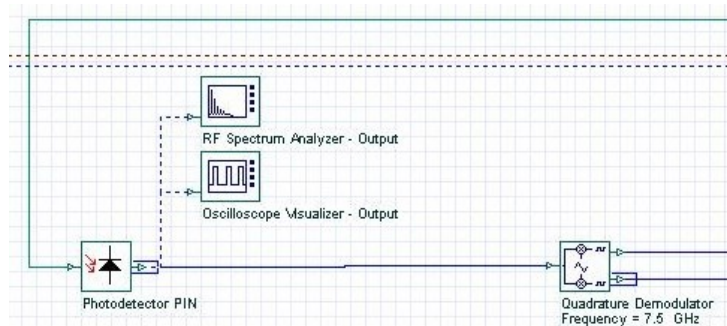
slotem. Parametry vlákna v optické části, v této modulaci je použito jedno vidové vlákno G.652D, útlum byl nastaven na hodnotu $0,2 \text{ dB.km}^{-1}$, rychlost skupinové disperze $16,75 \text{ ps.nm}^{-1}.\text{km}^{-1}$. Referenční vlnová délka 1552nm .



Obrázek 4.13 Optická část pro OFDM s přímou detekcí

4.5.4 Převod optického signálu na elektrický

Trasa vstupuje do fotodetektorové PIN diody, která detekuje signál a převádí ho z optické domény do elektrické oblasti. Za ním je signál demodulován kvadraturním demodulátorem. Hodnota frekvence je nastavena na $7,5 \text{ GHz}$.



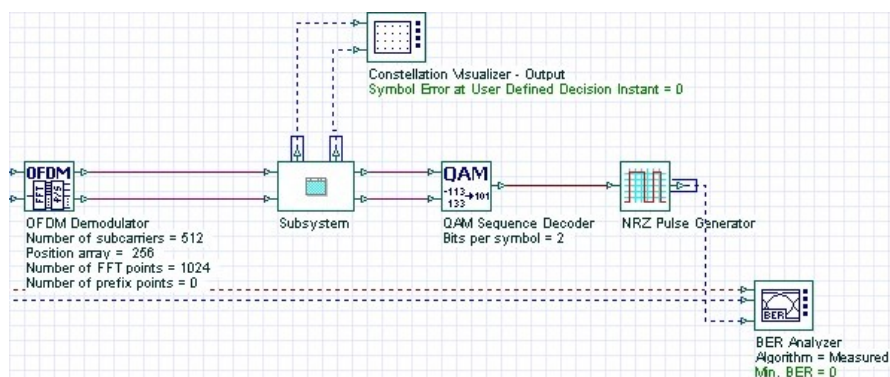
Obrázek 4.14 Převod optického signálu na elektrický signál pro OFDM s přímou detekcí

4.5.5 Demodulování signálu

Demodulovaný signál pokračuje do OFDM demodulátoru, pak pokračuje signál do subsystemu, který jak na vysílací straně obsahuje dva vícecestavové pulzní generátory, tak i na přijímací straně. Poté signál vstupuje do sekvenčního QAM dekodéru a trasa končí NRZ pulzním generátorem.

Přijatý signál obsahuje několik smíchaných produktů. Ty se dají označit za chtěné, z nichž se dají obnovit data. Komponenty vznikly smícháním postranního pásma a optické nosné. Nechtěné komponenty vznikly z nosného šumu a smíchaného šumu ze signálu, nachází se mimo pásmo. Vznikl z nosné a šumu, signálu a šumu, a pak smícháním. Když se použije úzký optický (Besselův) filtr,

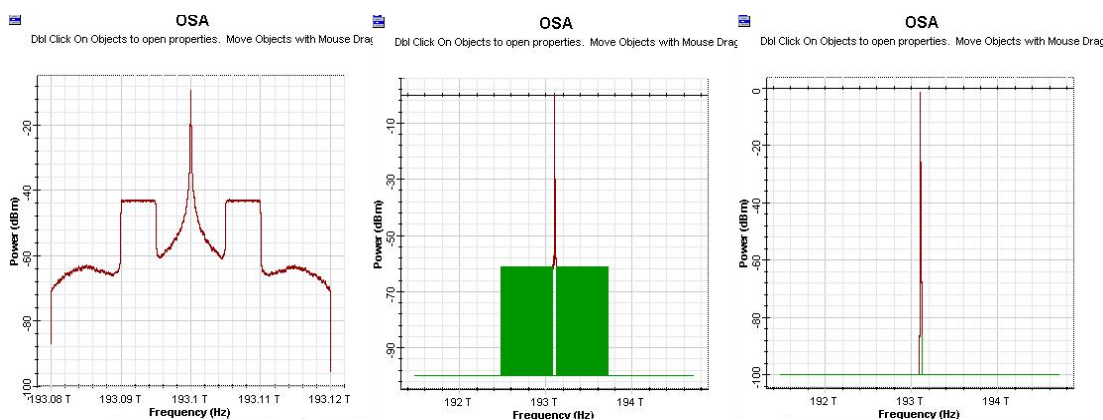
tak je detekován pouze jeden šum z postranního pásma, avšak jestli je použit širší optický filtr seče se šum z obou postranních pásem a dojde ke ztrátám 3 dB v SNR.



Obrázek 4.15 Demodulace signálu

4.5.6 Optický spektrální analyzátor

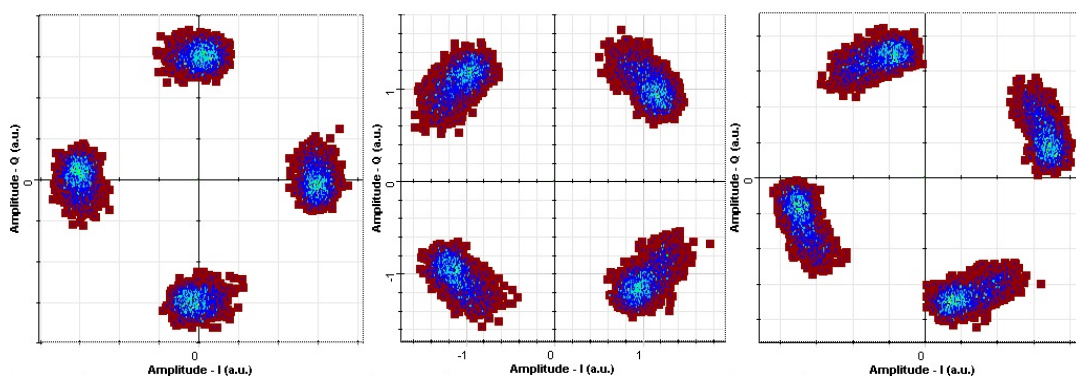
Na obrázcích níže jsou jednotlivé výstupy z optického spektrálního analyzátoru, který je v trase umístěn před optickým filtrem, za optickým filtrem a za kontrolou smyčky v optické doméně proto, aby byly zřejmé změny signálu. Optický (Besselův) filtr se používá, protože má lepší parametry tvarovacího faktoru oproti Gaussovu. Z obrázku jsou patrné jednotlivé tvarovací úpravy pulzu.



Obrázek 4.16 Srovnání výstupů z optického spektrálního analyzátoru pro OFDM s přímou detekcí

4.5.7 Konstelační diagramy

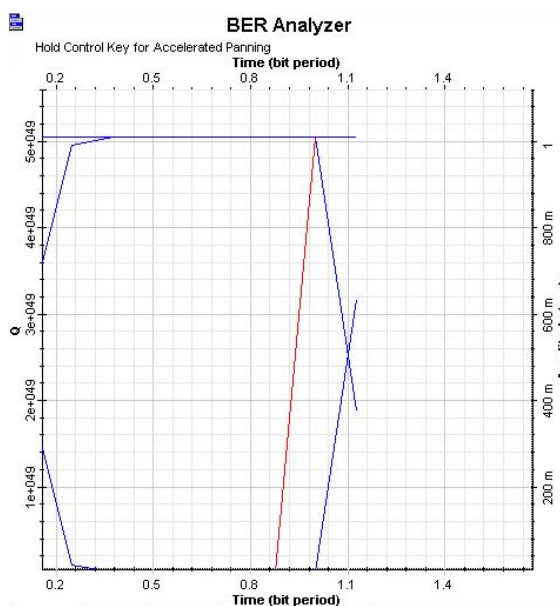
V konstelačním diagramu lze zobrazit signál, šum a šum+signál. Níže je ukázán konstelační diagram pro trasu 35km, 50km a 58 km.



Obrázek 4.17 Konstelační diagramy pro délku trasy 35km a 50 a 58km pro OFDM s přímou detekcí

4.5.8 Bitová chybovost pro zapojení optické sítě OFDM s přímou detekcí

Hodnoty z analyzátoru bitové chybovosti nám ukazují, že při vzdálenostech větších, než 58 km jsou ztráty vyšší, než je možné pro úspěšné detekování signálu a tedy fungující přenos. Na obrázku je ukázán výstup z BER analyzátoru pro trasu 50 km a rovněž jsou zahrnuty jednotlivé parametry v tabulce pod diagramem oka.



Obrázek 4.18 Diagram oka pro OFDM s přímou detekcí

Tabulka 2 parametry z BER analyzátoru pro OFDM s přímou detekcí

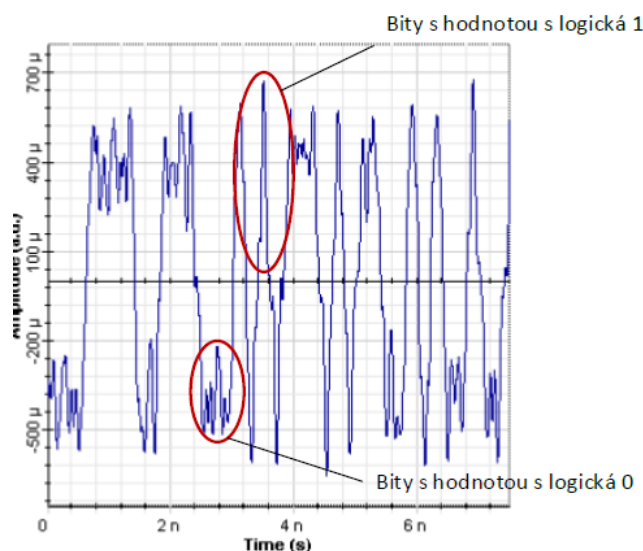
MAX. Q faktor	5.05e+049
Min. BER	0
Výška oka	1.01
Práh	3.72734e-010
Rozhodovací úroveň	0.625

4.6 Optický systém QAM

4.6.1 Modulace signálu a převod signálu na optický signál

Topologie i zde začíná sekvenčním generátorem pseudonáhodných bitových sekvencí, za ním je opět provoz rozdělen děličem, první větev vede do pulzního NRZ generátoru a druhou pokračuje přes sekvenční QAM generátor. Generátor generuje 2 bity/na symbol. Z generátoru vedou dva výstupy, které jsou připojeny na vícestavové pulzní generátory. Z nichž je provoz rozveden do děliče s dvěma větvemi. Každá větev vstupuje do elektrické sčítačky. Z elektrické sčítačky je provoz sveden do Mach-Zehnderova modulátoru a i v této modulaci jsou použity dva modulátory. Do třetího vstupu je přiveden kontinuální zdroj laserového záření. Laser vstupuje na prvním vstupu do spojky X, na druhý vstup je připojena optická nula. Ze spojky pak pokračuje trasa do modulátorů. Z MZ modulátoru vystupuje již optický signál. Za modulátory trasa pokračuje do výkonového kombinátoru. Na obrázku níže je popsána modulace signálu.

