



TECH
pedia



MODERNÉ MODULAČNÉ
METÓDY

MICHAL LUCKI

Názov: Moderné modulačné metódy
Autor: Michal Lucki
Preložil: Renata Rybárová
Vydalo: České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Kontaktná adresa: Technická 2, Praha 6, Česká republika
Tel.: +420 224352084
Tlač: (iba elektronická)
Počet strán: 36
Edícia (vydanie): 1. vydanie, 2017
ISBN 978-80-01-06275-3

TechPedia

European Virtual Learning Platform for
Electrical and Information Engineering

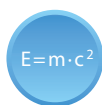
<http://www.techpedia.eu>



Tento projekt bol financovaný s podporou Európskej Komisie.

Táto publikácia (dokument) reprezentuje výlučne názor autora a Komisia nezodpovedá za akékoľvek použitie informácií obsiahnutých v tejto publikácii (dokumente).

VYSVETLIVKY



Definícia



Zaujímavosť



Poznámka



Príklad



Zhrnutie



Výhody



Nevýhody

ANOTÁCIA

Vhodná modulácia je nutná na prispôsobenie signálu, aby mohol byť prenášaný optickým vláknom. Dosiachnutie vysokej prenosovej rýchlosti a veľkej informačnej kapacity prenosových systémov je spojené s použitím vhodných modulačných formátov. Každá modulácia sa vykonáva iným spôsobom a je vhodná pre určité typy prenosov. Z toho dôvodu je nutné zoznámiť študentov s princípmi pokročilých modulačných formátov, ktoré sú súčasťou každého procesu optimalizácie moderných vysokorýchlostných optických prenosových sietí.

CIELE

Cieľom tohto výukového materiálu je prezentovať prehľad o digitálnych modulačných formátoch, vrátane amplitúdovej, fázovej, viacstavovej modulácie a pokročilých moduláciách kombinujúcich viac parametrov. Popis zahŕňa princípy jednotlivých modulácií, ich výhody a niektoré nevýhody. Čitateľ by mal byť schopný posúdiť, ktorá modulácia je vhodná pre danú oblasť použitia (s ohľadom na potrebnú dĺžku trasy, informačnú kapacitu, vzdialenosť medzi frekvenčnými kanálmi a ďalšie).

LITERATÚRA

- [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	Digitálne amplitúdové modulácie: AMI, DB, CSRZ.....	8
1.1	Základné rozdelenie digitálnych optických modulácií.....	8
1.2	CSRZ.....	11
1.3	Kombinované vysielacie (transceivery) pre optické modulácie.....	13
1.4	Modulácia AMI.....	15
1.5	Modulácia DB.....	17
2	Fázové modulácie: DPSK a QPSK	19
2.1	DPSK.....	19
2.2	Modulácia QPSK a DQPSK.....	21
3	Pokročilé aspekty optických modulácií na dosiahnutie vysokej prenosovej rýchlosti a odolnosti voči degradácii signálu	24
3.1	Polarizačný multiplex pri QPSK modulácii pre prenosové rýchlosti v terabitoch... 24	
3.2	Konvergenie sietí. Koexistencia amplitúdovej a fázovej modulácie v jednom vlákne 27	
3.3	Křížová fázová modulácia spôsobená koexistenciou fázovej a amplitúdovej modulácie	29
3.4	Zamedzenie nelineárnych javov spôsobených pokročilými moduláciami.....	30
3.5	Odolnosť digitálnych modulácií voči disperzii pri vysokých rýchlostiach.....	31
3.6	OFDM – viacstavová modulácia – princíp, aplikácia	32
3.7	OFDM – viacstavová modulácia – parametre, výhody, obmedzenia.....	33
3.8	VDMT – pokročilá vektorová modulácia – princíp, aplikácia.....	34
3.9	Záver.....	36

1 Digitálne amplitúdové modulácie: AMI, DB, CSRZ

1.1 Základné rozdelenie digitálnych optických modulácií



Informácie môžu byť prenášané v optickom komunikačnom systéme vo forme optických symbolov, ktoré sú vytvorené modulovaným zdrojom optického zariadenia.

Ciele

- Základným cieľom modulácie je prispôsobenie informačného signálu do formy, ktorú možno prenášať v informačnom kanáli.
- Ďalším cieľom je zníženie chromatickej disperzie, ktorá spôsobuje inú rýchlosť jednotlivých frekvenčných zložiek obsiahnutých v optickom impulze.
- V neposlednom rade je cieľom modulácie zabrániť vzniku problematických zhlukov logických núl alebo logických jednotiek, ktoré spôsobujú problémy s detekciou taktu.

Rozdelenie

Existuje veľa modulačných formátov, ktoré sa používajú predovšetkým v optických vláknových komunikačných systémoch. Dajú sa rozdeliť na základe parametra, ktorý je modulovaný – napr. amplitúda alebo fáza signálu.

- Amplitúdová modulácia:
 - **OOK** – *On-Off Keying* – bipolárna modulácia „svieti-nesvieti“
 - **AMI** – *Alternate Mark Inversion* – bipolárna modulácia
 - **DB** – *Duobinary Modulation* – duo binárna modulácia
 - **CRZ** – *Chirp Return to Zero*, modulácia čirpu s návratom k nule, chirp – angl. cvrkot, rozkmitanie
 - **CSRZ** – *Carrier Suppressed Return to Zero* – bipolárna modulácia s potlačenou nosnou a s návratom k nule
- Frekvenčná modulácia:
 - **OFDM** – *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* – ortogonálna multiplexová s frekvenčným delením

- **VDMT** – *Vectored Discrete Multi-Tone* – vektorová diskretná multitónová modulácia
- Fázová modulácia:
 - **PSK** – *Phase Shift Keying* – kľúčovanie fázovým posunom
 - **BPSK** – *Binary Phase Shift Keying* – binárne kľúčovanie fázovým posunom
 - **DPSK** – *Differential Phase Shift Keying* – diferenciálne kľúčovanie fázovým posunom
 - **QPSK** – *Quadrature Phase Shift Keying* – kvadrátorne kľúčovanie fázovým posunom
- Formáty kombinujúce modulovanie amplitúdy, fázy a polarizácie signálu:
 - **PM-QPSK** – *Polarization Multiplexing QPSK* – polarizačný multiplex QPSK
 - **QAM** – *Quadrature Amplitude Modulation* – kvadrátorna amplitúdová modulácia
 - 16-QAM, 64-QAM.
- Viacstavové modulácie - *Multi-Carrier Modulations (MCM)*:
 - **OFDM** – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* – ortogonálny multiplex s frekvenčným delením
 - **DMT** – *Discrete Multi-Tone* – diskretná multitónová modulácia
 - **VDMT** – *Vectored Discrete Multi-Tone* – vektorová diskretná multitónová modulácia

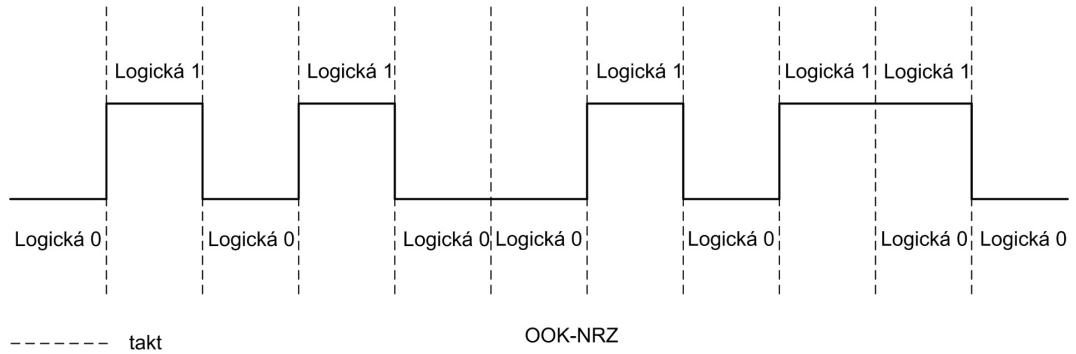
Vyššie zmienené modulácie (a mnoho ďalších) sa používajú v optických komunikáciách. Tieto formáty sú perspektívne pre vysokorýchlostné prenosové systémy.

