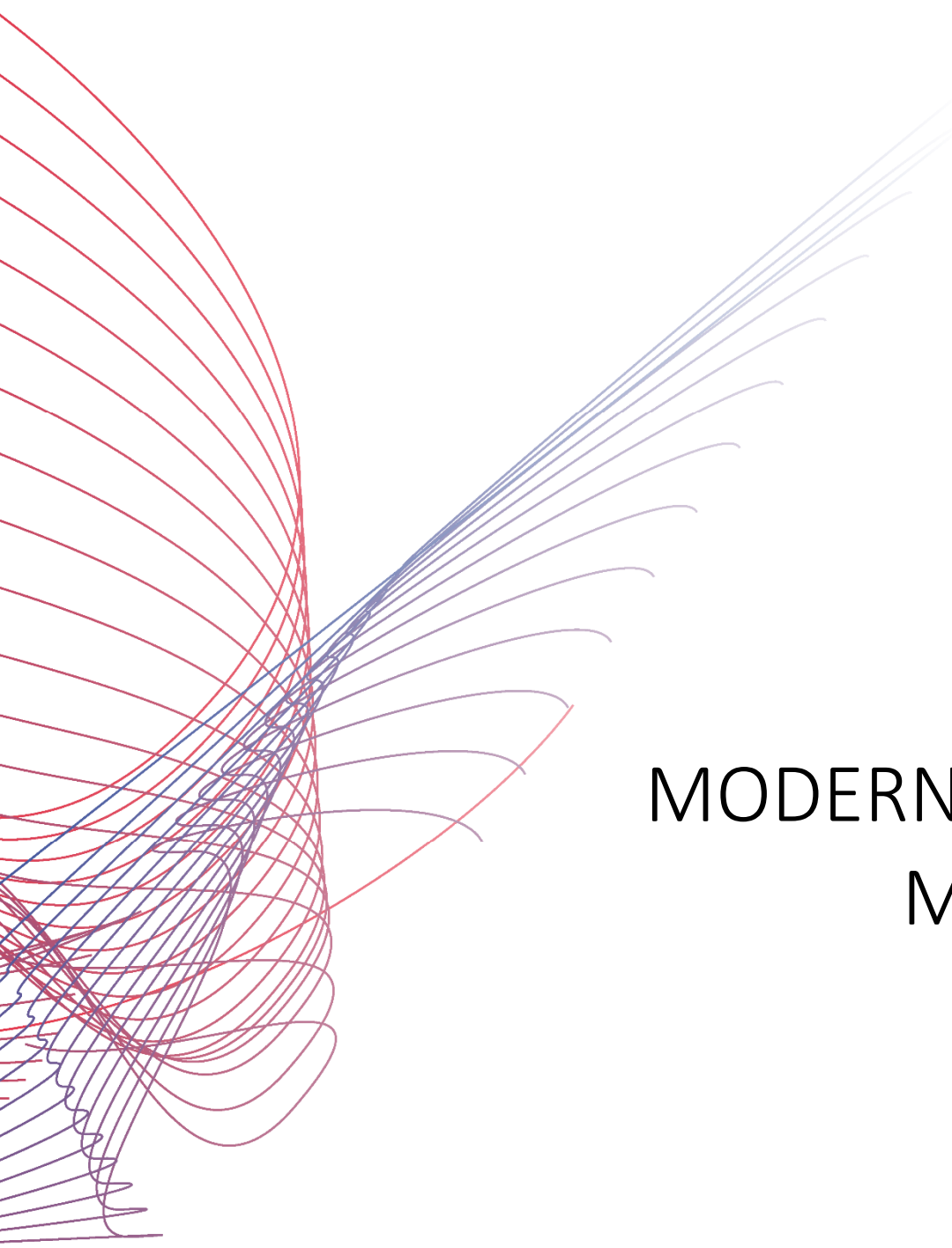




TECH
pedia



MODERNÍ METODY
MODULACE

MICHAL LUCKI

Název díla: Moderní metody modulace
Autor: Michal Lucki
Vydalo: České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Kontaktní adresa: Technická 2, Praha 6
Tel.: +420 224352084
Tisk: (pouze elektronicky)
Počet stran: 37
Edice (vydání): 1. vydání, 2017
ISBN 978-80-01-06271-5

TechPedia

European Virtual Learning Platform for
Electrical and Information Engineering

<http://www.techpedia.eu>

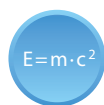


Tento projekt byl realizován za finanční podpory
Evropské unie.

Za obsah publikací odpovídá výlučně autor.

Publikace (sdělení) nereprezentují názory Evropské
komise a Evropská komise neodpovídá za použití
informací, jež jsou jejich obsahem.

VYSVĚTLIVKY



Definice



Zajímavost



Poznámka



Příklad



Shrnutí



Výhody



Nevýhody

ANOTACE

Vhodná modulace je nutná k přizpůsobení signálu tomu, aby mohl být přenášén optickým vláknem. Dosažení vysoké přenosové rychlosti a velké informační kapacity přenosových systémů je spojeno s použitím vhodných modulačních formátů. Každá modulace se provádí jiným způsobem a je vhodná pro určité typy přenosu. Z tohoto důvodu je nutné seznámit studenty s principy pokročilých modulačních formátů, které jsou součástí každého procesu optimalizace moderních vysokorychlostních optických přenosových sítí.

CÍLE

Cílem tohoto výukového materiálu je prezentovat přehled o digitálních modulačních formátech, včetně amplitudové, fázové, vícecestavové modulace a pokročilých modulací kombinujících více parametrů. Popis zahrnuje principy jednotlivých modulací, jejich výhody a některé nevýhody. Čtenář by měl být schopen posoudit, která modulace je vhodná pro danou oblast použití (s ohledem na potřebnou délku trasy, informační kapacitu, kanálovou rozteč a další).

LITERATURA

- [1] M. Lucki, R. Agalliu, R. Zeleny, Limits of advanced modulation formats for transition in fiber optic telecommunication systems to increase speeds from 10, 40, 100 Gb•s-1 to higher bit rates, SPIE Proceedings Volume 9131: Optical Modelling and Design III, Bellingham, USA, 2014.
- [2] R. Agalliu, M. Lucki, System improvements in dense wavelength division multiplexing networks by using advanced optical modulation formats, in Proceedings of 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), IEEE, Budapest, 1-4, 2015.
- [3] L. Bohac, M. Lucki, Optické komunikační systémy, skripta ČVUT, 2010, ISBN 978-80-01-04484-1.
- [4] E. Lach, W. Idler, Modulation formats for 100G and beyond, Optical Fiber Technology 17, 377-386, 2011.
- [5] N. Clark, Simulation of Optical Transmission Systems in OptSim, Master Thesis, Thesis supervisor: Dr. Michal Lucki, Prague, 18-23, 2013.
- [6] Kim, H., Essiambre, R., "Transmission of 8 x 20 gb/s dqpsk signals over 310-km smf with 0.8-b/s/hz spectral efficiency," IEEE Photonics Technology Letters 15(5), 769-771, 2003.