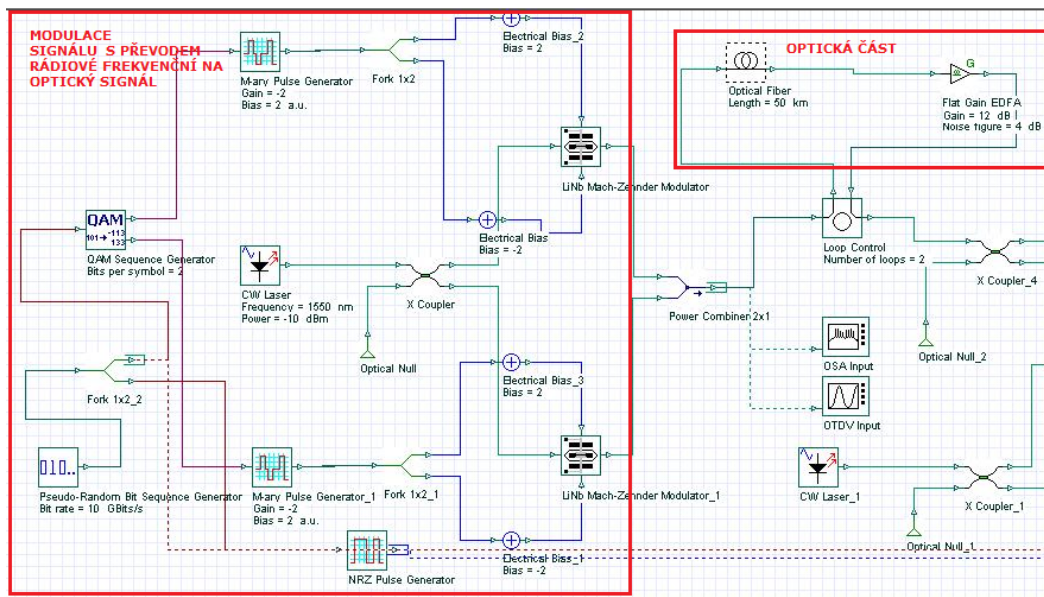
Na obrázku 4.18 je znázorněn detail signálu QAM. Lze z něj vidět změny amplitudy a fáze.



Obrázek 4.19 Detail signálu modulace QAM pro trasu 35 km

4.6.2 Optická část

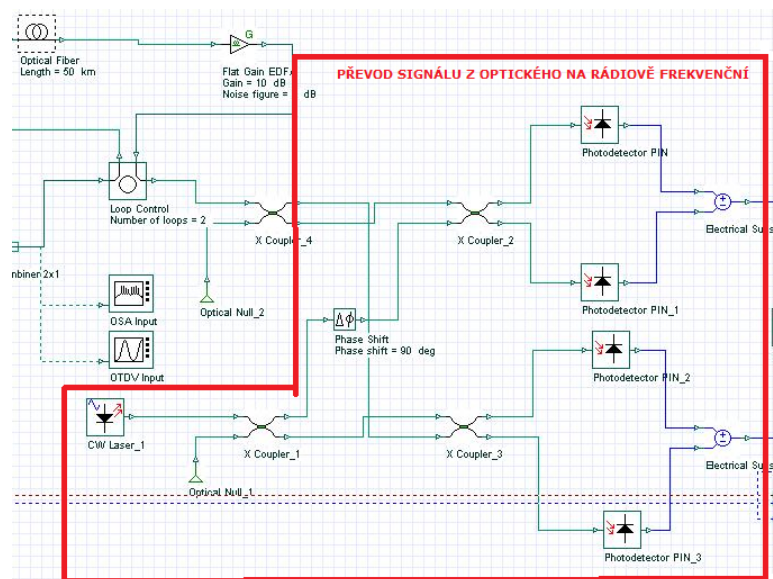
Z kombinátoru trasa pokračuje do zařízení s kontrolou smyčky, z něj provoz pokračuje prostřednictvím optického vlákna, délka vlákna je 50 km. Maximální délka vlákna, aby byl signál použitelný je 66 km. Za optickým vláknem je optický zesilovač. Zisk je nastaven na 12 dB. Trasa se vrací do zařízení s kontrolou smyčky.



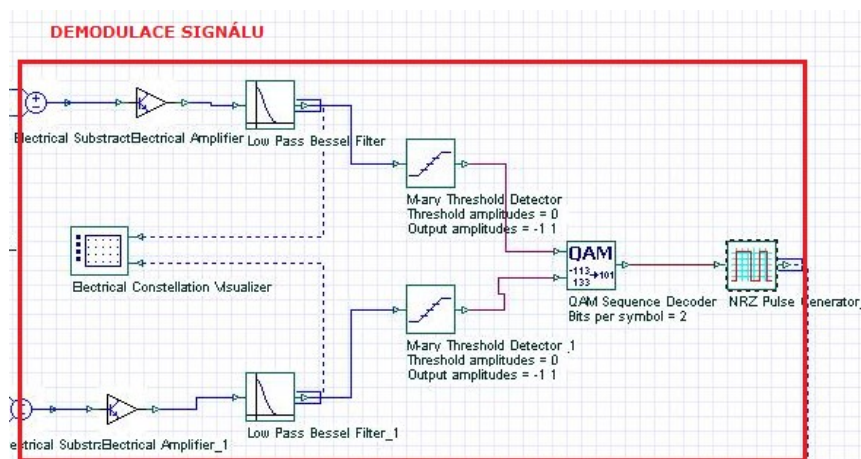
Obrázek 4.20 Modulace signálu a optická část pro QAM

4.6.3 Převod signálu na elektrický signál a demodulace signálu

Provoz pokračuje do X spojky_4 , optická nula je přivedena na druhý vstup. Ze spojky_4 je prvním výstupem vyvedena do spojky_2. Druhým výstup je přiveden na vstup spojky_3. Kontinuální zdroj laserového záření je připojen do spojky_1, na druhém vstupu je opět optická nula. Ze spojky prvním výstupem pokračuje do fázového 90° zpožďovače. Zpožďovač přidává časovou fázi/zpoždění k optickému signálu. Za zpožďovačem pak trasa pokračuje do spojky_2. Druhý výstup spojky_1 je připojen na druhý vstup spojky_3. Ze spojek 2 a 3 jsou výstupy zapojeny do fotodetektorové diody PIN. Z ní pak do elektrického odčítačky.



Obrázek 4.21 Převod signálu z optické domény do rádiové frekvenční

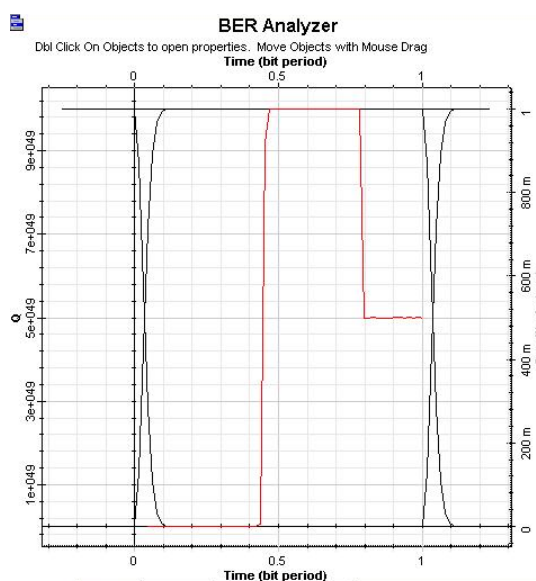


Obrázek 4.22 Demodulace signálu pro QAM modulaci

Signál je zesílen elektrickým zesilovačem. Úroveň zesílení je nastavena na 20 dB. Za každým zesilovačem je umístěn Besselův filtr s nízkou propustí. Za oběma filtry jsou umístěny víceúrovňové detektory prahových úrovní. Ve víceúrovňovém prahovém detektoru jsou vstupní více úrovňové pulzy převedeny na víceúrovňový signál. Pokud dojde ke zpoždění signálu během šíření, tak je možná kompenzace. Počet výstupních úrovní musí být větší než počet vstupních prahových úrovní. Za detektory je provoz sjednocen do QAM dekodéru a pak pulzního NRZ generátoru. Výstup generátoru je připojen k BER analyzátoru.

4.6.4 Bitová chybovost pro zapojení optické sítě s modulací QAM

Nejdelší možná trasa pro tuto modulaci je 71 km. Níže je ukázán obrázek z výstupu analyzátoru BER. Hodnoty jednotlivých parametrů z analyzátoru jsou uvedeny v tabulce pod obrázkem.