Jedným z najpoužívanejších formátov modulácie je OOK, kde logickej 1 je priradená určitá úroveň výkonu laseru. Logickej 0 zodpovedá absencia laserového impulzu. Optický symbol môže trvať celý takt, ktorý je určený pre jeden informačný bit. V tomto prípade sa jedná o variant modulácie bez návratu k nule, *Non-Return to Zero (NRZ)*. Optický symbol môže trvať iba časť bitového intervalu (po dobu časti taktu). V tomto prípade sa jedná o variant s návratom k nule, *Return to Zero (RZ)*. Príkladom je situácia, kde symbol začína s nábežnou hranou laserového impulzu a vracia sa k nule v priebehu taktu, napr. v polovici bitového intervalu.

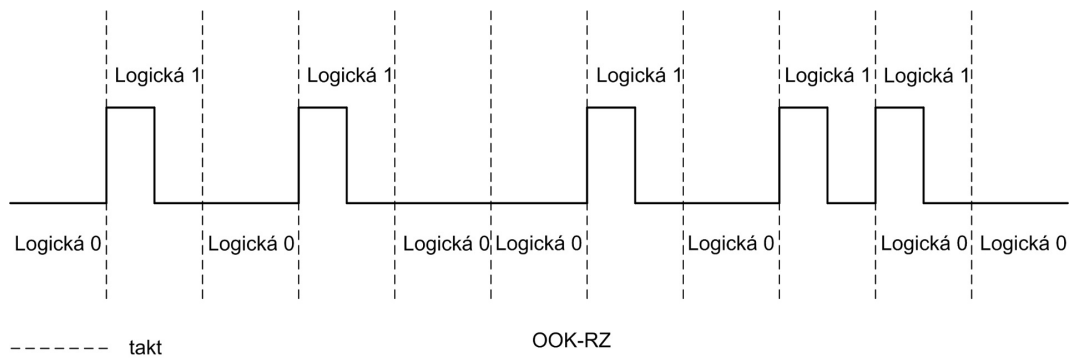
Tento príklad je jednou z mnohých možností implementácie RZ. Symbol nemusí trvať presne polovicu bitového intervalu ani začínať/končiť na nábežnej/zostupnej hrane optického impulzu.



Hlavnou výhodou kratších optických symbolov je väčšia odolnosť voči disperzii (disperzia sa dá chápať ako rozšírenie impulzu kvôli odlišnej rýchlosti alebo optickej dráhe jednotlivých zložiek, t.j. frekvencie, vidu žiarenia), ktorá vedie k medzisymbolovej interferencii – *Inter-Symbol Interference (ISI)*.



Princíp modulácie OOK-NRZ.



Princíp modulácie OOK-RZ.

1.2 CSRZ

Princíp modulácie

$E = m \cdot c^2$

Pri modulácii *Carrier-Suppressed Return-to-Zero (CSRZ)* sa mení fáza na optickej nosnej o π pri každom bite bez ohľadu na jeho logickú hodnotu 0 alebo 1. Striedanie fázy spôsobí potlačenie nosnej frekvencie optického žiarenia a efektívnejší manažment energie laseru.

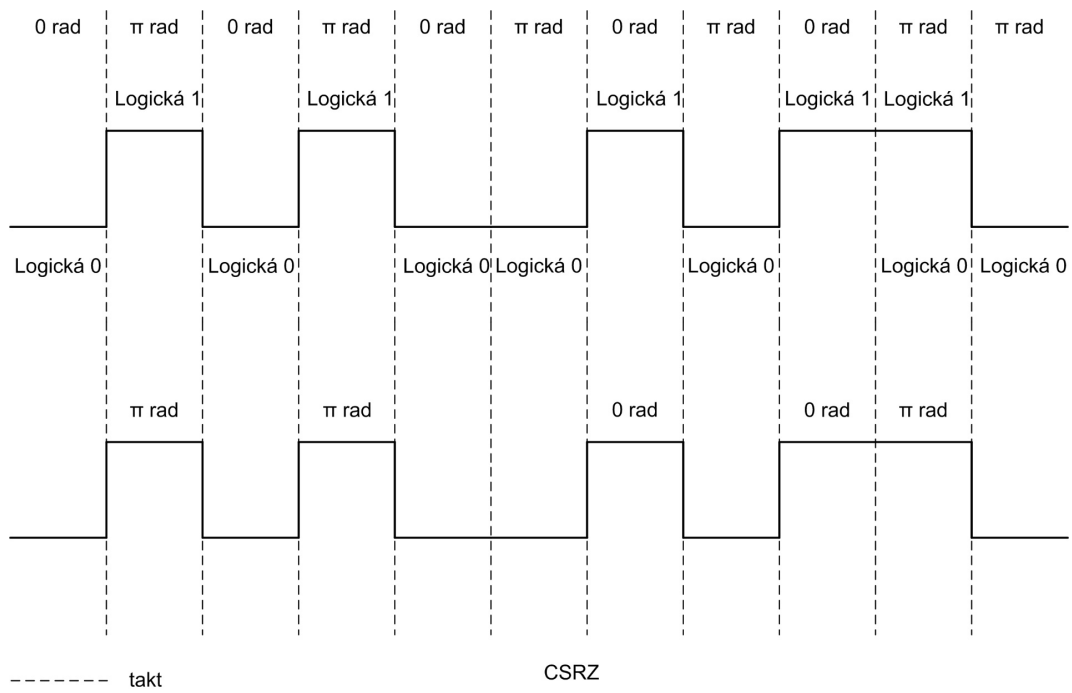
i

Fázy binárnej sekvencie sa odčítajú. Hlavná špička na nosnej frekvencii je potlačená a vďaka tomu dochádza k zníženiu výkonu, ktorý je distribuovaný hlavne v iných častiach spektra. Intenzita poľ'a klesá na nulu medzi po sebe nasledujúcimi bitmi (RZ) a fáza elektromagnetického žiarenia sa posúva o hodnotu π medzi susednými bitmi. Príklad: Pokiaľ fáza signálu v prípade párných symbolov (bit číslo $2n$) je nulová, fáza žiarenia pre nepárne symboly ($2n + 1$) bude π .

Výhody

+

- V porovnaní s RZ-OOK je CSRZ-OOK považovaná za viac „tolerantnú“ k filtrovaniu a odolnejšiu voči chromatickej disperzii hlavne vďaka užšiemu spektru.
 - CSRZ signály majú potlačenú výkonovú špičku na nosnej frekvencii – výkon na nosnej je nulový.
-



Princíp modulácie CSRZ.