- [7] K. Kim, H.S. Chung, S.H. Chang, J.Ch. Lee, J.H. Lee: Field trial of direct-detection and multi-carrier based 100G transceiver, in Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, pp. 1-3, 2014.
- [8] L. Cheng, Z. Li, Y. Yang, Ch. Lu, Y. Fang, H. Jiang, X. Xu, Q. Xiong, Sh. Zhong, Z. Chen, H. Tam, and P. Wai, 8×200-Gbit/s polarization-division multiplexed CS-RZ-DQPSK transmission over 1200 km of SSMF, OptoElectronics and Communications Conference, OECC 1(2), 13-17, 2009.
- [9] S. Shinada, H. Furukawa, N. Wada: Field demonstration of DWDM/NRZ-DQPSK optical packet switching and buffering, in 16th Opto-Electronics and Communications Conference, pp. 780-781, 2011.
- [10] V. Ket-Urai, R. Maneekut, P. Kaewplung: Feasibility of 40-Gbps RZ-DQPSK signal transmission over PON, in 17th Opto-Electronics and Communications Conference, pp. 319-320, 2012.
- [11] T. J. Xia, G. A. Wellbrock, M. Huang, S. Zhang, Y. Huang, D. Chang, S. Burtsev, W. Pelouch, E. Zak, H. de Pedro, W. Szeto and H. Fevrier, Transmission of 400G PM-16QAM Channels over Long-Haul Distance with Commercial All-Distributed Raman Amplification System and Aged Standard SMF in Field, in Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2014.
- [12] X. Zhou, L. E. Nelson, P. Magill, R. Isaac, B. Zhu, D. W. Peckham, P. I. Borel and K. Carlson, High Spectral Efficiency 400 Gb/s Transmission Using PDM Time-Domain Hybrid 32–64 QAM and Training-Assisted Carrier Recovery, Journal of Lightwave Technology, vol.31, iss.7, pp. 999 - 1005, 2013.
- [13] B. Zhu, D. W. Peckham, X. Jiang, and R. Lingle Jr, System Performance of Long-Haul 112-Gb/s PDM-QPSK DWDM Transmission over Large-area Fiber and SSMF Spans, in Optical Communication (ECOC 2013), 39th European Conference and Exhibition, 2013.
- [14] J. Renaudier, O. Bertran-Pardo, G. Charlet, M. Salsi, H. Mardoyan, P. Tran, and S. Bigo, "8 Tb/s Long Haul Transmission Over Low Dispersion Fibers Using 100 Gb/s PDM-QPSK Channels Paired With Coherent Detection", Bell Labs Technical Journal, vol.14, iss.4, pp. 27-45, 2010.
- [15] J. Karaki, E. Pincemin, D. Grot, T.Guiliossou, Y. Jaouen, R. le Bidan and T. le Gall, Dual-Polarization Multi-Band OFDM versus Single-Carrier DP-QPSK for 100 Gbps Long-Haul WDM Transmission over Legacy Infrastructure, in Optical Communications (ECOC), 38th European Conference and Exhibition, 2012.
- [16] Ch. Laperle, B. Villeneuve, Zh. Zhang, D. Mcghan, H. Sun and M. O’Sullivan, WDM performance and PMD Tolerance of a Coherent 40-Gbit/s Dual-Polarization QPSK Transceiver, Journal of Lightwave Technology, vol. 26, iss. 1, 2008.
- [17] G. Raybon, S. Randel, A. Adamiecki, P. Winzer, L. Salamanca, R. Urbanke, S. Chandrasekhar, A. Konczykowska, F. Jorge, J. Dupuy, L. Buhl, S. Draving, M. Grove,

and K. Rush, 1-Tb/s dual-carrier 80-GBaud PDM-16QAM WDM transmission at 5.2 b/s/Hz over 3200 km, *Photonics Conference (IPC)* 1(2), 23-27, 2012.

- [18] Y. Ma, Q. Yang, Y. Tang, S. Chen, W. Shieh, 1-Tb/s Single-Channel Coherent Optical OFDM Transmission With Orthogonal-Band Multiplexing and Subwavelength Bandwidth Access, *Journal of Lightwave Technology* 28(4), 308-315, 2010.
- [19] P. Wizner, J. Essiambre, Advanced Modulation Formats for High-Capacity Optical Transport Networks, *Journal of Lightwave Technology* 24(12), 4711- 4728, 2006.
- [20] P.J. Winzer, High-Spectral-Efficiency Optical Modulation Formats, *J. Lightwave Technology*, vol.30, no.24, pp. 3824-3835, 2012. D. Wang, D. Lu, C. Lou, L. Huo, W. Yu: Performance comparison of phase modulated formats in 160 Gb/s transmission system, in *Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition*, pp. 1-6, Nov. 2011.
- [21] S. Ghoniemy, K.F. George and L. MacEachern, Performance Evaluation and Enhancements of 42.7 Gb/s DWDM Transmission System using Different Modulation Formats, in *Ninth Annual Communication Networks and Services Research Conference*, pp. 189-194, 2011.
- [22] D. Wang, D. Lu, C. Lou, L. Huo and W. Yu, Performance Comparison of Phase Modulated Formats in 160 Gb/s Transmission System, in *Communications and Photonics Conference and Exhibition, ACP, Asia*, 2011.
- [23] Petr Jareš, Moderní modulační metody a jejich aplikace, Inovace předmětů a studijních materiálů pro e-learningovou výuku v prezenční a kombinované formě studia, teaching module, Czech Technical University in Prague, Faculty of Electrical Engineering

Obsah

1	Digitální amplitudové modulace: AMI, DB, CSRZ	8
1.1	Základní rozdělení digitálních optických modulací	8
1.2	CSRZ.....	11
1.3	Kombinované vysílače (transceivery) pro optické modulace	13
1.4	Modulace AMI	15
1.5	Modulace DB	17
2	Fázové modulace: DPSK a QPSK	19
2.1	DPSK.....	19
2.2	Modulace QPSK a DQPSK.....	21
3	Pokročilé aspekty optických modulací pro dosažení vysoké přenosové rychlosti a odolnost vůči degradaci signálu	24
3.1	Polarizační multiplex u QPSK modulace pro přenosové rychlosti v řádu terabitů..	24
3.2	Konvergence sítí: koexistence amplitudové a fázové modulace v jednom vlákně ..	27
3.3	Křížová fázová modulace způsobená koexistencí fázové a amplitudové modulace	29
3.4	Zamezení nelineárních jevů způsobených pokročilými modulacemi	30
3.5	Odolnost digitálních modulací vůči disperzi při vysokých rychlostech.....	31
3.6	OFDM – vícecestavová modulace – princip, aplikace	32
3.7	OFDM – vícecestavová modulace – parametry, výhody, meze	34
3.8	VDMT – pokročilá vektorová modulace – princip, aplikace.....	35
3.9	Závěr.....	37

1 Digitální amplitudové modulace: AMI, DB, CSRZ

1.1 Základní rozdělení digitálních optických modulací



Informace mohou být přenášeny v optickém komunikačním systému ve formě optických symbolů, které jsou vytvořeny modulovaným zdrojem optického záření.

Cíle

- Základním cílem modulace je přizpůsobení informačního signálu do formy, kterou lze přenášet v informačním kanálu.
- Dalším cílem je snížení chromatické disperze, která způsobuje jinou rychlost jednotlivých frekvenčních složek obsažených v optickém pulzu. Chromatickou disperzi lze chápat jako změnu šířky optického pulzu, kvůli rozdílné rychlosti jednotlivých frekvenčních složek obsažených v laserovém pulzu.
- V neposlední řadě je cílem modulace zabránit vzniku problematických shluků logických nul nebo logických jedniček, které způsobují problémy s detekcí taktu (časování vysílání optických pulzů nutné pro jejich správnou detekci).

Třídění

Existuje mnoho modulačních formátů, které se používají především v optovláknových komunikačních systémech. Lze je třídit na základě parametru, který je modulován – např. amplituda nebo fáze signálu.

- Amplitudové modulace:
 - **OOK** – *On-Off Keying* – bipolární modulace „svítí-nesvítí“
 - **AMI** – *Alternate Mark Inversion* – bipolární modulace
 - **DB** – *Duobinary Modulation* – duobinární modulace
 - **CRZ** – *Chirp Return to Zero*, modulace čirpu s návratem k nule, chirp – angl. cvrkot, rozkmitání
 - **CSRZ** – *Carrier Suppressed Return to Zero* – bipolární modulace s potlačenou nosnou a s návratem k nule
- Modulace frekvence:
 - **OFDM** – *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* – ortogonální multiplex s frekvenčním dělením

- **VDMT** – *Vectored Discrete Multi-Tone* – vektorová diskretní multitónová modulace
- Fázové modulace:
 - **PSK** – *Phase Shift Keying* – klíčování fázovým posuvem
 - **BPSK** – *Binary Phase Shift Keying* – binární klíčování fázovým posuvem
 - **DPSK** – *Differential Phase Shift Keying* – diferenciální klíčování fázovým posuvem
 - **QPSK** – *Quadrature Phase Shift Keying* – kvadrurní klíčování fázovým posuvem
- Formáty kombinující modulování amplitudy, fáze a polarizaci signálu:
 - **PM-QPSK** – *Polarization Multiplexing QPSK* – polarizační multiplex QPSK
 - **QAM** – *Quadrature Amplitude Modulation* – kvadrurní amplitudová modulace
 - 16-QAM, 64-QAM.
- Vícestavové modulace - *Multi-Carrier Modulations (MCM)*:
 - **OFDM** – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* – ortogonální multiplex s frekvenčním dělením
 - **DMT** – *Discrete Multi-Tone* – diskretní multitónová modulace
 - **VDMT** – *Vectored Discrete Multi-Tone* – vektorová diskretní multitónová modulace

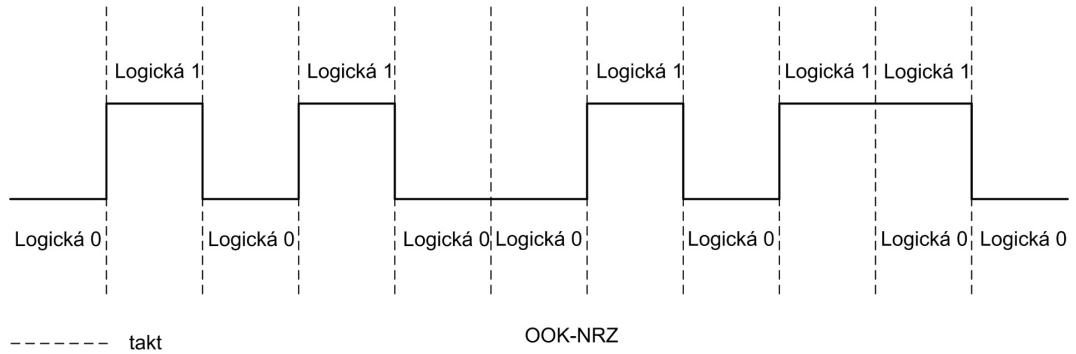
Výše zmíněné modulace (a mnoho dalších) se používají v optických komunikacích. Tyto formáty jsou perspektivní pro vysokorychlostní přenosové systémy.