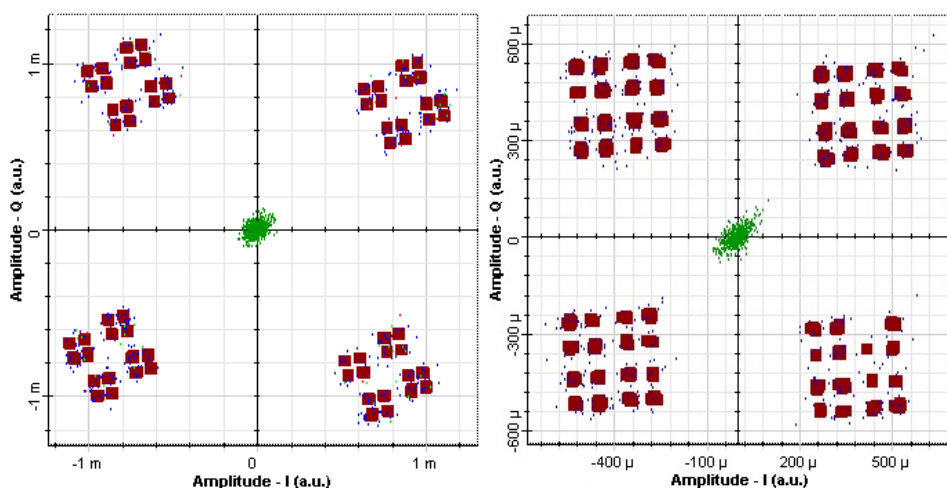
Obrázek 4.23 Diagram oka pro QAM

Tabulka 3 parametry BER pro QAM modulaci

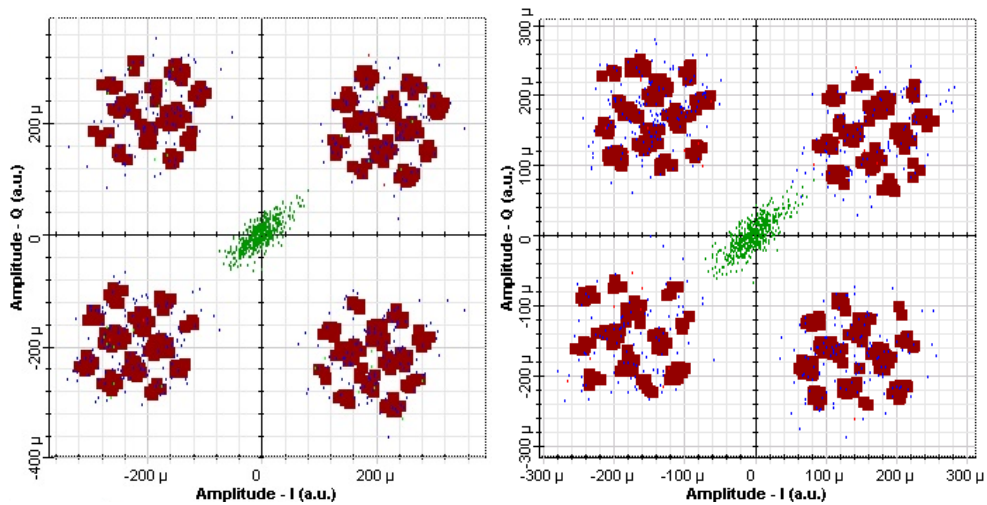
Max.Q faktor	1e+050
Min. BER	0
Výška oka	1
Práh	3.42832e-069
Rozhodovací úroveň	0.53125

4.6.5 Konstelační diagram

Na diagramech jsou zobrazeny konstelační diagramy pro délky trasy 35km, 50km, 65km a 71 km. Jednotlivé diagramy zobrazují úroveň degradace signálu a šum.



Obrázek 4.24 Konstelační diagramy pro délku trasy 35 a 50 km pro modulaci QAM

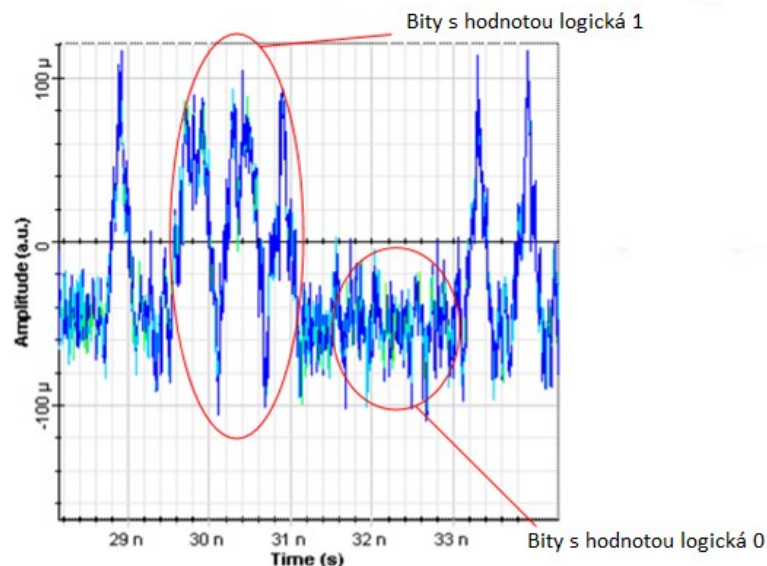


Obrázek 4.25 Konstelační diagramy pro délku trasy 65 a 71km pro modulaci QAM

4.7 Optický systém QPSK

4.7.1 Modulace signálu

Na začátku trasy je sekvenční generátor pseudonáhodných bitových sekvencí, za ním se signál rozděluje děličem do generátoru NRZ pulzního a optického QPSK vysílače, který převede elektrický signál na signál optický. Pro lepší představu je níže vložen detail signálu QPSK, kdy při přechodu z logické jedničky na logickou nulu se mění fáze.



Obrázek 4.26 Detail signálu modulace QPSK pro trasu 35 km

4.7.2 Převod signálu z elektrického na optický

Ve vysílači se uskutečňuje převod z Rádiové frekvenční složky na optický signál. Vysílač obsahuje více komponent, ačkoliv v topologii se jeví pouze jako jeden prvek. Skládá se z 2 více stavových pulzních generátorů. Výstupy z generátorů jsou rozděleny děličem, protože jsou připojeny na Mach-Zehnderovy modulátory. Modulátory mají tři vstupy. Na vrchní a spodní vstup je přiveden výstup z generátoru a na poslední vstup se přivede kontinuální zdroj laserového záření (CW laser). MZ modulátor vygeneruje nosný optický QPSK signál, který je zakódovaný. Každý modulátor moduluje nosnou do fáze I a kvadraturní složku Q.

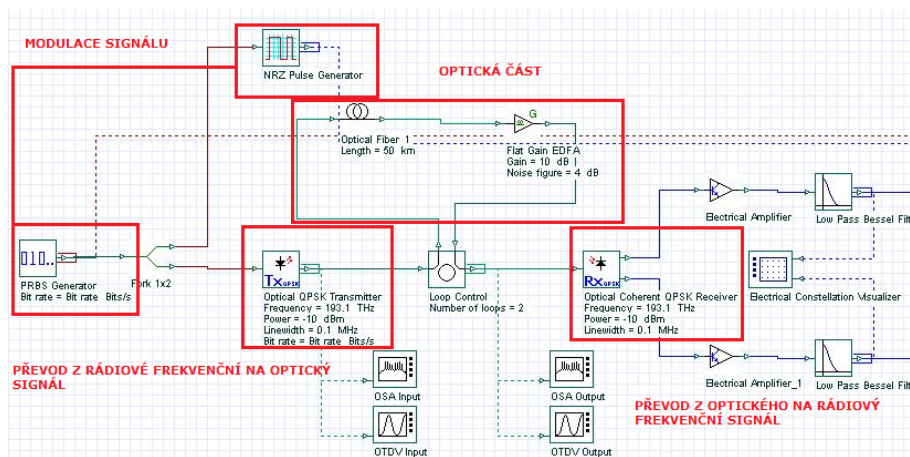
4.7.3 Optická část

Za QPSK vysílačem proběhne zařízením s kontrolou smyčky, kde jedním výstupem pokračuje přes optické vlákno, poté elektrický zesilovač, který má zisk 10 dB, z něj je přiveden na vstup do přístroje s kontrolou smyčky, třetím výstupem pokračuje trasa do optického koherentního QPSK přijímače.

4.7.4 Převod optického signálu na signál elektrický

Převod optického signálu na rádiový frekvenční signál probíhá v optickém koherentním QPSK přijímači. Optický koherentní QPSK přijímač se skládá z více komponent. QPSK přijímač se skládá z homodynního přijímače a vláknové spojky, dále lokálního oscilátoru a vyvážené detekce.

Na obrázku níže je část topologie, která byla doposud popsána. Od začátku modulace signálu, přes převod na optický signál, optická část a převod zpátky na rádiový frekvenční signál.

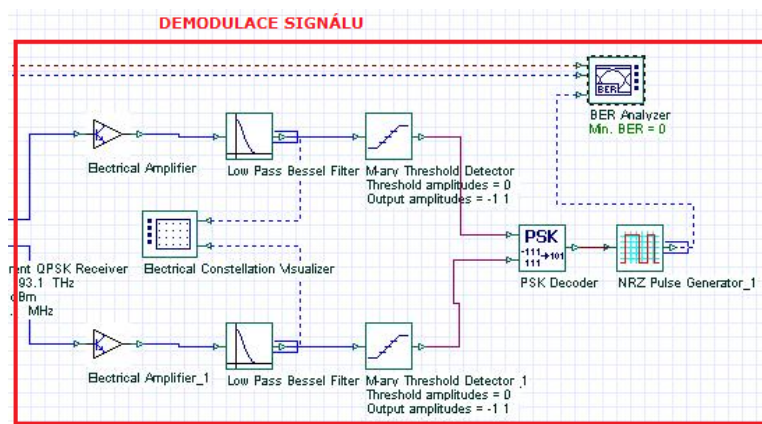


Obrázek 4.27 Schéma pro QPSK modulaci se zobrazením modulace signálu, převod z rádiové frekvenční oblasti do optické domény, optická část a převod zpět do rádiové frekvenční oblasti, tedy na elektrický signál

4.7.5 Demodulace signálu

Za přijímačem se trasa rozděluje na dvě části, na každé je elektrický zesilovač, Besselův filtr s nízkou propustí, který upraví signál a více stavový prahový detektor. Ve víceúrovňovém prahovém detektoru jsou vstupní více úrovněvé pulzy převedeny na vícestavový signál. Signál je poté sveden

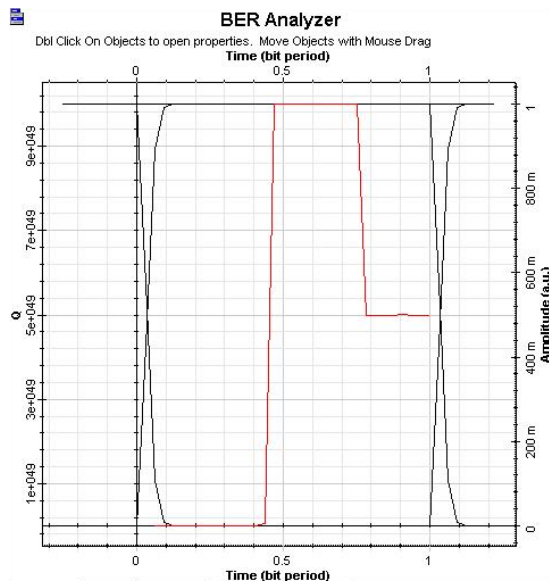
do PSK dekodéru, za kterým následuje pulzní NRZ generátor. Pak už vede pouze výstup na měřicí přístroj BER analyzér.



Obrázek 4.28 Demodulace signálu QPSK

4.7.6 Bitová chybovost pro zapojení optické sítě s modulací QPSK

Na obrázku 4.27 je diagram oka, který byl získán z analyzátoru BER, parametry v tabulce byly rovněž získány z BER analyzátoru.