1.3 Kombinované vysielajúce (transceivery) pre optické modulácie

$E = m \cdot c^2$

Transceiver je zariadenie zložené z vysielajúceho a prijímača, ktoré zdieľajú elektronické obvody a/alebo spoločné puzdro. Kombinované vysielajúce sú umiestnené na vstupe do siete, kde zaisťujú moduláciu a kódovanie signálu, ktorý sa naväzuje do prenosového média (napr. optické vlákno) – transceiver v tomto prípade pracuje ako vysielateľ. Transceiver na konci trasy pracuje ako prijímač (alebo na začiatku v prípade prijímu z opačnej strany). Zaisťuje detekciu, demoduláciu, dekódovanie.



V prípade prenosu v oboch smeroch (napr. duplexný prenos), každý transceiver vysielá a prijíma dáta (napr. striedavo alebo v rovnakom čase v duplexe).

Časť vysielajúceho môže používať laser ako zdroj symbolov v optických sieťach. Prijímač obsahuje fotodiódu, ktorá prevádza optický signál na elektrický signál. Ten sa ďalej spracováva napr. *digitálnym signálovým procesorom (DSP)*.

Kombinované vysielajúce (transceivery) pre moduláciu CSRZ



Každý nasledujúci binárny symbol má fázu posunutú o π . Na vytvorenie symbolov, ktoré majú rovnaký tvar a posunutú fázu sa používa Mach-Zehnderov modulátor, *Mach-Zehnder modulator (MZM)*. Symbolová rýchlosť je rovnaká ako rýchlosť informačného signálu.



Informačný signál v podobe elektronických impulzov vstupuje do modulátora a na základe kontrolného signálu sa vytvárajú laserové impulzy s danou fázou.

- NRZ vysielateľ využíva laser pracujúci v kontinuálnom režime s externou moduláciou robenou Mach-Zehnder modulátorom. Je potrebné nastaviť parametre ako sú bitová rýchlosť, frekvencia a šírka pásma na polovičný výkon - *full width at half maximum (FWHM)*, výstupný výkon laseru, straty modulátora a ďalšie.
- Na rozdiel od NRZ sa pri RZ používa kosínusový formát v elektrickom generátore.
- Pri type CSRZ sa optický signál NRZ následne moduluje druhým MZM, ktorý je ovládaný sínusoidou s frekvenciou, ktorá má polovičnú hodnotu bitovej rýchlosti.
- Dva susedné bity sa vyznačujú fázovým posunom o π za účelom potlačenia nosnej generovaného modulovaného signálu CSRZ.

- V prípade NRZ, RZ a CSRZ sa používa komplexný modulátor s fotodetektorom, elektrickým zosilňovačom a filtrom.
-

1.4 Modulácia AMI

V telekomunikáciách sa používajú linkové kódy, pri ktorých sú podstatné dve nenulové napäťové úrovne s opačnou polaritou. Kódové slová sa líšia opačnou polaritou (otočenou fázou) žiarenia za účelom minimalizácie disparity ďalších sekvencií logických symbolov.

Princíp modulácie

Najjednoduchším príkladom „paired disparity code“ je *Alternate Mark Inversion* (**AMI**). Táto modulácia predpokladá tri logické úrovne, ktorým zodpovedajú dve bipolárne úrovne označované ako „+“ a „-“. Tretím stavom je nula.

$E = m \cdot c^2$

Logickej nule odpovedá stav absencie optického impulzu (nulové napätie elektrického impulzu). Logickú jednotku reprezentuje laserový impulz, ktorého fáza je pre každú ďalšiu jednotku otočená do protifázy (tomu odpovedá kladné a záporné napätie pri elektrických impulzoch). Binárnej jednotke sa teda hovorí „značka“ (mark), binárnej nule sa hovorí „medzera“ (space).

Výhody

Hlavné výhody linkových kódov s bipolárnym kódovaním:

+

- Použitie bipolárneho kódu pri metalických vedeniach zabraňuje nárastu jednosmernej DC zložky. Kábel, v ktorom sa prenáša signál je možné použiť aj na väčšiu vzdialenosť.
- AMI pomáha udržiavať synchronizáciu medzi vysielateľom a prijímačom – v prípade dlhých sekvencií logických jednotiek, ktoré sú problematické pre NRZ variant (pre každú jednotku je iná polarizácia, otočená fáza alebo úroveň napätia). Dodatočné prenosové médium na prenos taktu nie je nutné.
- Detekcia chýb. AMI signál sa obnovuje v pravidelných intervaloch. Parameter *Signal to Noise Ratio* (**SNR**) - odstup signálu od šumu – a parameter *Bit Error Rate* (**BER**) – bitová chybovosť poskytujú informácie o náraste chybovosti. Napríklad jednotku môže prijímač chybné vyhodnotiť ako nulu, nulu naopak ako kladné napätie alebo optický výkon. AMI umožňuje detekciu jednej chyby v danej sekvencii vďaka tomu, že sa vie kedy sa poruší princíp bipolarity (každý ďalší nenulový symbol má otočenou polaritu).

Nevýhody

-

- Dlhé sekvencie binárnych núl sú problematické z dôvodu možnej straty synchronizácie (obnovy taktu).



Riešením je vkladanie logickej jednotky po každej sekvencii siedmich logických núl za účelom udržania synchronizácie. Počas dekódovania je tento symbol odstránený.

1.5 Modulácia DB

Princíp modulácie

Duo binárna modulácia (DB) má tri logické stavy.

$E = m \cdot c^2$

Logická (binárna) nula predstavuje absenciu laserového impulzu. Logická (binárna) jednotka predstavuje laserový impulz so striedajúcou sa fázou, ktorá je určovaná na základe predchádzajúcich symbolov nasledujúcim spôsobom:

Fáza binárneho symbolu je posunutá o π pokiaľ nastane nepárny počet logických núl medzi dvoma logickými jednotkami.

Princíp DB modulácie môže byť kombinovaný s princípom RZ alebo NRZ.

- *Non-return-to-zero (NRZ)* – logická jednotka je počas doby celého bitového intervalu, logická nula predstavuje absenciu laserového impulzu.
- *Return-to-zero (RZ)* logická jednotka je iba určitú dobu bitového intervalu, logická nula predstavuje absenciu laserového impulzu.

i

Skracovanie dĺžky impulzu voči dĺžke symbolu (návrat k nule) je výhodné najmä v prípade dvoch alebo viacerých logických jednotiek po sebe. Týmto spôsobom možno vyriešiť problém synchronizácie logických jednotiek.

Výhody

Výhody DB:

+

- Vysoká odolnosť na chromatickú disperziu – *chromatic dispersion (CD)*
- Jednoduché úzkopásmové filtrovanie. DB má úzke spektrum, ktoré možno prirovnať k spektru modulácie *Differential Quadrature Phase Shift Keying (DQPSK)*. Tento formát je vhodný pre DWDM siete s úzkym kanálovým rozstupom, napr. 12,5 GHz.
- DB je jediný intenzitný modulačný formát, ktorý je stabilný na väčších vzdialenostiach, napr. 130 km bez obnovy. Výkonnosť modulácie DB sa dá prirovnať k výkonnosti fázových modulácií, najmä DQPSK.
- DB je efektívnejšia než NRZ-DQPSK a CSRZ-DQPSK v zmysle požiadavky na finančné náklady a konštrukciu vysielača.