Jedním s nejpoužívanějších formátů je modulace OOK, kde logické 1 je přiřazena určitá úroveň výkonu laseru. Logické 0 odpovídá absenci laserového pulzu. Optický symbol může trvat celý takt, který je určen pro jeden informační bit. V tomto případě se jedná o variantu modulace bez návratu k nule, *Non-Return to Zero (NRZ)*. Optický symbol může trvat pouze část bitového intervalu po dobu části taktu, v tomto případě se jedná o variantu s návratem k nule, *Return to Zero (RZ)*. Příkladem je situace, kdy symbol začíná s náběžnou hranou laserového pulzu a vrací se k nule v průběhu taktu, např. v polovině bitového intervalu.

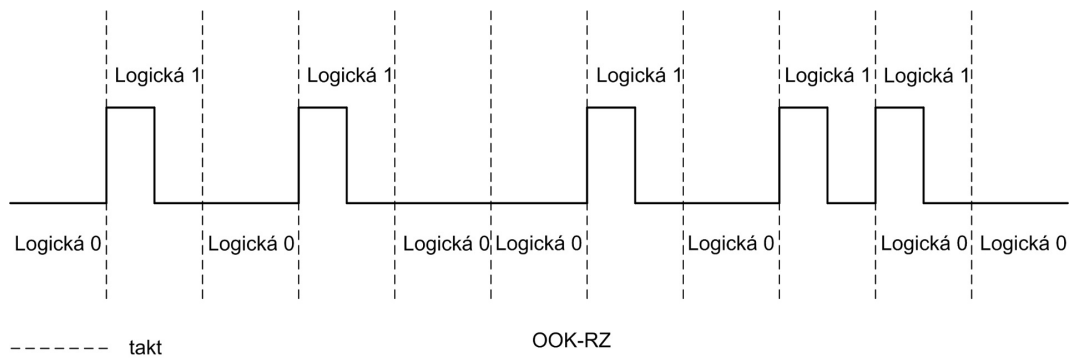
Tento příklad je jednou z mnoha možností implementace RZ. Symbol nemusí trvat přesně polovinu bitového intervalu, ani začínat/končit na náběžné/sestupné hraně optického pulzu.



Hlavní výhodou kratších optických symbolů je větší odolnost vůči disperzi (disperzi lze chápat jako rozšíření pulzu kvůli odlišné rychlosti nebo optické dráhy pro jednotlivé složky, tj. kmitočty, vlny záření), která vede k mezisymbolové interferenci – *Inter-Symbol Interference (ISI)*.



Princip modulace OOK-NRZ.



Princip modulace OOK-RZ.

1.2 CSRZ

Princip modulace

$E = m \cdot c^2$

U modulace *Carrier-Suppressed Return-to-Zero (CSRZ)* se fáze na optické nosné mění o π u každého bitu, bez ohledu na jeho logickou hodnotu, 0 nebo 1. Střídání fáze způsobí potlačení nosné frekvence optického záření. Ve frekvenčním spektru na nosné frekvenci není výkonová špička. Energie se přenáší hlavně na okolních frekvencích, kde je mnohem nižší. V praxi to znamená snížení požadavků na optický výkon na centrální frekvenci spektra modulace.

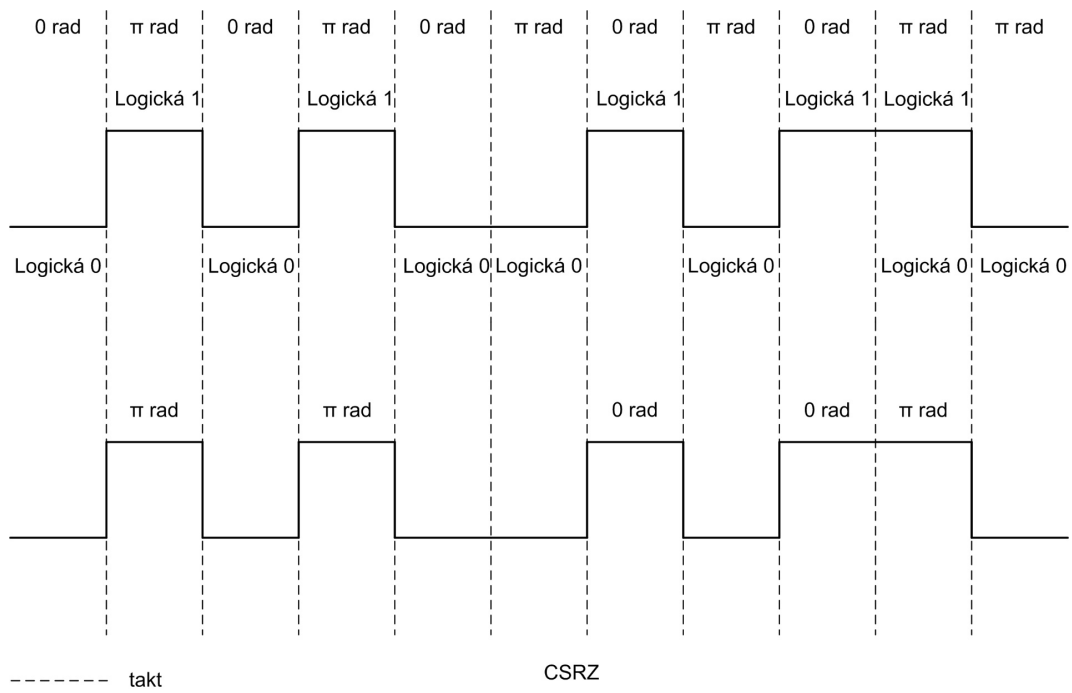
i

Fáze binární sekvence se odečtou, hlavní špička na nosné frekvenci je potlačena a díky tomu dochází ke snížení výkonu, který je distribuován hlavně v jiných částech spektra. Intenzita pole klesá na nulu mezi po sobě následujícími bity (RZ) a fáze elektromagnetického záření se posouvá o hodnotu π mezi sousedními bity. Například pokud fáze signálu v případě sudých symbolů (bit číslo $2n$) je nulová, fáze záření pro liché symboly ($2n + 1$) bude π .

Výhody

+

- V porovnání s RZ-OOK je CSRZ-OOK považována za více „tolerantní“ k filtrování a odolnější vůči chromatické disperzi, především díky užšímu spektru.
 - CSRZ signály mají potlačenou výkonovou špičku na nosné frekvenci – výkon na nosné je nulový.
-



Princip modulace CSRZ.

1.3 Kombinované vysílače (transceivery) pro optické modulace

$E = m \cdot c^2$

Transceiver je zařízení, které skládá z vysílače a přijímače, které sdílejí elektronické obvody a/nebo společné pouzdro. Transceivery zajišťují modulaci, kódování signálu, který se navazuje do přenosového média, např. optické vlákno (transceiver v tomto případě pracuje jako vysílač). Další úlohou je příjem dat z opačné strany, zajišťuje detekci, demodulaci, dekódování (pracuje jako přijímač).



V případě přenosu v obou směrech (např. duplexní přenos) každý transceiver vysílá i přijímá data (např. střídavě, nebo ve stejnou dobu v duplexu).

Jako zdroj symbolů v optických sítích může vysílací část používat laser; přijímač obsahuje fotodiodu, která převádí optický signál na elektrický signál. Ten se dále zpracovává např. *digitálním signálovým procesorem (DSP)*.