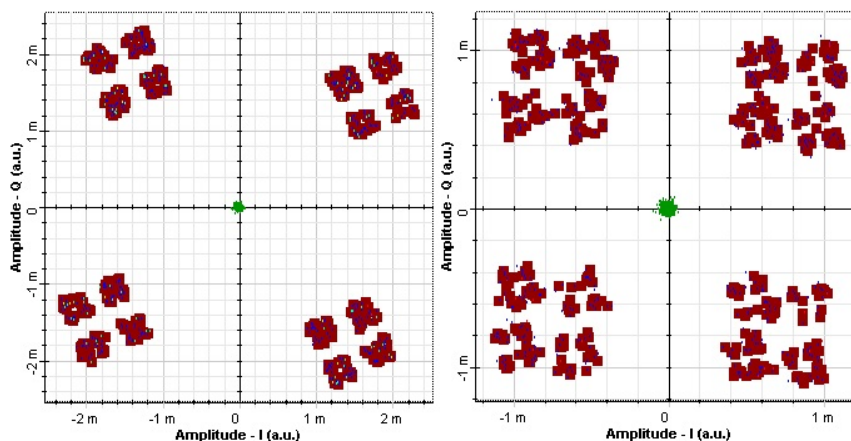
Obrázek 4.29 Diagram oka pro QPSK

Tabulka 4 parametry z BER analyzátoru

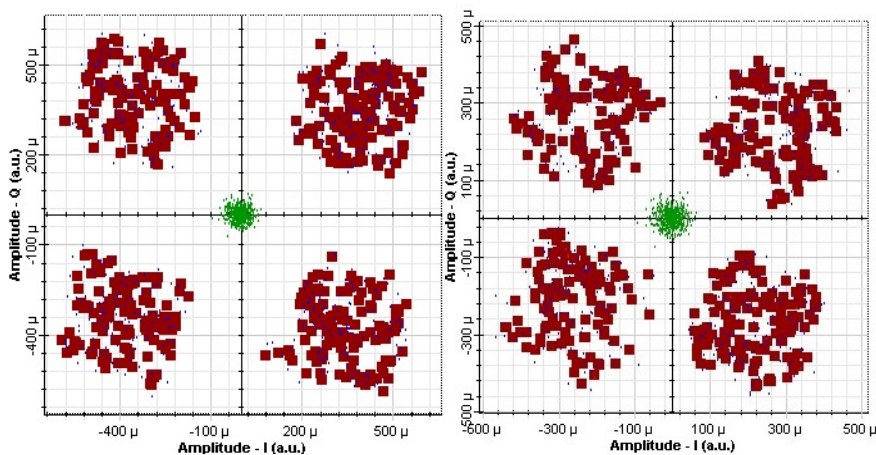
MAX. Q faktor	1e+050
Min. BER	0
Výška oka	1
Práh	3.4327e-069
Rozhodovací úroveň	0,53125

4.7.7 Konstelační diagramy

Zde jsou zachyceny obrázky s konstelačními diagramy pro jednotlivé trasy. Z jednotlivých obrázků diagramů se dá určit postupná degradace signálu.



Obrázek 4.30 Konstelační diagramy pro délku trasy 35 a 50 km pro modulaci QPSK



Obrázek 4.31 Konstelační diagramy pro trasu 65 a 75 km pro modulaci QPSK

4.8 Optický systém OFDM s koherentní detekcí

Optické OFDM s koherentní detekcí, dále jen OOFDM-KD (Coherent Detection Optical OFDM) je jednoduše klasické OFDM, které se používá v rádiových systémech, s tím rozdílem, že nosná rádiová frekvence se převádí na optickou nosnou. OOFDM-KD vyžaduje koherentní příjem, a proto je OFDM citlivé na frekvenci a fázi šumu. Vysílač vyžaduje lasery s paprskem velmi úzké šířky. Příjimače potřebují sofistikované sledovací algoritmy, které sledují frekvenci laseru a fázi.

Komunikační systém OFDM-KD se skládá z pěti bloků:

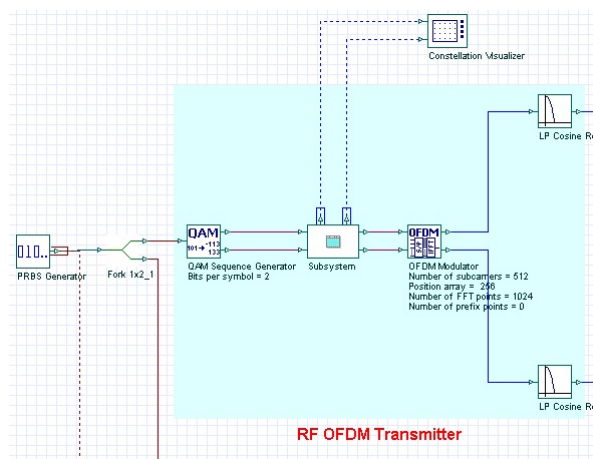
- 1.) OFDM vysílač.
- 2.) Převod elektrického signálu na optický signál.
- 3.) Optická část.
- 4.) Převod optického signálu na signál elektrický.
- 5.) OFDM přijímač.

Modulace používá pro vstupní data 4-QAM modulaci. Vstupní data, která vstupují do OFDM modulátoru mohou být nahrazeny BPSK, QPSK.

Ve vysílacím bloku jsou obě modulace a multiplexy uchovány použitím digitální IFFT. Subnosné frekvence jsou matematicky ortogonální díky periodě v délce jednoho bitu. Převodník elektrického signálu na optický se skládá z kontinuálního zdroje laserového záření a dvou Mach-Zehnderových modulátorů. Signál se pak šíří prostřednictvím optického vlákna, kde dochází vlivem vlákna ke zhoršení kvalitativních parametrů. Koherentní přijímač se zdrojem kontinuálního záření (CW laserem) slouží pro převod z optického signálu na elektrický signál, nakonec jsou data demodulována, pak zaslána do detektoru a dekodéru. Při přenosu na větší vzdálenosti je nezbytná kompenzace elektronické disperze.

4.8.1 Modulace signálu

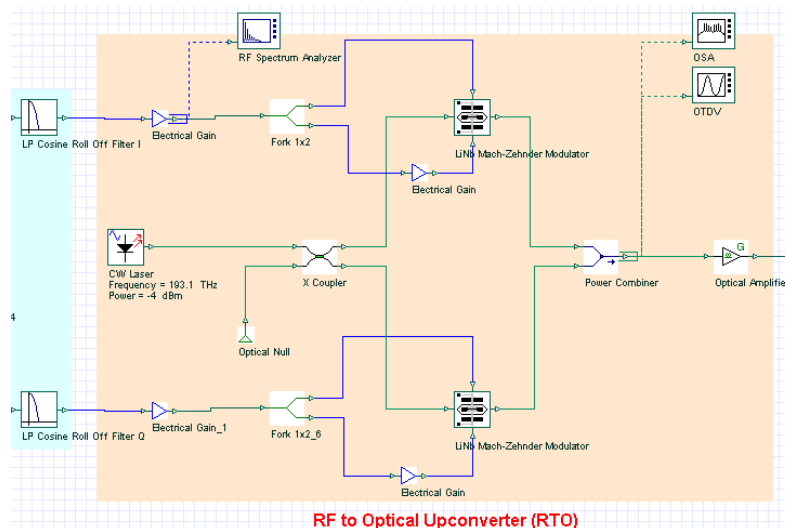
Pro generování provozu je zde opět zvolen sekvenční generátor pseudonáhodných bitových sekvencí, za ním je dělič, který rozděluje provoz, z jednoho výstupu pokračuje do generátoru NRZ impulzů, pak pokračuje druhým výstupem do sekvenčního 4-QAM generátoru, pak provoz následuje do subsystému, který obsahuje 2 více stavové pulsní generátory, za nimi pak signál vstupuje do OFDM modulátoru, kde dochází k rozdělení. Na každé straně je cosinový LP Roll off filtr. Filtr se používá pro odstranění vysokofrekvenční složky a minimalizaci intersymbolové interference. Po filtru následuje elektrický zesilovač. Pro lepší představení byl vložen obrázek s právě popsanou částí topologie.



Obrázek 4.32 Modulace signálu OFDM s koherentní detekcí

4.8.2 Převod signálu z elektrického na optický

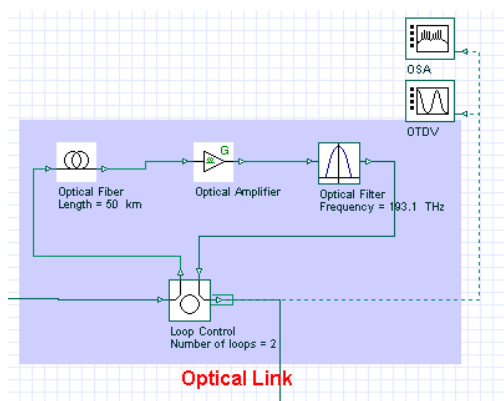
Trasa signálu je rozdělena, kde na každé straně vstupuje signál do Mach-Zehnderového modulátoru a druhou větví také do modulátoru, ale před ním je ještě elektrický zesilovač. Do posledního vstupuje kontinuální zdroj laserového záření. Provoz je poté sjednocen do výkonového kombinátoru, kdy je elektrický signál již převeden na optický signál.



Obrázek 4.33 Převod signálu z elektrického na optický signál

4.8.3 Optická část

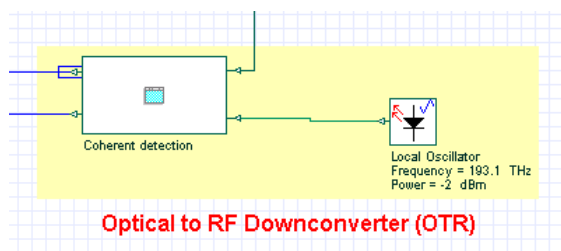
Optická část je totožná s topologií oOFDM-PD. Za kombinátorem pokračuje optický zesilovač, následně kontrola smyčky, za níž je optické vlákno, pak optický zesilovač a optický (Besselův) filtr, který vstupuje do druhého vstupu smyčkové kontroly. Používá se jednovidové vlákno, u kterého je hodnota útlumu nastavena na $0,2 \text{ dB.km}^{-1}$. Referenční vlnová délka je 1550 nm . Optický zesilovač má nastavený zisk na 12 dB , z výstupu optického filtru se pak vrací do zařízení s kontrolou smyčky. I zde je pro lepší pochopení vložena obrázek s optickou částí.