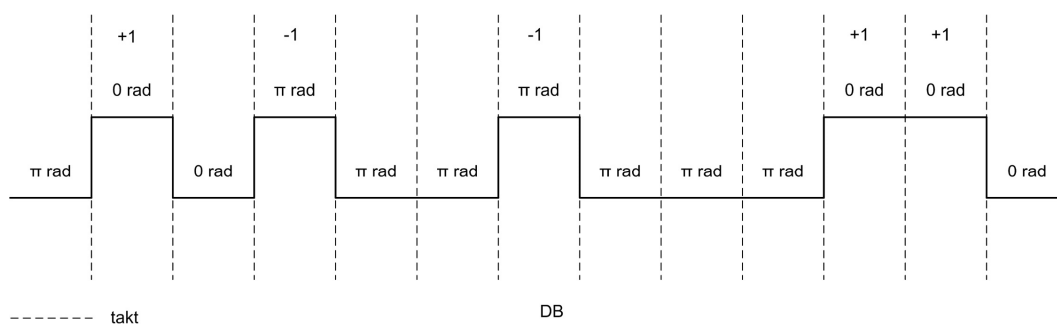
Konštrukcia transceiveru:



Vysielač DB sa skladá z dvojramenného amplitúdového MZM, ktorý spracováva dva elektrické vstupy:

- Prvý predstavuje štandardný elektrický signál – pseudonáhodnú binárnu sekvenciu, ktorá prechádza NRZ kóderom a dolnopriepustným filtrom.
- Druhý vstup prevádza logickú operáciu NOT na logickom vstupe, ktorým signál prechádza smerom k NRZ kóderu a elektrickému filteru.
- Podobne ako pri NRZ sa ako zdroj optického žiarenia používa laser pracujúci v kontinuálnom režime.

Na obrázku: +1 zodpovedá fáze 0, -1 zodpovedá fáze π a jej nepárny násobkom.



Princíp DB modulácie – fáza symbolu sa posúva o π radiánov, keď nastane nepárny počet binárnych núl (1, 3, 5...).

2 Fázové modulácie: DPSK a QPSK

2.1 DPSK

Princíp modulácie

Podobne ako pri OOK, DPSK možno realizovať v dvoch variantoch RZ a NRZ.

$E=mc^2$

Ide o typ fázovej modulácie, ktorá mení fázu nosnej vlny. Princíp modulácie je nasledujúci:

- Otočenie fázy o 180 stupňov nastane pre logickú jednotku.
- Pre logickú nulu sa fáza neotáča, zostáva rovnaká ako pre predchádzajúci symbol.

Výhody

+

Hlavnou výhodou DPSK je intenzitné zlepšenie o 3 dB, ktoré znamená lepšiu citlivosť prijímača v porovnaní s OOK moduláciou.

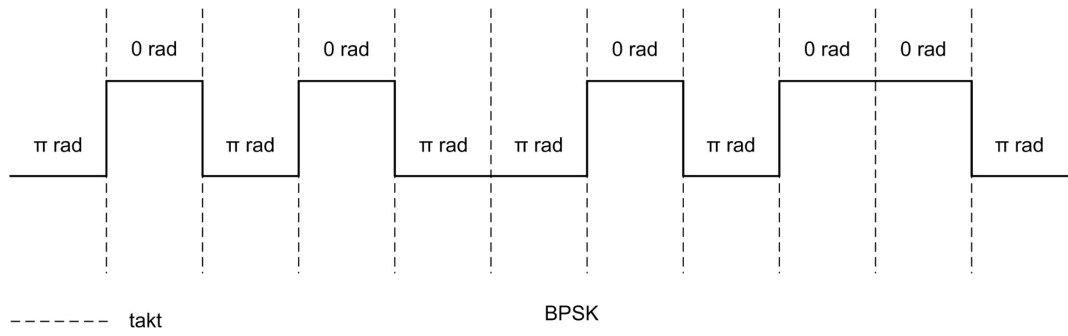
Rozdielna efektívnosť v prípade NRZ-DPSK a RZ-DPSK je daná primárne šírkou spektra, ktorá je väčšia v prípade formátu RZ-DPSK.

Kombinované vysielacie pre DPSK moduláciu

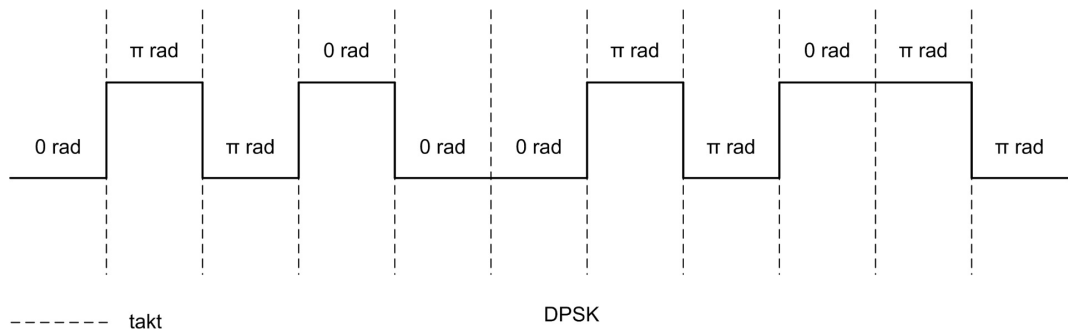
Konštrukcia transceiveru:

i

- Vysielač NRZ-DPSK je podobný vysielaču amplitúdovej NRZ. Miesto MZM sa používa fázový modulátor s fázovým posunom o 180°.
- Filter typu dolná priepusť sa používa na vyrovnanie nepresnej konverzie z elektrického signálu na optický.
- Vysielač RZ-DPSK obsahuje druhý modulátor pre generovanie výsledných RZ impulzov.
- Prijímač DPSK sa skladá z oneskorovacieho interferometra na dekódovanie a vyváženého prijímača, ktorý je navrhnutý ako komplexný prijímač. V ňom sa elektrický výstup prvého subprijímača sčíta s invertovaným výsledkom druhého subprijímača.



Princíp modulácie BPSK – binárnym nulám a jednotkám zodpovedajú stavy fázy posunuté o π vzhľadom k sebe. Napr. pokiaľ je logickej nule priradená fáza π , binárnej jednotke bude priradená fáza 0 radiánov.



Princíp modulácie DPSK – pre každú logickú jednotku dochádza k posunu fázy o π . Logická nula neposúva fázu.

2.2 Modulácia QPSK a DQPSK

Princíp modulácie

Differential Quadrature Phase-Shift Keying (DQPSK) – štvorstavové (kvadrátúrne) kľúčovanie fázovým posunom je viacstavová modulácia.

$E = m \cdot c^2$

QPSK možno realizovať ako dva nezávislé BPSK systémy. Vyznačuje sa podobnou kvalitou prenosu, ale ponúka dvojnásobnú spektrálnu efektívnosť.

- Dvojiciam bitov sa priraduje určitá fáza, napríklad:
 - 00 → 45°
 - 01 → 135°
 - 10 → 315°
 - 11 → 225°

i

Existuje veľa variantov QPSK – dvojici bitov možno priradiť aj iné stavy fázy. Iné môžu byť aj susedné dvojice.