Kombinované vysílače (transceivery) pro modulaci CSRZ



Každý následující binární symbol má fázi posunutou o π . Mach-Zehnderův modulátor, *Mach-Zehnder modulator (MZM)*, se používá k vytvoření symbolů, které mají stejný tvar a posunutou fázi. Symbolová rychlost je stejná jako rychlost informačního signálu.



Informační signál v podobě elektronických pulzů vstupuje do modulátoru a na základě kontrolního signálu se vytváří laserové pulzy s danou fází.

- NRZ vysílač využívá laser pracující v kontinuálním režimu s externí modulací Mach-Zehnder modulátorem. (Kontinuální režim práce je emise elektromagnetického pole, jehož časový vývoj je spojitý. Opakem je pulzní režim, ve kterém laser vysílá pouze v určitých časových intervalech.) Je nutné nastavit parametry, jako jsou bitová rychlost, kmitočet, šířka pásma pro poloviční výkon - *full width at half maximum (FWHM)*, výstupní výkon laseru, vložné ztráty modulátoru a další.
- U RZ, na rozdíl od NRZ, se používá kosinový formát v elektrickém generátoru (angl. raised cosine). Jedná se o úzkopropustní filtr, který se používá pro tvarování pulzů v digitálních modulacích. Nenulová část frekvenčního spektra je funkce kosinus, která je nad horizontální osou.
- U CSRZ se optický signál NRZ následovně moduluje druhým MZM, který je ovládán sinusoidou o kmitočtu, která je poloviční hodnotou bitové rychlosti.
- Dva sousední bity se vyznačují fázovým posunem o π za účelem potlačení nosné u generovaného modulovaného signálu CSRZ.

- V případě NRZ, RZ a CSRZ se používá komplexní modulátor s fotodetektořem, elektrickým zesilovačem a filtrem.
-

1.4 Modulace AMI

V telekomunikacích se používají linkové kódy, u kterých jsou podstatné dvě nenulové napěťové úrovně s opačnou polaritou. Linkový kód je způsob reprezentace digitálního signálu pro přenos elektrickým kabelem s použitím jednoznačného funkčního přiřazení logickým bitům několika úrovní fyzikální veličiny (většinou se jedná o intenzitu záření, amplitudu), bez nutnosti složitých algoritmů pro vytvoření symbolů. Kódová slova se liší opačnou polaritou (otočenou fází) záření za účelem minimalizace disparity (poměru počtu symbolů s danou polaritou k počtu symbolů s opačnou polaritou) delších sekvencí logických symbolů.

Princip modulace

Nejjednodušším příkladem „paired disparity code“ je *Alternate Mark Inversion (AMI)*. Tato modulace předpokládá tři logické úrovně, kterým odpovídají dvě bipolární úrovně označovány jako „+“ a „-“. Třetím stavem je nula.

$E = m \cdot c^2$

Logické nule odpovídá stav absence optického pulzu (nulové napětí elektrického pulzu). Logickou jedničku reprezentuje laserový pulz, jehož fáze je pro každou další jedničku otočená do protifáze (tomu odpovídá kladné a záporné napětí u elektrických pulzů). Binární jedničky se tedy říká „značka“ (mark), binární nule se říká „mezera“ (space).

Výhody

Hlavní výhody linkových kódů s bipolárním kódováním:

+

- Použití bipolárního kódu u metalických vedení zabraňuje nárůstu stejnosměrné DC složky a kabel, ve kterém se přenáší signál, lze použít i na větší vzdálenost.
- AMI pomáhá udržovat synchronizaci mezi vysílačem a přijímačem – v případě dlouhých sekvencí logických jedniček, které jsou problematické pro NRZ variantu (pro každou jedničku je jiná polarizace, otočená fáze nebo úroveň napětí). Dodatečné přenosové medium pro přenos taktu není nutné.
- Detekce chyb. AMI signál se obnovuje v pravidelných intervalech. Parametr *Signal to Noise Ratio (SNR)* - odstup signálu od šumu - a parametr *Bit Error Rate (BER)* - bitová chybovost - poskytují informaci o nárůstu chybovosti. Například jedničku může přijímač chybně vyhodnotit jako nulu, nulu naopak jako kladné napětí nebo optický výkon. AMI umožňuje detekci jedné chyby v dané sekvenci díky tomu, že se pozná, kdy se poruší princip bipolarity (každý další nenulový symbol má otočenou polaritu).

Nevýhody



- Dlouhé sekvence binárních nul jsou problematické z důvodu možné ztráty synchronizace (obnovy taktu).
-



Řešením je vkládání logické jedničky po každé sekvenci sedmi logických nul za účelem udržení synchronizace. Během dekódování je tento symbol odstraněn.

1.5 Modulace DB

Princip modulace

Duobinární modulace (DB) má tři logické stavy.

$E = m \cdot c^2$

Logická (binární) nula představuje absenci laserového pulzu; logická (binární) jednička představuje laserový pulz se střídající se fází, která je určována na základě předchozích symbolů následujícím způsobem.

Fáze binárního symbolu je posunuta o π , pokud nastane lichý počet logických nul mezi dvěma logickými jedničkami.

Princip DB modulace může být kombinován s principem RZ nebo NRZ.

- *Non-return-to-zero (NRZ)* – logická jednička je po dobu celého bitového intervalu, logická nula představuje absenci laserového pulzu.
- *Return-to-zero (RZ)* – logická jednička je po určitou dobu bitového intervalu, logická nula představuje absenci laserového pulzu.

i

Zkracování délky pulzu vůči délce symbolu (návrat k nule) je výhodné zejména v případě dvou a více logických jedniček po sobě. Tímto způsobem lze vyřešit problém synchronizace logických jedniček.

Výhody

Výhody DB:

+

- Vysoká odolnost na chromatickou disperzi – *chromatic dispersion (CD)*
- Jednoduché úzkopásmové filtrování (DB má úzké spektrum), které lze přirovnat ke spektru modulace *Differential Quadrature Phase Shift Keying (DQPSK)*. Tento formát je vhodný pro DWDM sítě s úzkou kanálovou roztečí, např. 12,5 GHz.
- DB je jediný intenzitní modulační formát, který je stabilní na větších vzdálenostech, např. 130 km bez obnovy. Výkonnost modulace DB lze přirovnat k výkonnosti fázových modulací, zejména DQPSK, která bude vysvětlena později.
- DB je efektivnější než NRZ-DQPSK a CSRZ-DQPSK ve smyslu požadavků na finanční náklady a konstrukci vysílače.

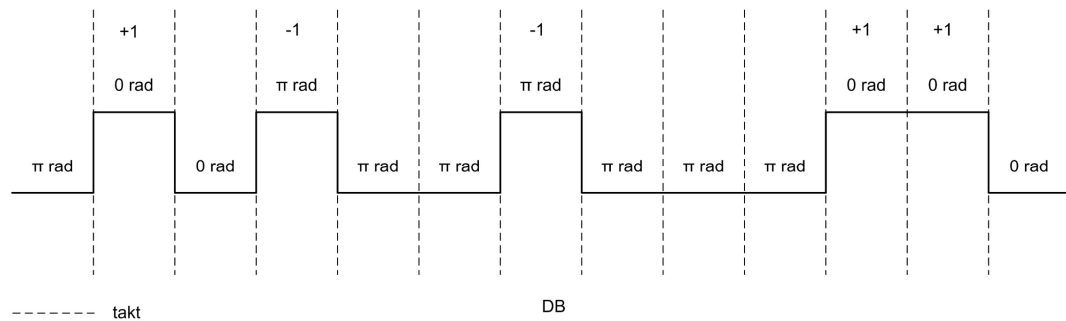
Konstrukce transceiveru:



Vysílač DB se skládá z dvouramenného amplitudového MZM, který zpracovává dva elektrické vstupy:

- První představuje standardní elektrický signál – pseudonáhodná binární sekvence, která prochází NRZ kodérem a dolní propustí (filtrem)
- Druhý vstup provádí logickou operaci NOT na logickém vstupu, kterým signál prochází směrem k NRZ kodéru a elektrickému filtru
- Zdrojem optického záření, podobně jako u NRZ, je laser pracující v kontinuálním režimu.

Na obrázku: +1 odpovídá fázi 0; -1 odpovídá fázi π a její lichým násobkům.



Princip DB modulace – fáze symbolu se posouvá o π radiánů, pokud nastane lichý počet binárních nul (1, 3, 5...).

2 Fázové modulace: DPSK a QPSK

2.1 DPSK

Princip modulace

Podobně jako u OOK lze DPSK realizovat ve dvou variantách RZ a NRZ.

$E = m \cdot c^2$

Jedná se o typ fázové modulace, která mění fázi nosné vlny. Princip modulace je následující.