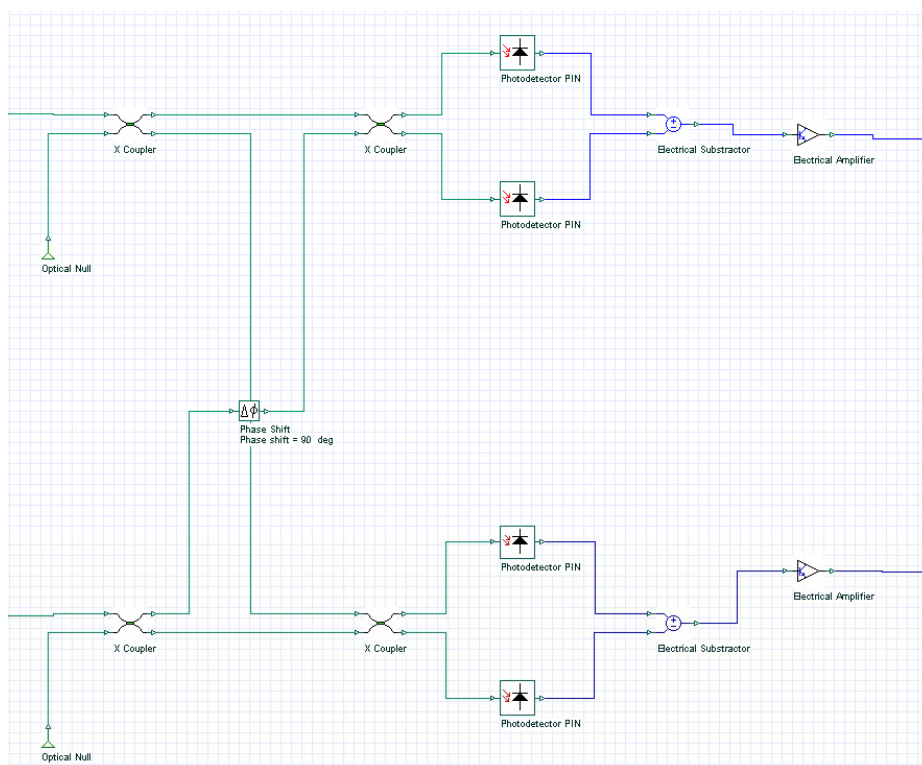
Obrázek 4.34 Optická část OFDM s koherentní detekcí

4.8.4 Převod optického signálu na signál elektrický

Tento blok se skládá z lokálního oscilátoru a koherentního detektoru. Vlnová délka odpovídá frekvenci 1552 nm a výkon na -2 dBm. Koherentního detektor se skládá ze dvou elektrických zesilovačů. Zesilovače jsou nastaveny na zisk 20 dB a výkon šumu -60 dBm, je zapnuta funkce random seed. Další komponentou je elektrická odčítačka, za níž následuje rozdělení na každé straně, tedy celkem 4 fotodetektorové PIN diody. Za nimi pak pokračuje trasa do zařízení s fázovým zdvihem, které otočí fázi o 90°.



Obrázek 4.35 Převod optického signálu na elektrický

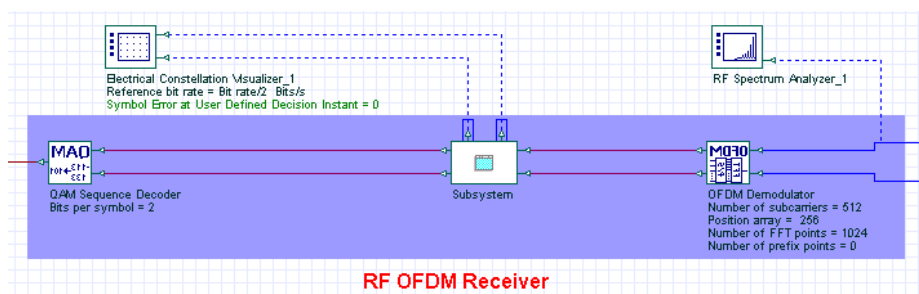


Obrázek 4.36 Vnitřní schéma bloku s koherentní detekcí

4.8.5 Demodulace signálu

Poté, co je signál detekován a převeden zpět na elektrický signál, následuje demodulace, kterou provádí OFDM demodulátor, za ním následuje subsystém, který obsahuje 2 vícecestavové

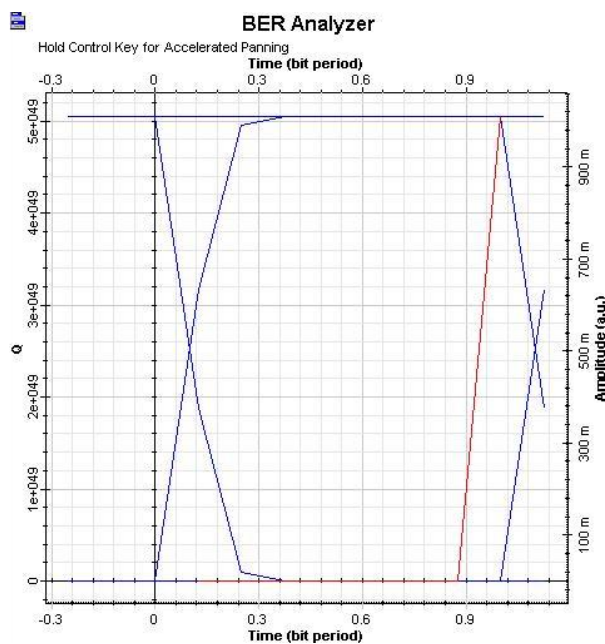
generátory, pak sekvenční QAM detektor a NRZ pulzní generátor. Poslední prvkem je BER analyzátor. Analyzátor slouží k rozboru získaných hodnot. Analýzou zjišťujeme kvalitativní parametry signálu, například, jestli je signál vůbec ještě použitelný, Q faktor a diagram oka.



Obrázek 4.37 Demodulace signálu OFDM s koherentní detekcí

4.8.6 Bitová chybovost pro zapojení optické sítě OFDM s koherentní detekcí

Níže je zobrazen obrázek s diagramem oka, diagram byl získán z BER analyzátoru, který zobrazuje diagram oka a jednotlivé parametry signálu.



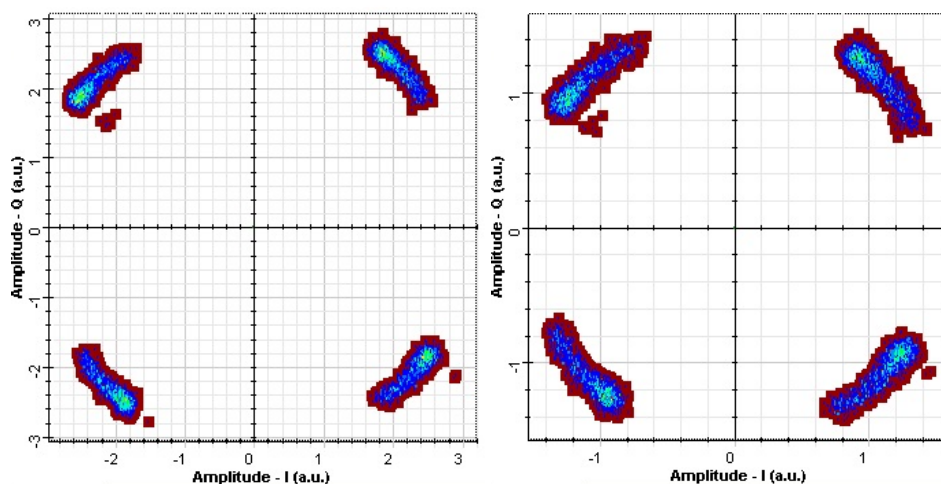
Obrázek 4.38 Diagram oka pro OFDM s koherentní detekcí

Tabulka 5 parametry z BER analyzáru

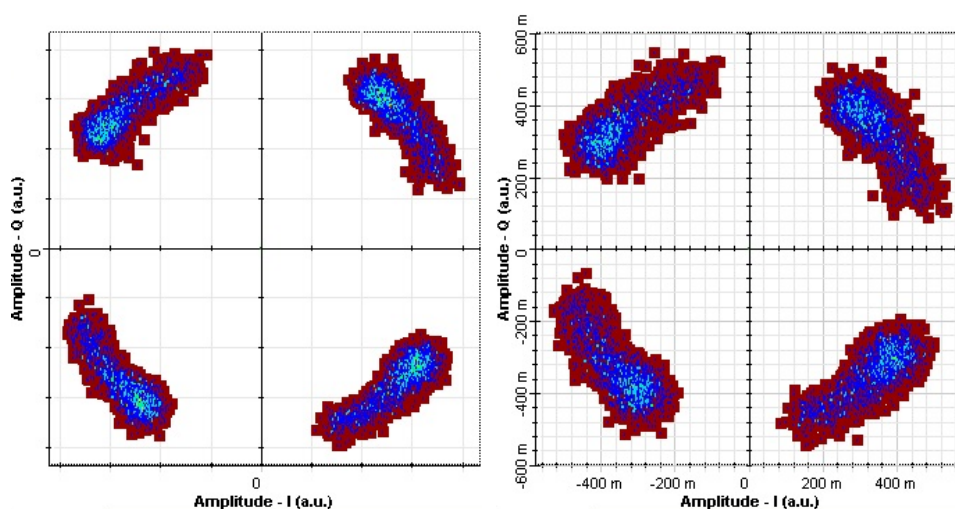
MAX. Q faktor	5.05e+049
Min. BER	0
Výška oka	1.01
Práh	3.72734e-010
Rozhodovací úroveň	0.625

4.8.7 Konstelační diagramy

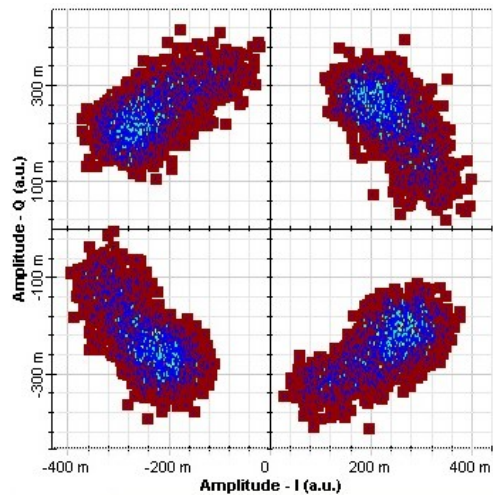
Pro znázornění degradace signálu byly určeny konstelační diagramy, protože diagram oka neumožňuje zobrazení reálného oka, na kterém se dá lépe znázornit degradace. Níže jsem výstupy z konstelačního vizualizéru, pro délky tras 35 km, napravo 50 km, pak 65 km, 75 km a 83 km.