$E = m \cdot c^2$

- V prípade modulácie DQPSK dvojiciam bitov zodpovedajú dané fázové posuny (nie konkrétne hodnoty fázy). Uvádza sa fázový posun voči počiatočnej fáze alebo môžeme uvažovať fázový posun o 90° medzi susednými symbolmi.
- Pre jednoduchosť výkladu môžeme predpokladať počiatočnú fázu 0° (v praxi nemusí byť nulová).
 - 00 → posun o 0° voči počiatočnej hodnote fázy.
 - 01 → posun o 90° voči počiatočnej hodnote fázy.
 - 10 → posun o 180° voči počiatočnej hodnote fázy.
 - 11 → posun o 270° voči počiatočnej hodnote fázy.

Výhody

+

- Symbolová rýchlosť je dvakrát pomalšia ako bitová rýchlosť.
- DQPSK sa vyznačuje dobrými vlastnosťami v zmysle SNR.
- Je odolná voči režimu polarizačnej disperzie vďaka ďalším symbolom.
- Zvýšená odolnosť na chromatickú disperziu.

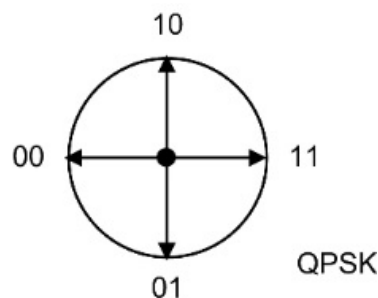
- Úzke optické spektrum.
- NRZ-DQPSK je perspektívna pre vysokorýchlostné prenosy – terabitové prenosy.
- DQPSK je vhodná pre 40 Gbit/s pasívne PON siete.
- RZ-DQPSK umožňuje predĺžiť optický dosah.
- RZ-DPSK je odolná voči optickým nelinearitám, pokiaľ uvažujeme jeden 160 Gbit/s kanál.
- Pri DQPSK najväčšiu hodnotu optického Q-faktora popisujúceho kvalitu prenosu v optickom kanáli možno dosiahnuť pre variant RZ-DQPSK.

Kombinované vysielacie (transceivery)

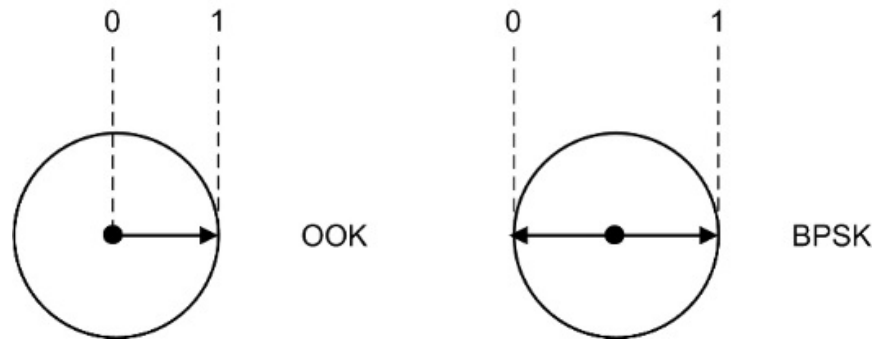
Konštrukcia transceiveru:



- NRZ-DQPSK vysielateľ sa skladá z dvoch kóderov: fázový a kvadrantný signál je konvertovaný na elektrické priebehy, ktoré riadia dva MZM modulátory.
- Laser pracujúci v kontinuálnom režime sa používa pre obidva MZM. Výstup jedného z nich prechádza fázovým modulátorom. Dochádza k dodatočnému posunu fázy o 90° , ktorý je požadovaný pre kvadrantnú zložku.
- Obidva signály sa kombinujú a vytvárajú modulovaný DQPSK signál.
- Transceiver ďalej obsahuje dve dolné priepuste medzi generátorom elektrického signálu a MZM na vylepšenie konverzie binárneho signálu na elektrický.
- Pri RZ-DQPSK sa používa dodatočný MZM na realizáciu návratu k nule.
- DQPSK prijímač používa dva DPSK prijímače na príjem kvadrantného a fázového signálu. Každý sa skladá z laditeľných MZI a dvoch PIN detektorov.



Princíp QPSK modulácie. Príklad konštruktívneho diagramu. Dvojiciam bitov sa priradujú jednotlivé symboly. Nakoľko možno vytvoriť štyri kombinácie dvoch bitov, modulácia má štyri stavy.



Príklad konštalčného diagramu OOK a BPSK modulácie. Fáza a amplitúda sú zobrazené v konštalčnom diagrame.

3 Pokročilé aspekty optických modulácií na dosiahnutie vysokej prenosovej rýchlosti a odolnosti voči degradácii signálu

3.1 Polarizačný multiplex pri QPSK modulácii pre prenosové rýchlosti v terabitoch

Myšlienka multiplexovania modulačných stavov polarizácie

i

Polarizačný multiplex, *Polarization Division Multiplexing (PDM)*, je známy v anglickej literatúre ako duálna polarizácia „dual polarization“ alebo ortogonálna polarizácia „orthogonal polarization“. PDM-QPSK je modulačný formát navrhnutý primárne pre vysokorýchlostné systémy s rýchlosťou 100 Gbit/s na kanál.

PDM-QPSK je často používaná v kombinácii s koherentnou detekciou (spôsob dekódovania). Koherentná demodulácia sa používa na demoduláciu fázy a frekvencie synchronne s nosnou. Pri nekoherentnej detekcii sa problém tejto synchronizácie nerieši. Koherentné svetlo je svetlo, ktorého fáza sa dá predpokladať, ktorého fázový priebeh sa dá udržiavať v každej perióde elektromagnetickej vlny. Možno tiež hovoriť o korelácii fázy daného zdroja voči referenčnému koherentnému zdroju žiarenia. V opačnom prípade sa fáza začína meniť náhodne.

Výhody

Výhody:

+

- Vysoká spektrálna účinnosť s ohľadom na spomalené symbolové rýchlosti voči bitovej rýchlosti.
- PDM-QPSK je hlavným kandidátom pre transpondéry 100 Gbit/s z dôvodu vysokej tolerancie na distorziu signálu.
- PDM-QPSK je lepšia než DPQSK z pohľadu ceny implementácie.
- Táto modulácia je veľmi výkonná pri systéme 100 Gbit/s na kanál s rozdelením 50 GHz, pri ktorých je možný prenos na vzdialenosť stoviek kilometrov. Predpokladom je použitie vhodnej kompenzačnej techniky pre manažment disperzie a ďalej za predpokladu použitia linkových zosilňovačov.

Nevýhody

Nevýhody a najpodstatnejšie obmedzenia:



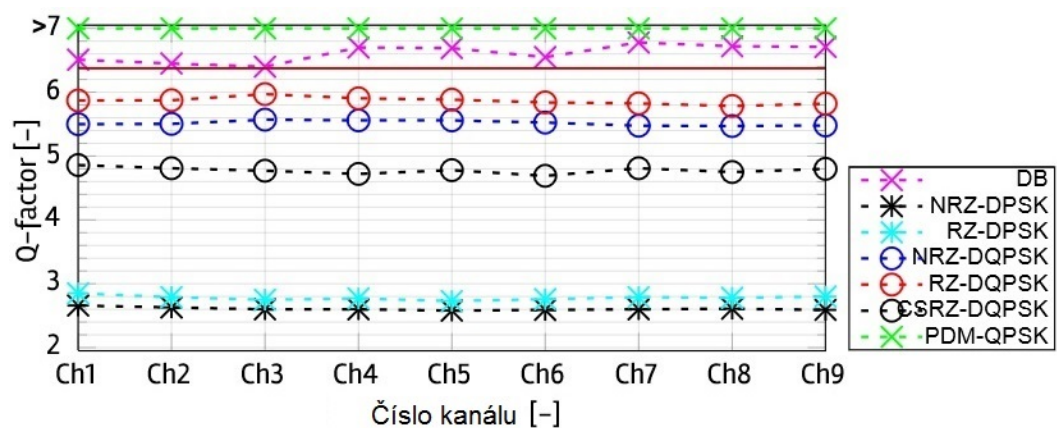
- Finančné náklady na praktickú implementáciu, zložité transceivery.
- Vysoká spotreba elektrickej energie.
- Požiadavky na rýchlejšie signálové procesory .
- Nutné A/D konvertory.