- Otočení fáze o 180 stupňů nastane pro logickou jedničku.
- Pro logickou nulu se fáze neotáčí, zůstává stejná jako pro předchozí symbol.

Výhody

+

Hlavní výhodou DPSK je intenzitní zlepšení o 3 dB, které znamená lepší citlivost přijímače ve srovnání s OOK modulací. Optický výkon pro jednotlivé modulační stavy je nižší z důvodu modulování fázových rozdílů namísto absolutních hodnot fáze nebo dokonce amplitudy, u které špičky frekvenčního spektra mají mnohem širší poloviční šířku FWHM.

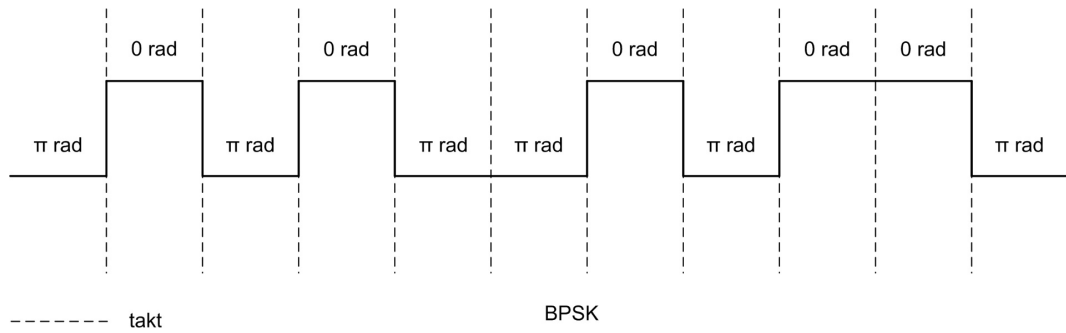
Rozdílná efektivita v případě NRZ-DPSK a RZ-DPSK je dána primárně šířkou spektra, která je větší v případě formátu RZ-DPSK.

Kombinované vysílače pro DPSK modulaci

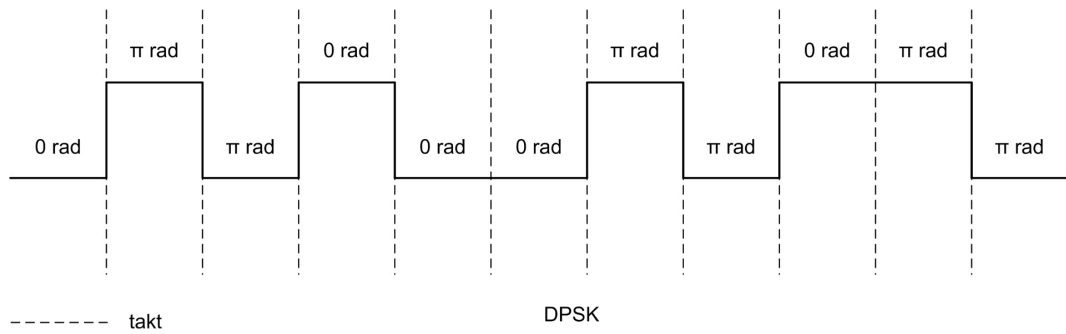
Konstrukce transceiveru:

i

- Vysílač NRZ-DPSK je podobný vysílači u amplitudových NRZ. Místo MZM se používá fázový modulátor s fázovým posuvem o 180°.
- Filtř typu dolní propust se používá pro vyrovnání nepřesné konverze z elektrického signálu na optický.
- Vysílač RZ-DPSK obsahuje druhý modulátor pro generaci výsledných RZ pulzů.
- Přijímač DPSK se skládá ze zpožďovacího interferometru pro dekódování a vyváženého přijímače, který je navržen jako komplexní přijímač, ve kterém je elektrický výstup prvního sub-přijímače sečten s invertovaným výsledkem druhého sub-přijímače.



Princip modulace BPSK – binárním nulám a jedničkám odpovídají stavy fáze posunuté vzhledem k sobě o π , např. pokud je logické nule přiřazena fáze π , binární jedničce pak bude přiřazena fáze 0 radiánů.



Princip modulace DPSK – pro každou logickou jedničku dochází k posunu fáze o π . Logická nula neposouvá fázi.

2.2 Modulace QPSK a DQPSK

Princip modulace

Differential Quadrature Phase-Shift Keying (DQPSK) – jedná se o vícestavovou modulaci s kvadrurním klíčováním fázovým posuvem.

$E = m \cdot c^2$

QPSK lze realizovat jako dva nezávislé BPSK systémy, vyznačuje se podobnou kvalitou přenosu, ale nabízí dvojnásobnou spektrální efektivitu.

- Dvojitým bitům se přiřazuje určitá fáze, například:
 - 00 → 45°
 - 01 → 135°
 - 10 → 315°
 - 11 → 225°

i

Existuje mnoho variant QPSK – dvojici bitů lze přiřadit i jiné stavy fáze; jiné mohou být také sousední dvojice.

$E = m \cdot c^2$

- V případě modulace DQPSK odpovídají dvojitým bitům dané fázové posuny (nikoliv konkrétní hodnoty fáze). Uvádí se fázový posun vůči počáteční fázi nebo lze také uvažovat fázový posun o 90° mezi sousedními symboly.
- Pro jednoduchost výkladu můžeme předpokládat počáteční fázi 0° (v praxi nemusí být nulová).
 - 00 → posun o 0° vůči počáteční hodnotě fáze.
 - 01 → posun o 90° vůči počáteční hodnotě fáze.
 - 10 → posun o 180° vůči počáteční hodnotě fáze.
 - 11 → posun o 270° vůči počáteční hodnotě fáze.

Výhody

+

- Symbolová rychlost je dvakrát pomalejší než bitová rychlost
- DQPSK se vyznačuje dobrými vlastnostmi ve smyslu odstupu signálu od šumu – *Signal to Noise Ratio (SNR)*. Úroveň výkonu užitečného signálu je mnohonásobně vyšší, než je úroveň šumu
- Je odolná proti polarizační vidové disperzi díky delším symbolům

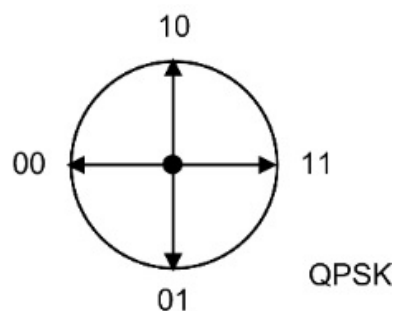
- Zvýšená odolnost proti chromatické disperzi
- Úzké optické spektrum
- NRZ-DQPSK je perspektivní pro vysokorychlostní přenosy v řádu terabitů
- DQPSK je vhodná pro 40 Gbit/s *Pasivní Optické Sítě (PON)* sítě
- RZ-DQPSK umožňuje prodloužit optický dosah
- RZ-DPSK je odolná proti optickým nelinearitám, pokud uvažujeme jeden 160 Gbit/s kanál
- U DQPSK lze největší hodnotu optického Q-faktoru popisujícího kvalitu přenosu v optickém kanále dosáhnout pro variantu RZ-DQPSK.

Kombinované vysílače (transceivery)

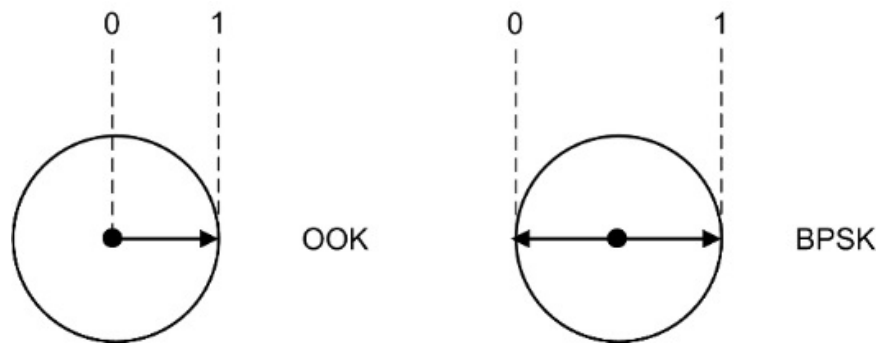
Konstrukce transceiveru:



- NRZ-DQPSK vysílač se skládá ze dvou kodérů: fázový a kvadrurní signál je konvertován na elektrické průběhy, které řídí dva MZM modulátory.
- Laser pracující v kontinuálním režimu se používá pro oba MZM. Výstup jednoho z nich prochází fázovým modulátorem, dochází k dodatečnému posunu fáze o 90° , který je požadován pro kvadrurní složku.
- Oba signály se kombinují a vytváří modulovaný DQPSK signál.
- Transceiver dále obsahuje dvě dolní propusti mezi generátorem elektrického signálu a MZM pro vylepšení konverze binárního signálu na elektrický.
- U RZ-DQPSK se používá dodatečný MZM pro realizaci návratu k nule.
- DQPSK přijímač používá dva DPSK přijímače pro příjem kvadrurního a fázového signálu. Každý se skládá s laditelných MZI a dvou PIN detektorů.