Obrázek 4.39 Konstelační diagramy pro délku trasy 35 a 50km pro modulaci OFDM s koherentní detekcí



Obrázek 4.40 Konstelační diagramy pro trasu 65 a 75km pro modulaci OFDM s koherentní detekcí



Obrázek 4.41 Konstelační diagram pro délku trasy 83km pro modulaci OFDM s koherentní detekcí

5 Vyhodnocení simulací

5.1 Modulační formáty

Byly porovnány tyto modulační formáty, zároveň jsou již seřazeny vzestupně:

- 1.) Klíčování amplitudy
- 2.) Ortogonální frekvenčně dělený multiplex s přímou detekcí
- 3.) 4 stavové kvadraturní klíčování amplitudy
- 4.) Kvadraturní klíčování fáze
- 5.) Ortogonální frekvenčně dělený multiplex s koherentní detekcí

5.2 Testované parametry

Byly vybrány délky trasy $l = 35$ km, 50 km, 65 km, 75 km a 85 km. Bylo použito jednovidové vlákno G652.D s pracovní vlnovou délkou 1552nm, útlum byl nastaven na $0,2 \text{ dB.km}^{-1}$, disperze $16,75 \text{ ps.nm}^{-1}.\text{km}^{-1}$, diferenční skupinové zpoždění $0,2 \text{ dB.km}^{-1}$. Přenosová rychlost 10 Gbit.s^{-1} a kódování NRZ, pro ASK bylo možné použít pouze pro rychlost 1 Gbit/s. Toto kódování se používá v koherentních systémech, protože zde není prodleva při přechodu z 1 na 0, jako u kódování návrat k nule (RZ). V optických systémech svítí/nesvítí. Bipolární se nepoužívá z důvodu střídání mezi dvěma napětími, možnosti vzniku nulové složky na lince. Unipolární se používá tzv. ON/OFF klíčování, avšak na přenosy na dlouhé vzdálenosti není vhodné, jelikož pokud by došlo k stejnému počtu 1 a 0, mohlo by dojít ke vzniku nežádoucí složky polovinu vrcholu pozitivního napětí. Kódy 4B/5B jsou rovněž nevhodné vzhledem ke ztrátě pásma 25%. Zisk v optickém zesilovači byl nastaven na 12 dB, šum 4 dB.

5.3 Zhodnocení

Po analýze jednotlivých modulací bylo zjištěno, že největší přenos je schopna překlenout modulace ortogonální frekvenčně dělený multiplex s koherentní detekcí, která jako jediná umožnila přenos na vzdálenost 83 km ve dvou smyčkách, což je tedy 166 km. Hodnota Q faktoru dle stupnice přitom byla stále na dobré úrovni. Níže je přiložena tabulka s parametry, které byly získány z analyzátoru BER. Níže je uvedena tabulka pro jednotlivé modulační formáty.

Tabulka 6 souhrnné výsledky jednotlivých modulací

Vzdálenost	Max. Q faktor	Min. BER	Velikost oka	Práh	Rozhodování
35 km	5.46715	2.28089e-008	4.11135e-005	5.53547e-005	0.574468
50 km	3.06423	0.00108664	7.3606e-007	1.90247e-005	0.574468

Modulace	OFDM-PD 58 km	4-QAM 71 km	QPSK 75 km	OFDM-KD 83 km
Max. Q faktor	5.05e+049	1,00E+50	1,00E+50	5.05e+049
Min. BER	0	0	0	0
Výška oka	1.1	1	1	1.1
Práh	3.72734e-010	3.39798e-069	3.43495e-069	3.72734e-010
Rozhodování	0.625	0.53125	0,53125	0.625

Z výsledků je patrné, že modulace OFDM s koherentní detekcí poskytuje i kvalitativně nejlepší parametry, protože při vzdálenosti trasy 83 km ve dvou smyčkách byla úroveň Q-faktoru $5.05e+049$.

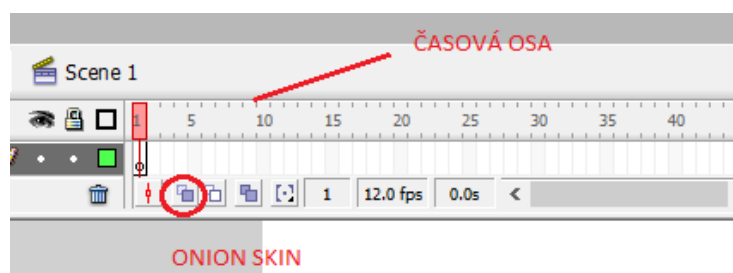
6 Animace Flash

6.1 Popsání softwarového nástroje Macromedia Flash 8

V následující kapitole je popsáno, jak byly jednotlivé podpůrné materiály v podobě flash animací zhotoveny. Softwarový nástroj Macromedia Flash 8 má jednoduché rozhraní, lehké na pochopení.

6.2 Grafické rozhraní

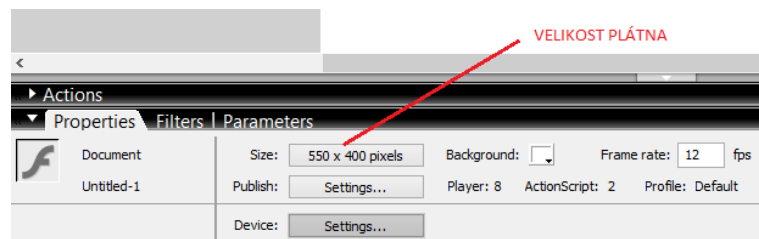
Na levé straně okna je umístěn sloupec s nástroji, uprostřed je pracovní plocha, v horní části je tabulka s vrstvami, kde se nastavuje čas, přechody a ve spodní části lišta s nastavením rozměrů a efekty. Pro vytváření animací se používá efekt onion skin, který vytvoří plynulý přechod, důležité je také načasování, jak dlouho bude zobrazen každý snímek.



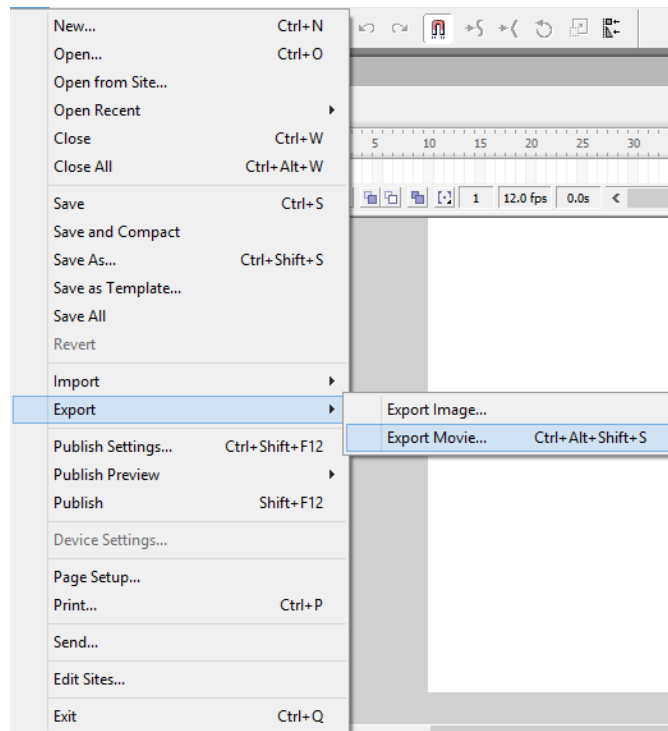
Obrázek 6.1 Popsání vrstev

6.3 Vytváření animací

Prvně si zkontrolujeme velikost plátna, jestliže je malá zvětšíme si ji vzhledem k velikosti našeho obrázku, když máme připravenou plochu vložíme obrázek pomocí klávesové kombinace ctrl + v, po vložení si nastavíme délku zobrazení snímku, čas zobrazení se prodlužuje klávesou F5, čas se prodlouží o 0,1 vteřiny, po nastavení stiskneme tlačítko onion skin, které nám aktivuje překrývání snímků, pak již stiskneme klávesu F7, čímž si vytvoříme další blok pro nastavení času a vložíme další obrázek. Poté již obdobným způsobem vkládáme další obrázky. Pro zjištění, jestli jsme nastavili dostatečně dlouhý časový úsek lze animaci spustit v programu, aniž bychom ji museli prvně exportovat. Kurzorem se přiblížíme k bloku odkud chceme začít a pak stiskneme klávesu enter, animace se taktéž zastavuje klávesnicí enter. Když je animace hotová, najedeme kurzorem do nabídky soubor, ve spodní části je tlačítko export, poté export movie, po stisknutí se otevře okno s nabídkou, kam chceme animaci uložit, po vybrání úložiště se objeví tabulka, kde se dají nastavit parametry kvality komprese, kvalita zvuku.



Obrázek 6.2 Popisování velikosti rozlišení plátna



Obrázek 6.3 Export animace

7 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo popsat teoretické principy koherentních optických systémů, poté simulovat modulační formáty. Simulace byly provedeny v simulačním nástroji Optiwave Optisystem 11 (64 bit). Dále mělo být zhotoveno vyhodnocení simulací a pak vytvoření podpůrného materiálu, který bude sloužit studentům k lepšímu pochopení dané problematiky.

Jedna třetina bakalářské práce obsahuje teoretické principy modulačních formátů pro koherentní optické systémy. Byly popsány.

V druhé třetina práce byly provedeny simulace po konzultaci s vedoucím bakalářské práce v prostředí Optiwave Optisystem 11 (64 bit). Každá simulace byla detailně popsána, ale i graficky znázorněna.

V třetí části byla provedena analýza modulací. Nejlépe byl vyhodnocen ortogonální frekvenčně dělený multiplex s koherentní detekcí.

V poslední části jsou popsány vytvoření animací Flash. Vytvoření animací v prostředí Macromedia Flash bylo velmi jednoduché, protože program je velmi intuitivní.

Dle vyhodnocení jednotlivých modulačních formát bylo zjištěno, že největší dosah je schopné překlenout s modulačním formátem pro koherentní optické systémy ortogonální frekvenčně dělený multiplex s koherentní detekcí, mimo jiné se hojně používá v praxi. Tato modulace se rovněž používá na přenosy na velké vzdálenosti, které se pohybují v současnosti v jednotkách stovek km.

V budoucnosti bych chtěl tuto práci použít, jako základ pro vytvoření diplomové práce, kde by se prakticky ověřili vlastnosti jednotlivých modulací, také by bylo dobré upravit zobrazení diagramu oka v Optisystem 11 (64 bit), které v současné situaci zobrazuje oko pouze jako křivky, protože diagram oka je vytvořen ze signálu, který používá pulzní generátor. Vzhled oka není zrovna tedy ideální. Také by bylo dobré se zaměřit, proč konstelační diagram modulace 4-QAM, když se modifikuje na více stavovou modulaci nefunguje zcela správně, protože když bylo upraveno nastavení, tak pro vícestavové modulace byl konstelační diagram rozházený.