Transceivery

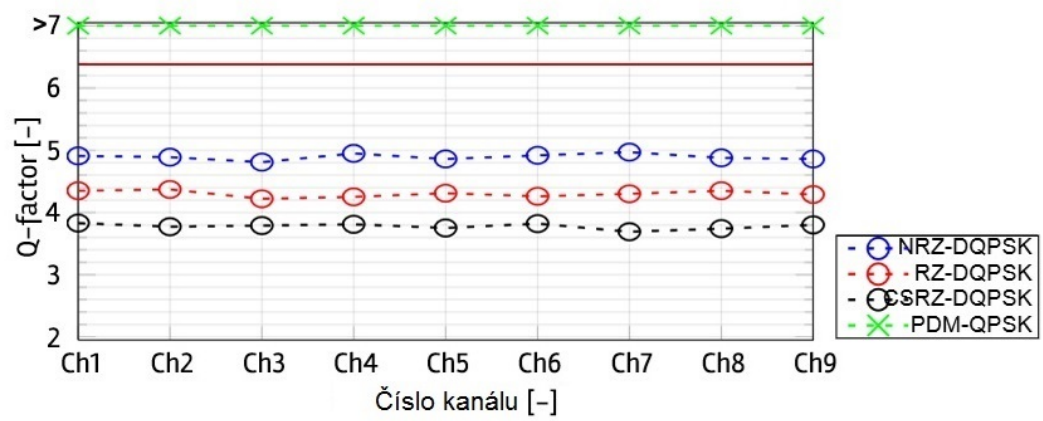
Konštrukcia transceiveru:



- Vysielač PDM-QPSK sa musí vysporiadať so štyrmi zložkami signálu: fáza a kvadrátúrna zložka, obidve pre dva polarizačné stavy.
- Na konverziu binárneho signálu na elektrický je nutné použiť dolnú priepust' – Besselov filter.
- Štyri elektrické signály vstupujú do dvoch modulátorov QPSK (dva do každého modulátora).
- Výstupný signál z jedného modulátora prechádza polarizátorom a je sčítaný so signálom z druhého modulátora QPSK. Týmto spôsobom sa vytvára modulovaný signál PDM-QPSK.
- Prijímač PDM-QPSK obsahuje mnoho prvkov. Napr. 90° hybridný oscilátor, štyri fotodiódy PIN pre koherentné detekcie, transimpedančný zosilňovač, elektrické filtre, elektronický kompenzátor disperzie a rozdeľovač fázovej a kvadrátúrnej zložky a polarizačných zložiek.



Prenos 40 Gbit/s v jednovidovom optickom vlákne s kanálovým rozdelením 100 GHz na vzdialenosť 12 km. Najlepšie výsledky boli dosiahnuté pre formát PDM-QPSK [2].



Prenos 40 Gbit/s v jednovidovom optickom vlákne s kanálovým rozdelením 50 GHz na vzdialenosť 12 km. Najlepšie výsledky boli dosiahnuté opäť pre formát PDM-QPSK [2].

3.2 Konvergenencie sietí. Koexistencia amplitúdovej a fázovej modulácie v jednom vlákne

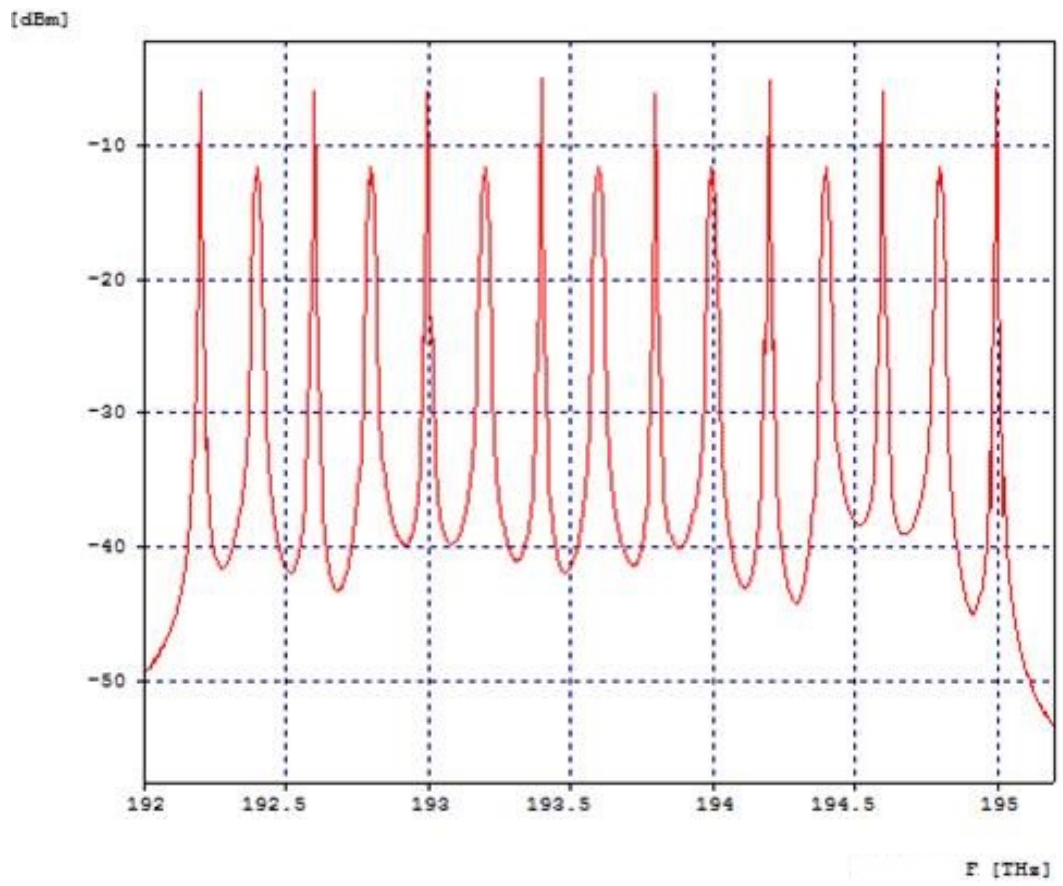
Požiadavky na väčšiu informačnú kapacitu a vyššiu prenosovú rýchlosť si vynútila postupný upgrade existujúcich optických systémov. Ďalším trendom je prevádzkovanie viacerých systémov v jednom optickom vlákne. Pridanie nového systému vyžaduje plánovanie efektívnejšieho využitia dostupnej šírky pásma. V súčasnej dobe sa najčastejšie uvažuje hlavne o koexistencii dvoch systémov s vlnovým multiplexom:

- *Coarse Wavelength Division Multiplexing* systém (**CWDM**) – systém s hrubým vlnovým delením.
- *Dense Wavelength Division Multiplexing* systém (**DWDM**) – systém s hustým vlnovým delením.