Princip QPSK modulace. Příkladový konstelační diagram. Dvojcím bitů se přiřazují jednotlivé symboly. Jelikož lze vytvořit čtyři kombinace dvou bitů, modulace má čtyři stavy.



Příkladový konstelační diagram OOK a BPSK modulace. Fáze a amplituda jsou zobrazeny v konstelačním diagramu.

3 Pokročilé aspekty optických modulací pro dosažení vysoké přenosové rychlosti a odolnost vůči degradaci signálu

3.1 Polarizační multiplex u QPSK modulace pro přenosové rychlosti v řádu terabitů

Myšlenka multiplexování modulačních stavů polarizace

i

Polarizační multiplex, *Polarization Division Multiplexing (PDM)*, je známý v anglické literatuře také jako duální polarizace „dual polarization“ nebo ortogonální polarizace „orthogonal polarization“. Ortogonální polarizační složky lze chápat jako nezávislé, vzájemně se neovlivňující složky polarizace, v ideálním případě složky, které jsou na sebe kolmé. PDM-QPSK je modulační formát navržený primárně pro vysokorychlostní systémy s rychlostí 100 Gbit/s na kanál.

PDM-QPSK je často používán v kombinaci s koherentní detekcí (způsob dekodování). Koherentní demodulace se používá pro demodulaci fáze a frekvence, synchronně s nosnou. U nekoherentní detekce se problém této synchronizace neřeší. Koherentní světlo je světlo, jehož fázi lze předvídat a jehož fázový průběh lze udržovat v každé periodě elektromagnetické vlny. Lze také hovořit o korelaci fáze daného zdroje vůči referenčnímu koherentnímu zdroji záření. V opačném případě se fáze začíná měnit náhodně.

Výhody

Výhody:

+

- Vysoká spektrální účinnost s ohledem na zpomalení symbolové rychlosti vůči bitové rychlosti
- PDM-QPSK je hlavním kandidátem pro transpondéry 100 Gbit/s, z důvodu vysoké tolerance zkreslení signálu
- PDM-QPSK je lepší než DPQSK z pohledu ceny implementace
- Tato modulace je velice výkonná u systému 100 Gbit/s na kanál, s kanálovou roztečí 50 GHz, u kterých je možný přenos na vzdálenost stovek kilometrů, za předpokladu použití vhodné kompenzační techniky pro management disperze a dále za předpokladu použití linkových zesilovačů.

Nevýhody

Nevýhody a nejpodstatnější omezení:



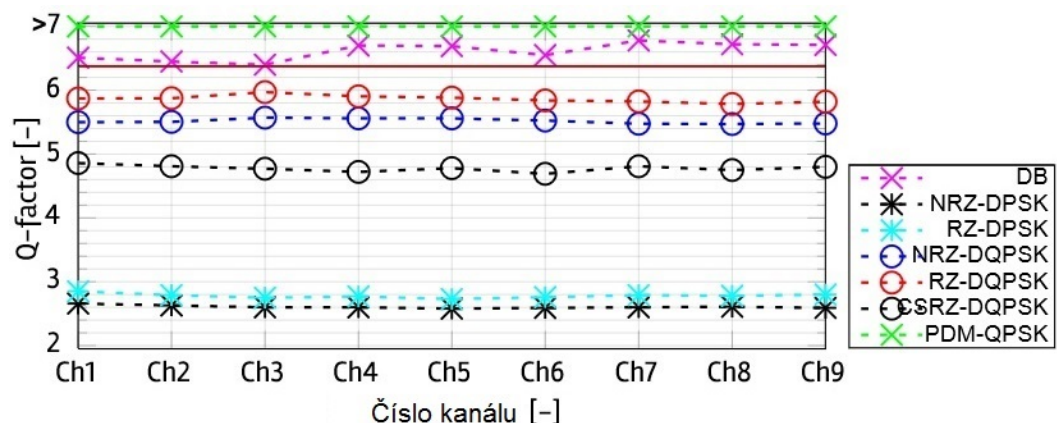
- Finanční náklady na praktickou implementaci, složité transceivery
- Vysoká spotřeba elektrické energie
- Požadavek na rychlejší signálové procesory
- Nutné A/D konvertory

Transceivery

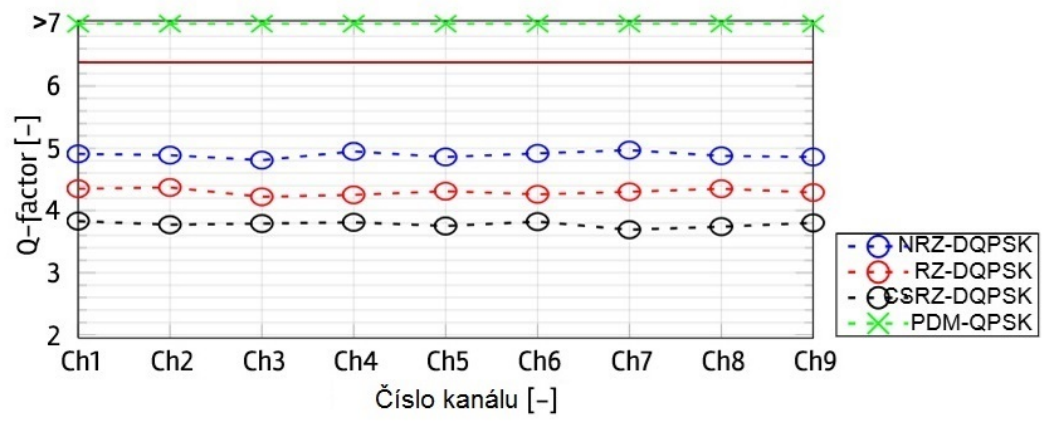
Konstrukce transceiveru:



- Vysílač PDM-QPSK se musí vypořádat se čtyřmi složkami signálu: fáze, kvadrurní složka, obě pro dva polarizační stavy.
- Pro konverzi binárního signálu na elektrický je nutno použít dolní propust – Besselův filtr. Besselův filtr je filtr, ve kterém je fázový posun je úměrný frekvenci.
- Čtyři elektrické signály vstupují do dvou modulátorů QPSK (dva do každého modulátoru).
- Modulovaný signál PDM-QPSK je vytvářen tak, že výstupní signál z jednoho modulátoru projde polarizátorem a následně je sečten se signálem z druhého modulátoru QPSK.
- Přijímač PDM-QPSK obsahuje mnoho prvků, např. 90° hybridní oscilátor, čtyři fotodiody PIN pro koherentní detekci, transimpedanční zesilovač (konvertor proudu na napětí pracující jako operační zesilovač), elektrické filtry, elektronický kompenzátor disperze a rozdělovač fázové a kvadrurní složky a dále polarizačních složek.



Přenos 40 Gbit/s v jednovidovém optickém vlákne s kanálovou roztečí 100 GHz na vzdálenost 12 km. Nejlepších výsledků je dosaženo pro formát PDM-QPSK [2].



Přenos 40 Gbit/s v jednovířovém optickém vlákně s kanálovou roztečí 50 GHz na vzdálenost 12 km. Nejlepších výsledků je dosaženo opět pro formát PDM-QPSK [2].