8 Seznam použité literatury

- [1] BINH, Le Nguyen. *Digital optical communications*. Boca Raton: CRC Press, 2009, xxvii, 579 p. ISBN 14-200-8205-1.
- [2] AL], Leonid G. Kazovsky ... [et]. *Broadband optical access networks*. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience. ISBN 978-047-0910-924.
- [3] XIONG, Fuqin. *Digital modulation techniques*. Boston: Artech House, 2000, xv, 653 s. ISBN 08-900-6970-0
- [4] TEJKAL, Vladimír. DVOUSTAVOVÉ MODULAČNÍ FORMÁTY V OPTICKÝCH PŘÍSTUPOVÝCH SÍTÍCH. *Advances in Electrical and Electronic Engineering* [online]. 2010, 4. [Citace: 5. 4. 2013]. Dostupný z WWW: <<http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/84189/AEEE-2010-8-4-96-tejkal.pdf?sequence=1>>. ISSN 1804-3119
- [5] Jak funguje kvadrurní amplitudová modulace. In: *Internet pro všechny* [online]. 2009 [cit. 2013-04-01]. Dostupné z: <http://www.internetprovsechny.cz/jak-funguje-kvadrurni-amplitudova-modulace/>
- [6] HOREVAJ CSc., Doc. Ing. Michal. Chyby diskretních modulací. In: [online]. [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: http://horevaj.com/horevaj/11_files/5.pdf
- [7] What is Coherent Lightwave Communication System?. [online]. 2012 [cit. 2013-03-20]. Dostupné z: <http://www.fiberoptics4sale.com/wordpress/what-is-coherent-lightwave-communication-system/>
- [8] LIANG, Fan a Onno HARMS. Understanding WiMAX From the PHY Perspective. [online]. 2008 [cit. 2013-04-01]. Dostupné z: <http://www.evaluationengineering.com/articles/200802/understanding-wimax-from-the-phy-perspective.php>
- [9] LAMPERSKI, Jan. Coherent optical fiber systems fiber. [online]. [cit. 2012-10-20]. Dostupné z: http://www.invocom.et.put.poznan.pl/~invocom/C/P1-9/swiatlowody_en/p1-1_8_2.htm
- [10] WILFERT CSc, Doc. Ing. Otakar. *Optoelektronika* [online]. [cit. 2013-05-02]. Dostupné z: <http://vcielka.darksun.sk/~jnx/download/optics/Optoelektronika%20b.pdf>
- [11] SKUBIC, B. PARKER, M. *Technical Assessment and Comparison of Next-Generation Optical Access System Concepts* [online]. [cit. 2012-09-24]. Dostupné z: http://ec.europa.eu/information_society/apps/projects/logos/5/249025/080/deliverables/001_OASED421WP4UESsex31Oct2011V10.pdf
- [12] ROUSE, Margaret. Phase-shift keying (PSK). [online]. roč. 2005 [cit. 2013-03-20]. Dostupné z: <http://searchnetworking.techtarget.com/definition/phase-shift-keying>
- [13] SCHMIDT, Brandon J.C., LOWERY, Arthur James a ARMSTRONG, Jean. Experimental Demonstrations of Electronic Dispersion Compensation for Long-Haul Transmission Using Direct-Detection Optical OFDM. [online]. [cit. 2013-04-01]. Dostupné z: <http://www.opticsinfobase.org/jlt/abstract.cfm?id=156084>
- [14] SHIEH, William, TUCKER, Rodney S., CHEN, Wei, YI, Xingwen a PENDOCK, Graeme. Optical performance monitoring in coherent optical OFDM systems. [online]. 2006 [cit. 2013-04-02]. Dostupné z: <http://www.idemployee.id.tue.nl/w.chen/papers/wchen-OpticsExpressJournal07-3.pdf>
- [15] KARTALOPOULOS, Stamatios V. *Introduction to DWDM technology: data in a rainbow* [online]. Bellingham, Wash.: SPIE Optical Engineering Press, c2000, s. 167-172 [cit. 2013-04-16]. ISBN 0780353994.
- [16] KHODL, M. *Perspektivní optické systémy pro přenos informace: Vliv koherentního přenosu na dosah světlovodného spoje* [online]. 1996 [cit. 2013-02-10]. Dostupné z: <http://kfe.fjfi.cvut.cz/docs/vm/pos/pos432.htm>

-
- [17] VLČEK CSc, Prof. Ing. Čestmír. *Vláknová optika* [online]. [cit. 2013-01-12].
- [18] HANZO, L., T. KELLER a W.T. WEBB. *Quadrature Amplitude Modulation: From Basics to Adaptive Trellis-Coded, Turbo-Equalised and Space-Time Coded OFDM, CDMA and MC-CDMA Systems* [online]. [cit. 2013-04-12]. Dostupné z: http://eprints.soton.ac.uk/260296/1/QAM3-chaps_1-22-24.pdf
- [19] PASCHOTTA, Dr. Rüdiger. Optical heterodyne detection. [online]. [cit. 2013-05-02]. Dostupné z: http://www.rp-photonics.com/optical_heterodyne_detection.html

9 Seznam obrázků

Obrázek 2.1 Schéma standardního koherentního systému.....	3
Obrázek 2.2 Schéma optické heterodynní detekce (a) asynchronní, (b) synchronní detekce	5
Obrázek 2.3 Optická heterodynní detekce pro PSK, FNP představuje označení pro filtr s nízkou propustí, FPP je index pro filtr pásmové propusti.....	6
Obrázek 2.4 Optická homodynní detekce, FZ – fázový závěs, ostatní zkratky jsou vysvětleny v předchozím obr. 2.3.....	7
Obrázek 3.1 Současný model ekvivalentního vstupu optického přijímače.....	9
Obrázek 3.2 optická heterodynní detekce pro PSK	10
Obrázek 3.3 BPSK konstelační signál.....	11
Obrázek 3.4 Schéma BPSK modulátoru	12
Obrázek 3.5 Koherentní BPSK demodulátor	13
Obrázek 3.6 Optická homodynní detekce pro systém FSK	14
Obrázek 3.7 koherentní FSK modulátor	14
Obrázek 3.8 a) schéma osmi kanálů s ochranným intervalem spektrum FDM multinosné modulace, b) schéma osmi kanálů bez ochranného intervalu, spektrum OFDM multinosné modulace.....	16
Obrázek 3.9 Reprezentování symbolů ve frekvenční oblasti OFDM.....	17
Obrázek 3.10 Schéma generování časové domény OFDM sub-nosné modulace	18
Obrázek 3.11 Blokový diagram vzorků diskrétního časového modelu systému OFDM s použitím N-bodové FFT a IFFT.	19
Obrázek 3.12 Schématický diagram optického OFDM vysílače na dlouhé vzdálenosti používající mnohonásobné modulační formáty.....	22
Obrázek 3.13 OFDM přenos přes více ortogonálních sub-nosných.....	23
Obrázek 4.1 Pohled na rozhraní Optiwave Optisystem 11 (64 bit).....	25
Obrázek 4.2 Diagram oka	27
Obrázek 4.3 Konstelační diagram	27
Obrázek 4.4 Popis amplitudy chybového vektoru	28
Obrázek 4.5 Detail signálu ASK	29
Obrázek 4.6 Modulace signálu a převod elektrického signálu na optický signál pro ASK.....	29
Obrázek 4.7 Vnitřní schéma cirkulátoru.....	30
Obrázek 4.8 Demodulace ASK	31
Obrázek 4.9 Diagramy oka pro délku trasy 35 a 50 km s modulací ASK.....	31
Obrázek 4.10 Modulace signálu OFDM s přímou detekcí.....	32
Obrázek 4.11 detail signálu pro modulaci OFDM s délkou trasy 35 km	33
Obrázek 4.12 Převodu elektrického signálu na optický u OFDM s přímou detekcí.....	33
Obrázek 4.13 Optická část pro OFDM s přímou detekcí.....	34
Obrázek 4.14 Převod optického signálu na elektrický signál pro OFDM s přímou detekcí	34
Obrázek 4.15 Demodulace signálu.....	35
Obrázek 4.16 Srovnání výstupů z optického spektrálního analyzátoru pro OFDM s přímou detekcí.....	35
Obrázek 4.17 Konstelační diagramy pro délku trasy 35km a 50 a 58km pro OFDM s přímou detekcí ..	36
Obrázek 4.18 Diagram oka pro OFDM s přímou detekcí	36
Obrázek 4.19 Detail signálu modulace QAM pro trasu 35 km.....	37
Obrázek 4.20 Modulace signálu a optická část pro QAM.....	38
Obrázek 4.21 Převod signálu z optické domény do rádiové frekvenční	39
Obrázek 4.22 Demodulace signálu pro QAM modulaci.....	39
Obrázek 4.23 Diagram oka pro QAM.....	40
Obrázek 4.24 Konstelační diagramy pro délku trasy 35 a 50 km pro modulaci QAM	40
Obrázek 4.25 Konstelační diagramy pro délku trasy 65 a 71km pro modulaci QAM	41
Obrázek 4.26 Detail signálu modulace QPSK pro trasu 35 km.....	41
Obrázek 4.27 Schéma pro QPSK modulaci se zobrazením modulace signálu, převod z rádiové frekvenční oblasti do optické domény, optická část a převod zpět do rádiové frekvenční oblasti, tedy na elektrický signál.....	42

<i>Obrázek 4.28 Demodulace signálu QPSK.....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 4.29 Diagram oka pro QPSK.....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 4.30 Konstelační diagramy pro délku trasy 35 a 50km pro modulaci QPSK</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 4.31 Konstelační diagramy pro trasu 65 a 75km pro modulaci QPSK.....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 4.32 Modulace signálu OFDM s koherentní detekcí</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 4.33 Převod signálu z elektrického na optický signál</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 4.34 Optická část OFDM s koherentní detekcí.....</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 4.35 Převod optického signálu na elektrický</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 4.36 Vnitřní schéma bloku s koherentní detekcí.....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 4.37 Demodulace signálu OFDM s koherentní detekcí</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 4.38 Diagram oka pro OFDM s koherentní detekcí.....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 4.39 Konstelační diagramy pro délku trasy 35 a 50km pro modulaci OFDM s koherentní detekcí</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 4.40 Konstelační diagramy pro trasu 65 a 75km pro modulaci OFDM s koherentní detekcí ...</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 4.41 Konstelační diagram pro délku trasy 83km pro modulaci OFDM s koherentní detekcí....</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 6.1 Popsání vrstev.....</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 6.2 Popisování velikosti rozlišení plátna.....</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 6.3 Export animace</i>	<i>54</i>

10 Seznam tabulek

<i>Tabulka 1 parametry bitové chybovosti modulace ASK.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabulka 2 parametry z BER analyzátoru pro OFDM s přímou detekcí.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabulka 3 parametry BER pro QAM modulaci</i>	<i>40</i>
<i>Tabulka 4 parametry z BER analyzátoru.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka 6 parametry z BER analyzátoru.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabulka 7 souhrnné výsledky jednotlivých modulací</i>	<i>51</i>

Seznam příloh

Příloha.A:	Seznam rozhraní jednotlivých modulací	62
Příloha.B:	Animace modulací.....	64

Součástí BP je CD.