Vo väčšine prípadov každý systém používa svoj vlastný (iný) modulačný formát.

- Príklad: Hybridný 10G/40G DWDM systém
 - Pôvodne 10G DWDM systém.
 - 15x10 Gbit/s, NRZ-OOK, rozdelenie 50 GHz.
 - 6x80km SSMF (dvojfázové zosilňovače, postkompenzácia disperzie).
- Hybridný DWDM 10G/40G systém s prekladaním kanálov
 - Kombinácia so systémom 7x40 Gbit/s.
 - Duo binárna modulácia P-DPSK, RZ-DQPSK.
 - Vplyv pôvodných 10 Gbit/s kanálov na nové kanály 40 Gbit/s.
 - Potenciálnym problémom je krížová modulácia fázy – *Cross Phase Modulation (XPM)*.



Optické spektrum DWDM systému s prekladaním kanálov.

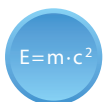
3.3 Krížová fázová modulácia spôsobená koexistenciou fázovej a amplitúdovej modulácie



Prevádzkovanie dvoch alebo viacerých systémov v jednom optickom vlákne vyžaduje nutne splnenie niekoľkých podmienok. Vo väčšine prípadov existujúci starší systém používa amplitúdovú moduláciu. Nový systém má používať jeden z moderných modulačných formátov (fázová alebo viacstavová modulácia). Kanály oboch systémov možno prekladať za účelom zefektívnenia využitia pásma starého systému. Potenciálnym problémom sú presluchy energie z kanálov, ktoré používajú amplitúdovú moduláciu do kanála s fázovou moduláciou. Tento presluch je krížová fázová modulácia *Cross-phase modulation (XPM)*.



Dôvodom vzniku XPM je veľká energia, ktorú prenáša amplitúdová modulácia. Tá sa naviaže do nízkoenergetických fázových kanálov vlnového multiplexu.



Podstatou krížovej fázovej modulácie, *Cross-phase modulation (XPM)*, je zmena fázy optického žiarenia na určitej vlnovej dĺžke v dôsledku interakcie žiarenia na inej vlnovej dĺžke s nelineárnym médiom.

Zmenu fázy možno docieľiť nasledujúcim spôsobom:

- Kerrov jav, spôsobuje zmeny hodnoty indexu lomu látky po priložení elektromagnetického poľa s vysokou intenzitou optického žiarenia. V prípade optických vlákien sa jedná o desiatky dBm.
- Zmeny hodnoty indexu lomu môžu byť spôsobené polovodičovým optickým zosilňovačom – *Semiconductor Optical Amplifier (SOA)*

3.4 Zamedzenie nelineárnych javov spôsobených pokročilými moduláciami



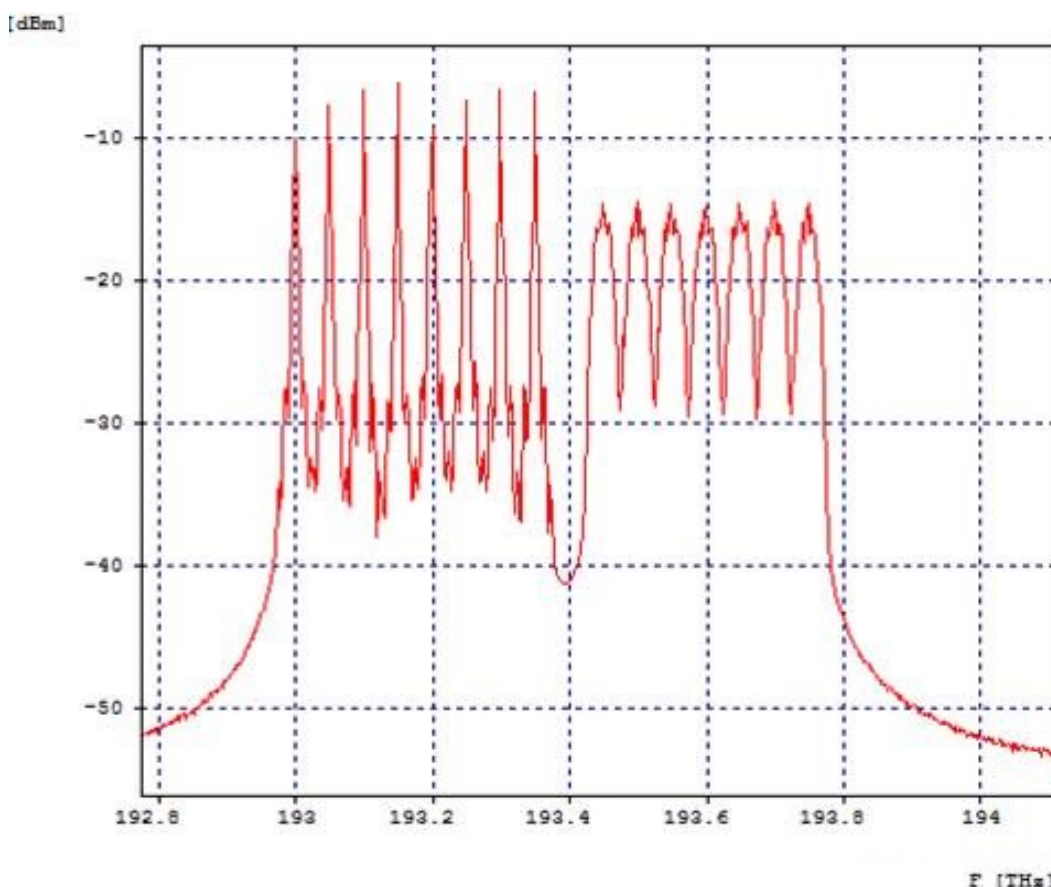
XPM – krížová modulácia fázy je nežiaducim javom v telekomunikačných systémoch s vlnovým multiplexovaním. Spôsobuje skreslenie prenosu a vedie k presluchom medzi kanálmi a konverzii vlnovej dĺžky.

Možným riešením problému XPM je oddelenie pásiem dvoch systémov, z ktorých každý používa inú moduláciu. Pre oddelenie dvoch skupín kanálov sa používa ochranné pásmo, v ktorom nie sú prenosové kanály (nie sú používané vlnové dĺžky):

- Hybridný DWDM 10G/40G s ochranným pásmom



Spektrálne oddelenie systémov 10G a 40G ochranným pásmom pomáha obmedzovať krížovú fázovú moduláciu – presluchy od 10G systému.



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

3.5 Odolnosť digitálnych modulácií voči disperzii pri vysokých rýchlostiach

- Ďalšou úlohou je zníženie chromatickej disperzie, ktorá je dôvodom rôznej rýchlosti jednotlivých frekvenčných zložiek obsiahnutých v optickom impulze.
- Formát RZ je menej náchylný na disperziu než formát NRZ a viac vhodný na filtrovanie, hlavne vďaka užšiemu spektru.

3.6 OFDM – viacstavová modulácia – princíp, aplikácia

Princíp ortogonálneho multiplexu

$E = m \cdot c^2$

Ortogonálny multiplex s frekvenčným delením, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)*, je metóda kódovania digitálnych dát s použitím multiplexovania nosnej frekvencie. Tento modulačný formát patrí medzi modulácie s viac nosnými, *Multi-Carrier Modulations (MCM)*. Inými slovami pri tejto modulácii sa moduluje viac frekvencií.