3.2 Konvergence sítí: koexistence amplitudové a fázové modulace v jednom vlákně

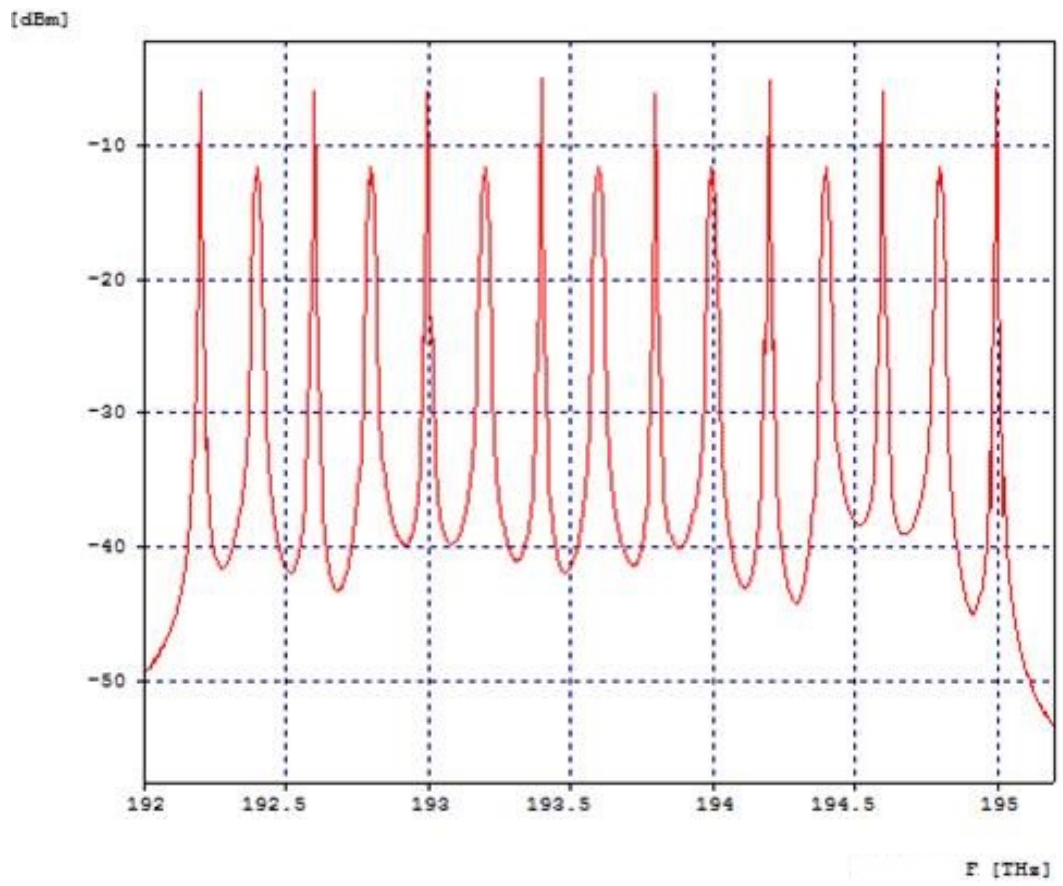
Požadavky na větší informační kapacitu a vyšší přenosovou rychlost vynutí postupný upgrade stávajících optických systémů. Dalším trendem je provozování více systémů v jednom optickém vlákně. Přidání nového systému vyžaduje plánování efektivnějšího využití dostupné šířky pásma. V současné době se nejčastěji uvažuje hlavně o koexistenci dvou systémů s vlnovým multiplexem:

- *Coarse Wavelength Division Multiplexing* systém (**CWDM**) – systém s hrubým vlnovým dělením – rozestupy použitých frekvencí (kanálová rozteč) jsou v řádu několika až několika desítek nanometrů.
- *Dense Wavelength Division Multiplexing* systém (**DWDM**) – systém s hustým vlnovým dělením – rozestupy použitých frekvencí jsou menší než jeden nanometr.



Ve většině případů každý systém používá svůj vlastní (jiný) modulační formát.

- Příklad: hybridní 10G/40G DWDM systém
 - Původně 10G DWDM systém
 - 15x10 Gbit/s, NRZ-OOK, rozteč 50 GHz.
 - 6x80 km SSMF (dvoufázové zesilovače, post-kompenzace disperze).
- Hybridní DWDM 10G/40G systém s prokládáním kanálů
 - Kombinace se systémem 7x40 Gbit/s.
 - Duobinární modulace, P-DPSK, RZ-DQPSK.
 - Vliv původních 10 Gbit/s kanálů na nové kanály 40 Gbit/s.
 - Potenciálním problémem je křížová modulace fáze – *Cross Phase Modulation (XPM)*.



Optické spektrum DWDM systému s prokládáním kanálů.

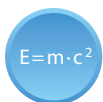
3.3 Křížová fázová modulace způsobená koexistencí fázové a amplitudové modulace



Provozování dvou nebo více systémů v jednom optickém vlákně vyžaduje nutnost splnění několika podmínek. Ve většině případů používá stávající, starší systém amplitudovou modulaci, nový systém má používat jeden z moderních modulačních formátů (fázová nebo vícestavová modulace). Kanály obou systémů lze prokládat za účelem zefektivnění využití pásma starého systému. Potenciálním problémem jsou přeslechy energie z kanálů, které používají amplitudovou modulaci, do kanálů s fázovou modulací. Tento přeslech definujeme jako křížovou fázovou modulaci, *Cross-phase modulation (XPM)*.



Důvodem vzniku XPM je velká energie, kterou přenáší amplitudová modulace, která se naváže do nízkoenergetických fázových kanálů vlnového multiplexu.



Podstatou křížové fázové modulace, *Cross-phase modulation (XPM)*, je změna fáze optického záření na určité vlnové délce v důsledku interakce záření na jiné vlnové délce s nelineárním mediem.

Změny fáze lze docílit následujícím způsobem:

- Působením Kerrova jevu, který způsobí změnu hodnoty indexu lomu látky po přiložení elektromagnetického pole, např. vysoké intenzity optického záření (v případě optických vláken se jedná o desítky dBm).
- Změny hodnoty indexu lomu mohou být způsobeny polovodičovým optickým zesilovačem – *Semiconductor Optical Amplifier (SOA)*

3.4 Zamezení nelineárních jevů způsobených pokročilými modulacemi



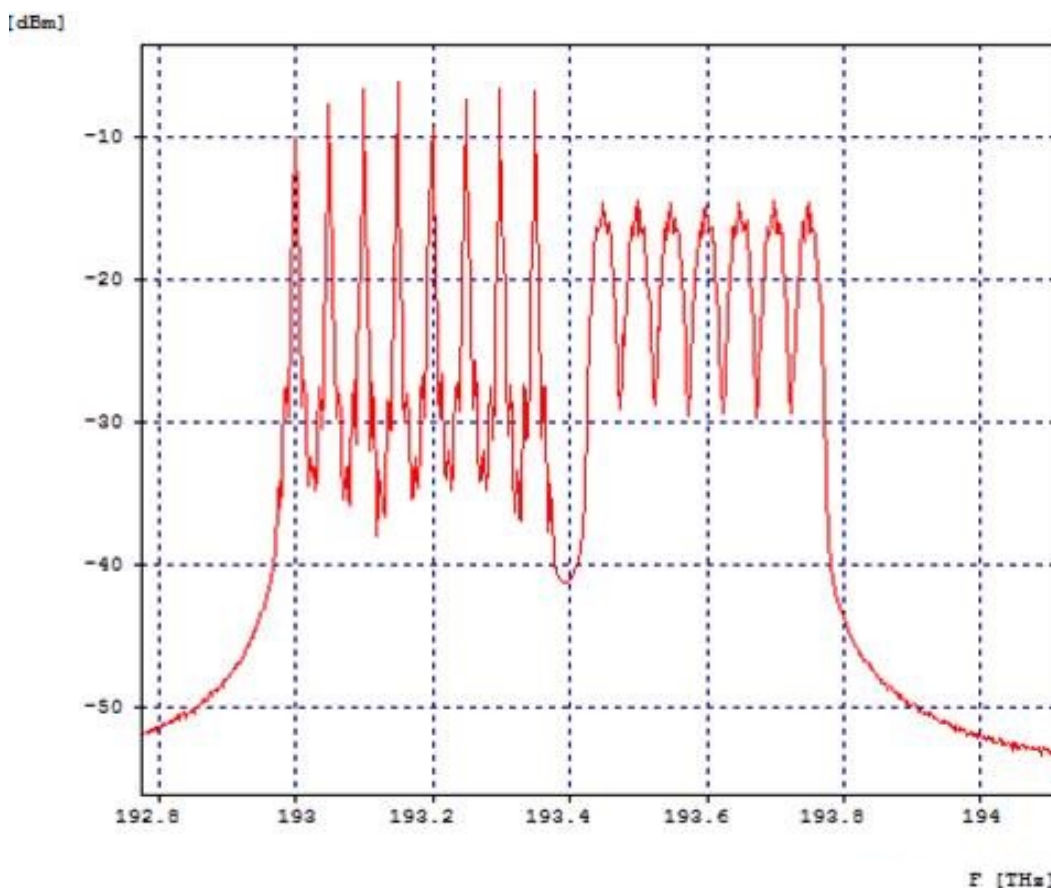
XPM – křížová modulace fáze je nežádoucím jevem v telekomunikačních systémech s vlnovým multiplexováním, způsobuje zkreslení přenosu a vede k přeslechům mezi kanály a konverze vlnové délky.