Adresářová struktura příloženého CD:

1.) Animace/

- ASK.swf
- OFDM-PD.swf
- QAM.swf
- QPSK.swf
- OFDM-KD.swf

2.) Topologie/

- ASK.osd
- OFDM-PD.osd
- QAM.osd
- QPSK.osd
- OFDM-KD.osd

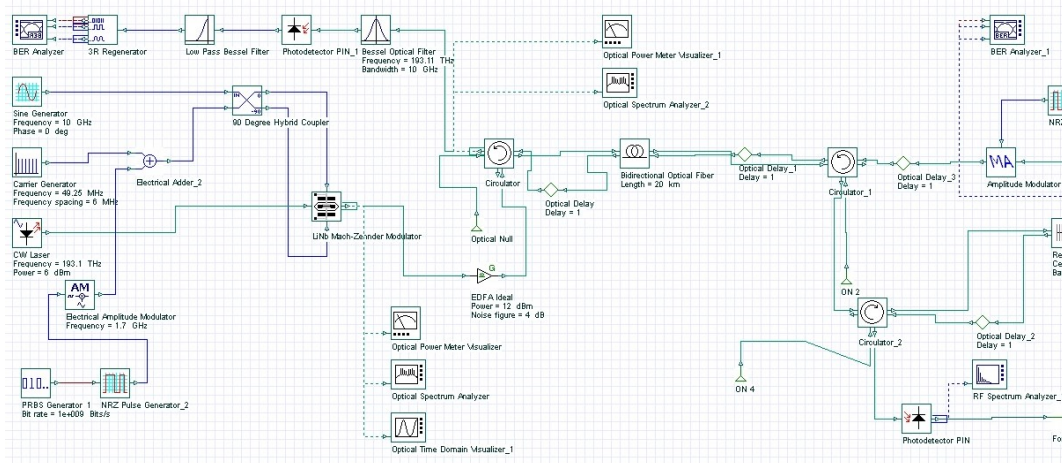
3.) BP/

- Miroslav_Potocny_BP.PDF

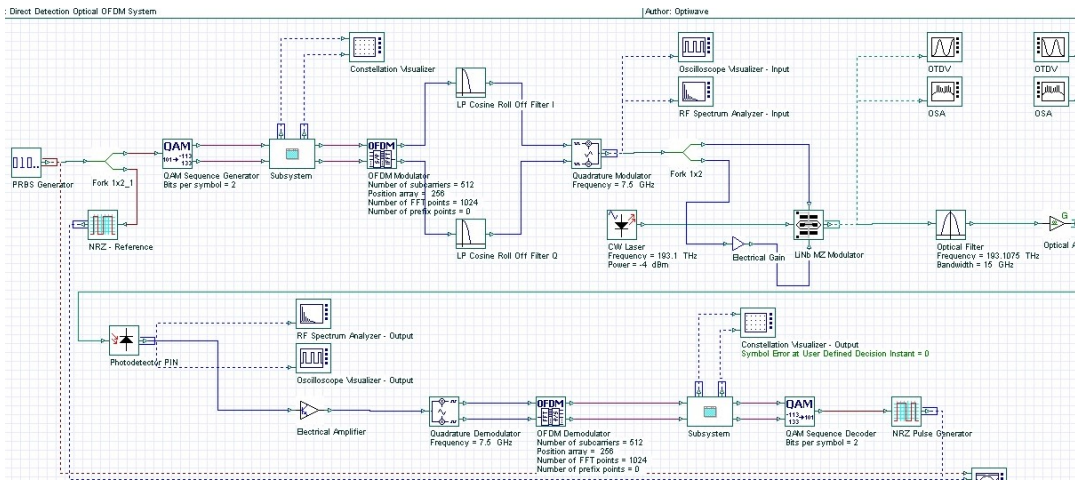
Příloha.A: Seznam rozhraní jednotlivých modulů

Pro zhotovení modulů bylo použito souborů z Optiwave.com

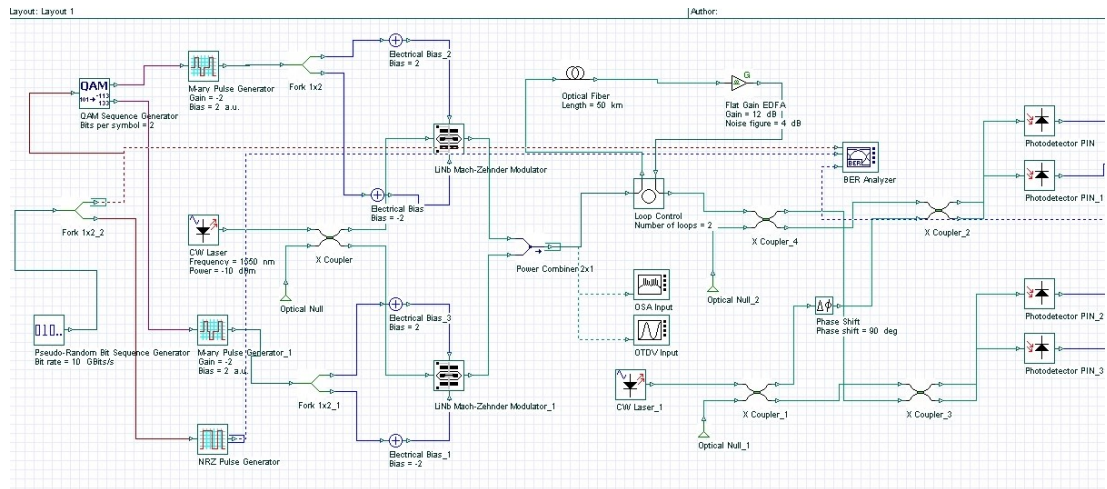
1.)ASK



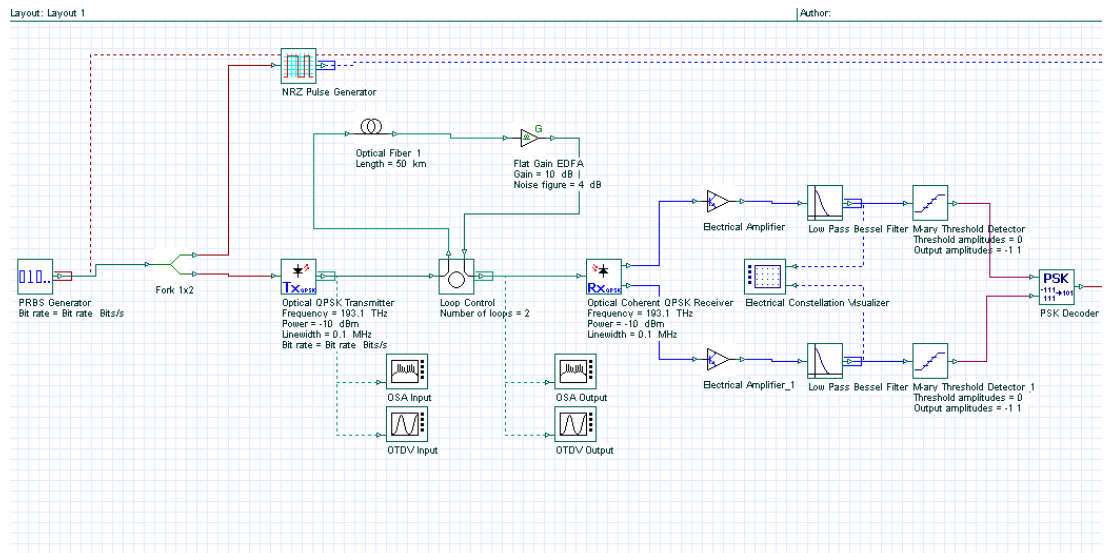
2.)OFDM s přímou detekcí



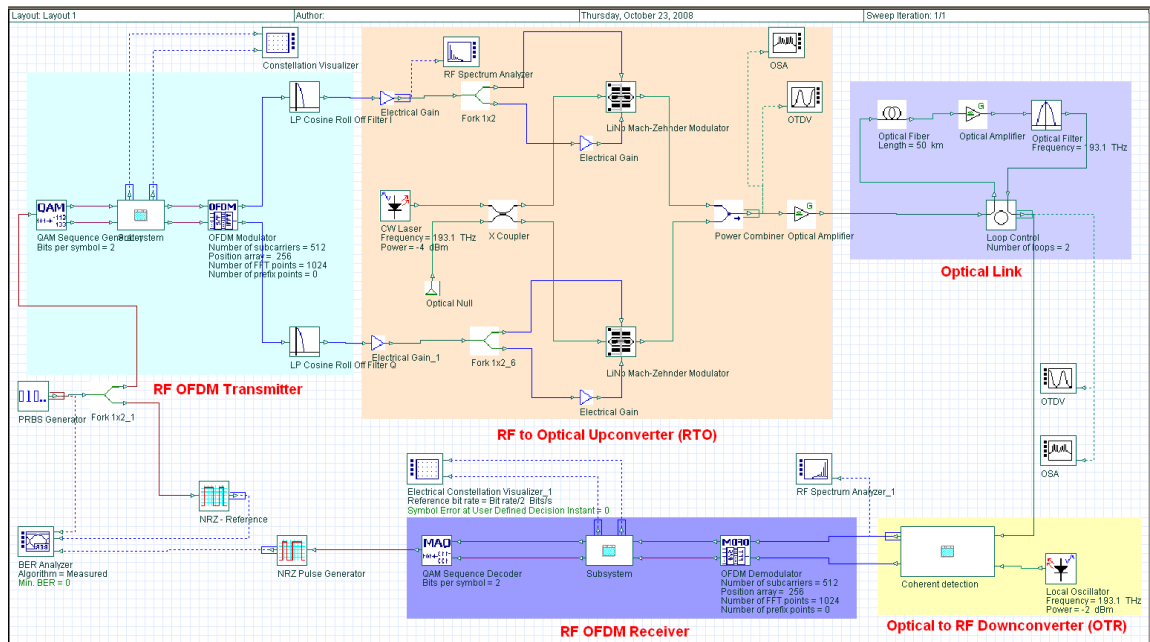
3.) QAM



4.) QPSK



5. OFDM s koherentní detekcí



Příloha.B: Animace modulací

ASK.swf
 OFDM-PD.swf
 QAM.swf
 QPSK.swf
 OFDM-KD.swf