OFDM kanály sú ortogonálne. Vďaka tomu modulačné kanály spolu neinterferujú ani sa neprekrývajú (ortogonálne zložky sa nesčítavajú).

Veľké množstvo ortogonálnych subkanálov položených veľmi blízko seba sa používa na prenos dát paralelne v niekoľkých kanáloch. Každý subkanál je modulovaný konvenčnou modulačnou metódou (napr. PSK alebo QAM) pri nízkej symbolovej rýchlosti podobne ako pri modulácii s jednou nosnou vlnovou dĺžkou.



Zdroj dát sa dodatočne kóduje konvolučným kódom pre zníženie chybovosti počas príjmu symbolov. OFDM sa realizuje s použitím DSP.

Aplikácia

- *Long Term Evolution (LTE)* – štandard používaný v mobilných sieťach
 - Šírka pásma 1 MHz až 20 MHz.
 - Kompresia MPEG2 alebo MPEG 4.
 - Prenosová rýchlosť ~300 Mbit/s (downlink) – sťahovanie a 50 Mbit/s (uplink) – upload.
- *Digital Video Broadcasting - Terrestrial (DVB-T)* – štandard pre príjem videa
 - Počet subkanálov 6817.
 - Kanálové rozdelenie 1116 Hz.
 - TV pásmo 8 MHz.
 - Modulácia v subkanáloch 4-PSK, 16-QAM, 64-QAM.
 - Prenosová rýchlosť 19 až 25 Mbps.
- *Wireless LAN (WLAN)* – bezdrôtové lokálne siete.
- *Digital Audio Broadcasting (DAB)* - digitálne audio vysielanie.

3.7 OFDM – viacstavová modulácia – parametre, výhody, obmedzenia

Parametre

i

- Dostupné pásmo B sa rozdeľuje na N subkanálov.
 - Šírka každého subkanála je $\Delta f = B/N$.
 - Modulačná rýchlosť je $\Delta f = 1/T$, kde T je dĺžka trvania jedného symbolu.
-

Výhody

+

- Spektrálna účinnosť, podiel prenosovej rýchlosti a šírky pásma.
 - Zvyšovanie počtu subkanálov pri zachovaní rovnakej celkovej prenosovej rýchlosti umožňuje zníženie modulačnej rýchlosti v jednotlivých subkanáloch alebo predĺženie doby trvania symbolov.
 - Umožňuje znižovanie medzysymbolovej interferencie, *Inter-Symbol Interference (ISI)*.
-

Nevýhody

–

- Je nutné sledovať a udržiavať rozdelenie medzi subkanálmi.
 - Pokiaľ rozdelenie medzi kanálmi nie je konštantné (tento jav je známy v literatúre ako jitter), je narušený princíp ortogonálnych kanálov a vzniká medzysymbolová interferencia a medzikanálová interferencia *Inter-Channel Interference (ICI)*.
 - ISI a ICI vedú k zvýšeniu chybovosti *Bit Error Rate (BER)*.
-

3.8 VDMT – pokročilá vektorová modulácia – princíp, aplikácia

Princíp modulácie

$E=m \cdot c^2$

Discrete Multi-Tone (DMT) je modulácia s viac nosnými. Dá sa realizovať pomocou DSP. Subkanály využívajú moduláciu PSK alebo QAM podobne ako pri OFDM. Na rozdiel od OFDM, DMT umožňuje použitie rôznych modulačných schém alebo dokonca rôznych typov modulácie v každom subkanále ortogonálneho multiplexu.

Aplikácia

- *Digital Subscriber Line (xDSL)*, digitálne účastnícke prípojky, ktoré využívajú metalické vedenie:
 - *Asymmetric Digital Subscriber Line 2+ (ADSL2+)* – asymetrické DSL, šírka pásma 2,2 MHz, počet subkanálov 512, kanálové rozdelenie 4,3kHz, modulácia – QAM, max. celková bitová rýchlosť 30,72 Mbit/s
 - *Very High Speed DSL 2 (VDSL2)* – šírka pásma 30 MHz, počet subkanálov 3479, kanálové rozdelenie 8,625 kHz, modulácia – QAM, max. celková bitová rýchlosť 417 Mbit/s

Vectored Discrete Multi-Tone (VDMT) - vektorová diskretná multitónová modulácia.

$E=m \cdot c^2$

Pre smer downstream (smer prenosu k používateľovi) je VDMT bežným riešením pre prípojky xDSL využívajúce metalické vedenie. Je implementovaná pri multiplexore *Digital Subscriber Line Access Multiplexer (DSLAM)*.

- V DSLAM multiplexore je informácia o všetkých symboloch, ktoré boli vyslané do metalického vedenia (existuje vektor symbolu DMT – preto “vektorová DMT”).
- V DSLAM multiplexore je informácia o parametroch jednotlivých symetrických párov a presluchovej väzby medzi nimi. Vďaka tomu je možné upraviť DMT symboly na základe znalosti prenosového prostredia.
- Je nutná synchronizácia všetkých DMT symbolov.
- V smere upstream (smer od používateľa k ústredni) je možné upravovať prenášané symboly v koncových termináloch používateľa.

Výhody



- VDMT je rozšírením modulácia DMT. Rieši problém *Multiple Input Multiple Output (MIMO)* – mnoho vstupov, mnoho výstupov, eliminuje presluchy na vzdialenom konci, *Far End Crosstalk (FEXT)*.
 - *Near End Crosstalk (NEXT)*, presluch na blízkom konci je eliminovaný frekvenčným multiplexom.
-

3.9 Záver



- Najčastejšie používanými moduláciami sú amplitúdové modulácie (napr. OOK, DB, CSRZ) a fázové modulácie (napr. BPSK, DPSK).
 - Fázové modulácie v porovnaní s amplitúdovou moduláciou pracujú lepšie (nižšia chybovosť pre danú rýchlosť) ale na úkor veľmi zložitej konštrukcie modulátora.
 - Pre rýchlosti väčšie než 10 Gbit/s je modulácia DB formátom, ktorý možno považovať za dobrý kompromis medzi kvalitou prenosu a nárokmi na konštrukciu modulátora. Tento formát môže prenášať dáta s rýchlosťou 40 Gbit/s na kanál s kanálovým rozdelením 0,8 nm (ide teda o DWDM systém). Fázová modulácia vo väčšine prípadov vykazuje lepšie výsledky hlavne pre hustejšie kanálové rozdelenie (0,4 nm–0,1 nm).
 - Viacstavové modulácie (s viac než dvoma stavmi), napr. QPSK, kombinujú moduláciu fázy a amplitúdy (napr. QAM) alebo fázy a polarizácie (napr. PM-QPSK). Tieto modulácie sa javia ako perspektívne pre vysokorýchlostné systémy a systémy prenosu na veľké vzdialenosti.
 - Formáty využívajúce polarizačné multiplexovanie majú výhodu v tom, že umožňujú vysokú spektrálnu účinnosť, optický dosah, dobré SNR vlastnosti a odolnosť voči disperzii.
 - Formát PDM-QPSK je perspektívny pre terabitové prenosy v prípade nasadzovania nových vlákien.
 - Za najmodernejšie modulácie s viac nosnými sa považuje OFDM a VDMT. Tieto modulácie našli uplatnenie v digitálnej televízii a v mobilných komunikáciách v štandarde LTE.
-