Možným řešením problému XPM je oddělení pásem dvou systémů, z kterých každý používá jinou modulaci. Pro oddělení dvou skupin kanálů se používá ochranné pásmo, ve kterém nejsou přenosové kanály (nejsou používané vlnové délky):

- Hybridní DWDM 10G/40G s ochranným pásmem



Spektrální oddělení systémů 10G a 40G ochranným pásmem pomáhá omezovat křížovou fázovou modulaci – přeslechy od 10G systému.



Ochranné pásmo (100 GHz), které rozděljuje dva systémy (RZ-DQPSK a P-DPSK 40G).

3.5 Odolnost digitálních modulací vůči disperzi při vysokých rychlostech

- Dalším úkolem je snížení chromatické disperze, která je důvodem různé rychlosti jednotlivých frekvenčních složek obsažených v optickém pulzu.
- Formát RZ je méně náchylný na disperzi než formát NRZ a více vhodný pro filtrování, hlavně díky užšímu spektru.

3.6 OFDM – vícestavová modulace – princip, aplikace

Princip ortogonálního multiplexu

$E = m \cdot c^2$

Ortogonální multiplex s frekvenčním dělením, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)* je metoda kódování digitálních dat s použitím multiplexování nosné frekvence. Tento modulační formát patří mezi modulace s více nosnými, *Multi-Carrier Modulations (MCM)*. Jinými slovy u této modulace se moduluje více frekvencí. Ortogonální složky lze chápat jako nezávislé, vzájemně se neovlivňující složky, v ideálním případě složky, které jsou na sebe kolmé.

OFDM kanály jsou ortogonální. Díky tomu modulační kanály spolu neinterferují ani se nepřekrývají (ortogonální složky se nescítávají).

Velké množství ortogonálních subkanálů s malou roztečí se používá pro současný přenos dat v několika kanálech. Každý subkanál je modulován konvenční modulační metodou (např. PSK nebo QAM) při nízké symbolové rychlosti, podobně jako u modulace s jednou nosnou vlnovou délkou.



Zdroj dat se dodatečně kóduje konvolučním kódem pro snížení chybovosti během příjmu symbolů. OFDM se realizuje s použitím DSP. Konvoluční kód je samoopravný kód používaný v telekomunikacích, u kterého každý m-bitový informační symbol je zakódován pomocí n-bitového symbolu, jehož výhodou je schopnost zrekonstruovat původní data, pokud je kódovací algoritmus schopen opravit daný druh chyb a jeho množství.

Aplikace

- *Long Term Evolution (LTE)* – standard používaný v mobilních sítích
 - Šířka pásma 1 MHz až 20 MHz
 - Kompresi MPEG2 nebo MPEG 4
 - Přenosová rychlost ~300 Mbit/s (downlink) – stahování, 50 Mbit/s (uplink) – upload
- *Digital Video Broadcasting - Terrestrial (DVB-T)* – standard pro příjem video
 - Počet sub-kanálů 6817
 - Kanálová rozteč 1116 Hz
 - TV pásmo 8 MHz
 - Modulace v sub-kanálech 4-PSK, 16-QAM, 64-QAM

- Přenosová rychlost 19 až 25 Mbit/s
- *Wireless LAN (WLAN)* – bezdrátové lokální síť
- *Digital Audio Broadcasting (DAB)* - digitální audio vysílání

3.7 OFDM – vícestavová modulace – parametry, výhody, meze

Parametry

i

- Dostupné pásmo B se rozděluje na N subkanálů.
 - Šířka každého subkanálu je $\Delta f = B/N$.
 - Modulační rychlost je $\Delta f = 1/T$, kde T je délka trvání jednoho symbolu.
-

Výhody

+

- Spektrální účinnost, podíl přenosové rychlosti a šířky pásma
 - Zvyšování počtu subkanálů při zachování stejné celkové přenosové rychlosti umožňuje snížení modulační rychlosti v jednotlivých subkanálech anebo prodloužení doby trvání symbolů.
 - Umožňuje snižování mezisymbolové interference, *Inter-Symbol Interference (ISI)*
-

Nevýhody

–

- Je nutno sledovat a udržovat rozestupy mezi subkanály
 - Pokud rozteč kanálu není konstantní (tento jev je známý v literatuře jako jitter), je narušen princip ortogonálních kanálů a vzniká mezisymbolová interference a mezikanálová interference *Inter-Channel Interference (ICI)*.
 - ISI a ICI vedou ke zvýšení chybovosti *Bit Error Rate (BER)*
-

3.8 VDMT – pokročilá vektorová modulace – princip, aplikace

Princip modulace

$E = m \cdot c^2$

Discrete Multi-Tone (DMT) je modulace s více nosnými. Lze ji realizovat pomocí DSP. Subkanály využívají modulace PSK nebo QAM, podobně jako u OFDM. Na rozdíl od OFDM umožňuje DMT použití různých modulačních schémat nebo dokonce různých typů modulace v každém subkanálu ortogonálního multiplexu.

Aplikace

- *Digital Subscriber Line (xDSL)*, digitální účastnické přípojky, které využívají metalické vedení:
 - *Asymmetric Digital Subscriber Line 2+ (ADSL2+)* – asymetrické DSL, šířka pásma 2,2 MHz, počet subkanálů 512, kanálová rozteč 4,3 kHz, modulace – QAM, max. celková bitová rychlost 30,72 Mbit/s
 - *Very High Speed DSL 2 (VDSL2)* – šířka pásma 30 MHz, počet subkanálů 3479, kanálová rozteč 8,625 kHz, modulace – QAM, max. celková bitová rychlost 417 Mbit/s

Vectored Discrete Multi-Tone (VDMT) – vektorová diskretní multitónová modulace.

$E = m \cdot c^2$

Pro směr downstream (směr přenosu k uživateli) je VDMT běžným řešením pro přípojky xDSL využívající metalické vedení. Je implementována u multiplexoru *Digital Subscriber Line Access Multiplexer (DSLAM)*.

- V DSLAM multiplexoru je informace o všech symbolech, které byly vyslány do metalického vedení (existuje vektor symbolů DMT – proto „vektorová DMT“).
- V DSLAM multiplexoru je informace o parametrech jednotlivých symetrických párů a přeslechových vazbách mezi nimi. Díky tomu je možné upravit DMT symboly na základě znalosti přenosového prostředí.
- Je nutná synchronizace všech DMT symbolů.
- Ve směru upstream (směr od uživatele k ústředně) je možné upravovat přenášené symboly v koncových terminálech uživatele.

Výhody



- VDMT je rozšířením modulace DMT, řeší problém *Multiple Input Multiple Output (MIMO)* – mnoho vstupů, mnoho výstupů, eliminuje přeslechy na vzdáleném konci, *Far End Crosstalk (FEXT)*.
 - *Near End Crosstalk (NEXT)*, přeslech na blízkém konci, je eliminován frekvenčním multiplexem.
-

3.9 Závěr



- Nejčastěji používanými modulacemi jsou amplitudové modulace (např. OOK, DB, CSRZ) a fázové modulace (např. BPSK, DPSK).
 - Fázové modulace, ve srovnání s amplitudovou modulací, pracují lépe (nižší chybovost pro danou rychlost) na úkor velmi složité konstrukce modulátoru.
 - Pro rychlosti větší než 10 Gbit/s je formátem, který lze považovat za dobrý kompromis mezi kvalitou přenosu a nároky na konstrukci modulátoru, modulace DB. Tento formát může přenášet data s rychlostí 40 Gbit/s na kanál s kanálovou roztečí 0,8 nm (jedná se tedy o systém DWDM). Fázové modulace ve většině případů vykazují lepší výsledky, zejména pro hustší kanálovou rozteč (0,4 nm–0,1 nm).
 - Vícestavové modulace (s více než dvěma stavy), např. QPSK, kombinují modulaci fáze a amplitudy (např. QAM) nebo fáze a polarizace (např. PM-QPSK). Tyto modulace se jeví jako perspektivní pro vysokorychlostní systémy a systémy přenosu na velké vzdálenosti.
 - Formáty využívající polarizační multiplexování mají výhodu v tom, že umožňují vysokou spektrální účinnost, optický dosah, dobré SNR vlastnosti a odolnost vůči disperzi.
 - Formát PDM-QPSK je perspektivní pro terabitové přenosy v případě nasazování nových vláken.
 - Za nejmodernější modulace s více nosnými se považuje OFDM a VDMT. Tyto modulace našly uplatnění v digitální televizi a v mobilních komunikacích u standardu LTE.
-