

Metody v moderních přenosových systémech

Optické komunikace 2010

Ing. Leoš Boháč, Ph.D.

ČVUT-FEL, katedra telekomunikační techniky

Obsah

Blokové zapojení optického systému

Modulace a nároky na ní

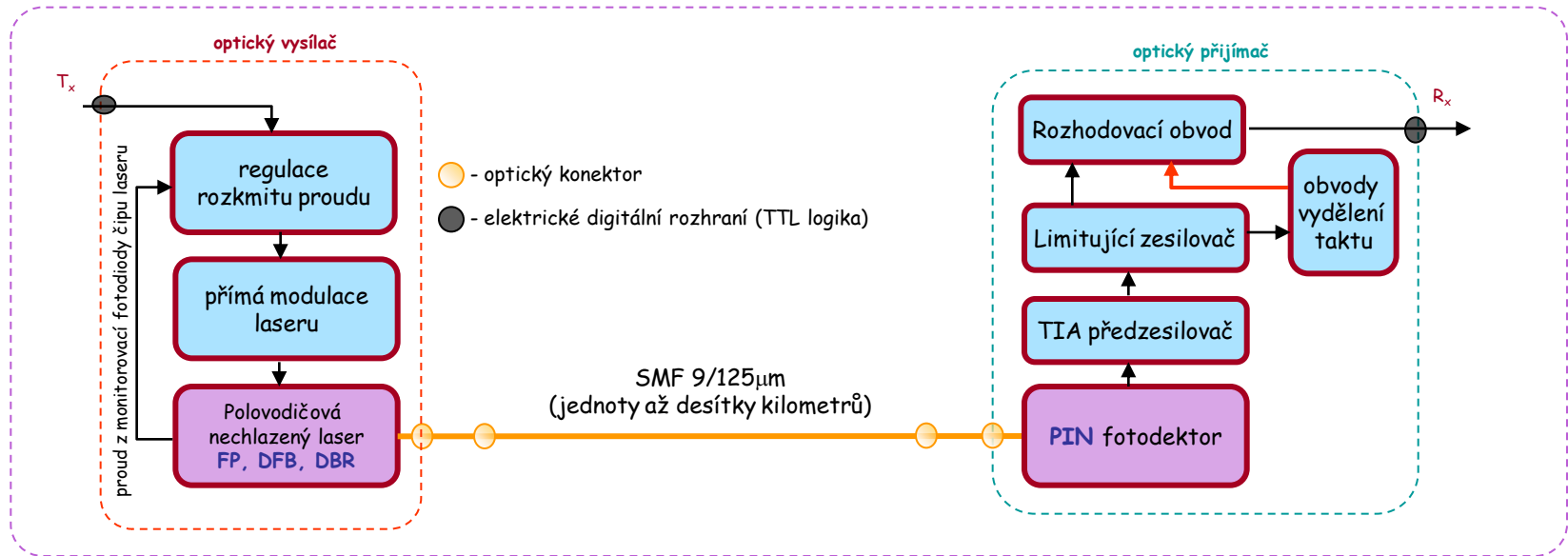
Externí modulace

Obecný přehled modulací

Detaily jednotlivých modulací

Závěr a souhrn

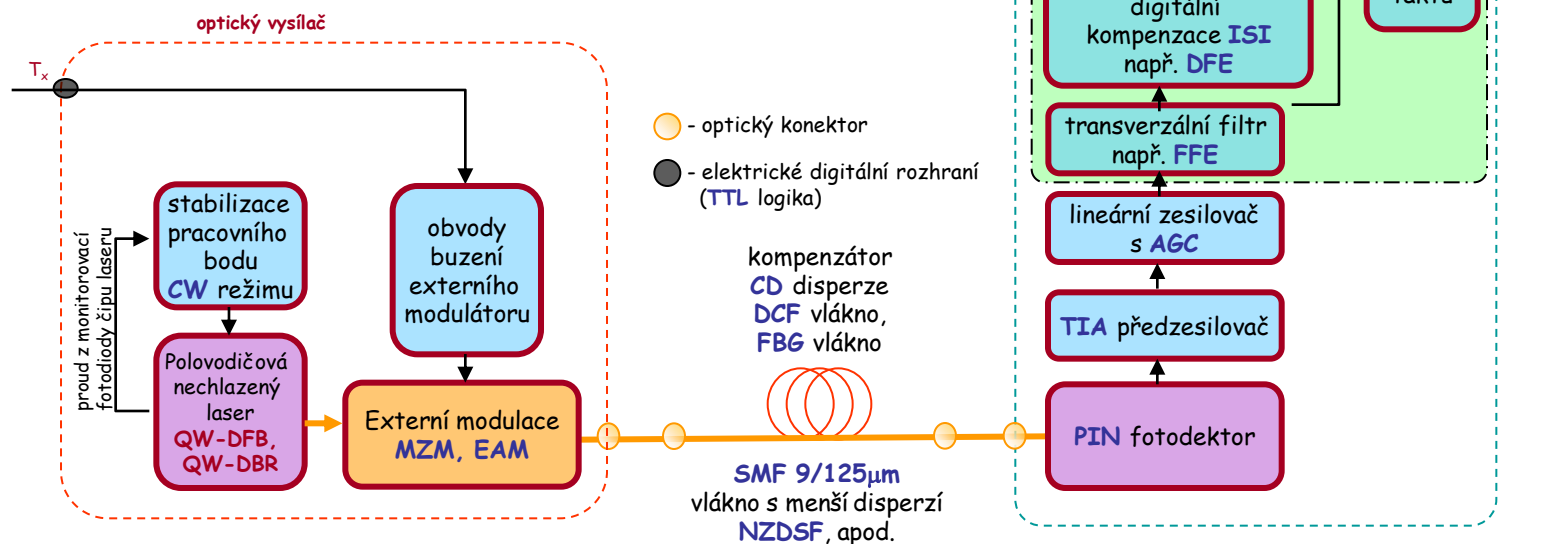
Optický systém s laserovou diodou (LD)



- ve vysílači je nahrazena LED dioda výkonnějším polovodičovým laserem (LD) ($\sim 0\text{ dBm}$) s podstatně užší šířkou spektra
- optické médium je **většinou jednovidové vlákno SMF**, ale lze se setkat i s **MM-GI** vlákny
- díky většímu výkonu laseru se zvýší střední výkon na straně přijímače, čím se zvětší i **SNR** -> **delší překlenutelná vzdálenost**
- díky použití **SMF** vlákna odpadá výrazný vliv **ISI** (**mezisymbolová interference**) způsobený vidovou disperzí -> **větší přenosová rychlost**
- díky mnohem **menší šířce spektra LD** se výrazně zmenší i vliv chromatické disperze vlákna na ISI -> větší přenosová rychlost
- nicméně, přechod k větším rychlostem je stále limitován **chromatickou disperzí vlákna (CD)**, **polarizačně vidovou disperzí (PMD)**, **čirpem** (parazitní frekvenční modulací) laseru při přímé modulaci a případnými nelinearitami vlákna (**SPM, FWM, XPM, MI**)
- systém je také co do vzdálenosti omezen výkonovými možnostmi použitého laseru při přímé modulaci (problém udělat vysokovýkonový laser s přímou modulací s rozumnými parametry rychlosti, čirpu a taktéž ceny)
- dosahované přenosové rychlosti jsou **řádu několika Gbit/s**
- dosahované vzdálenosti jsou **kolem 100 km**
- pro větší přenosové rychlosti se používají **lasery s distribuovanou vazbou (DFB)** nebo **lasery s bragg reflektory (DBR)**, ne již **Fabry-Perot (FP)** lasery

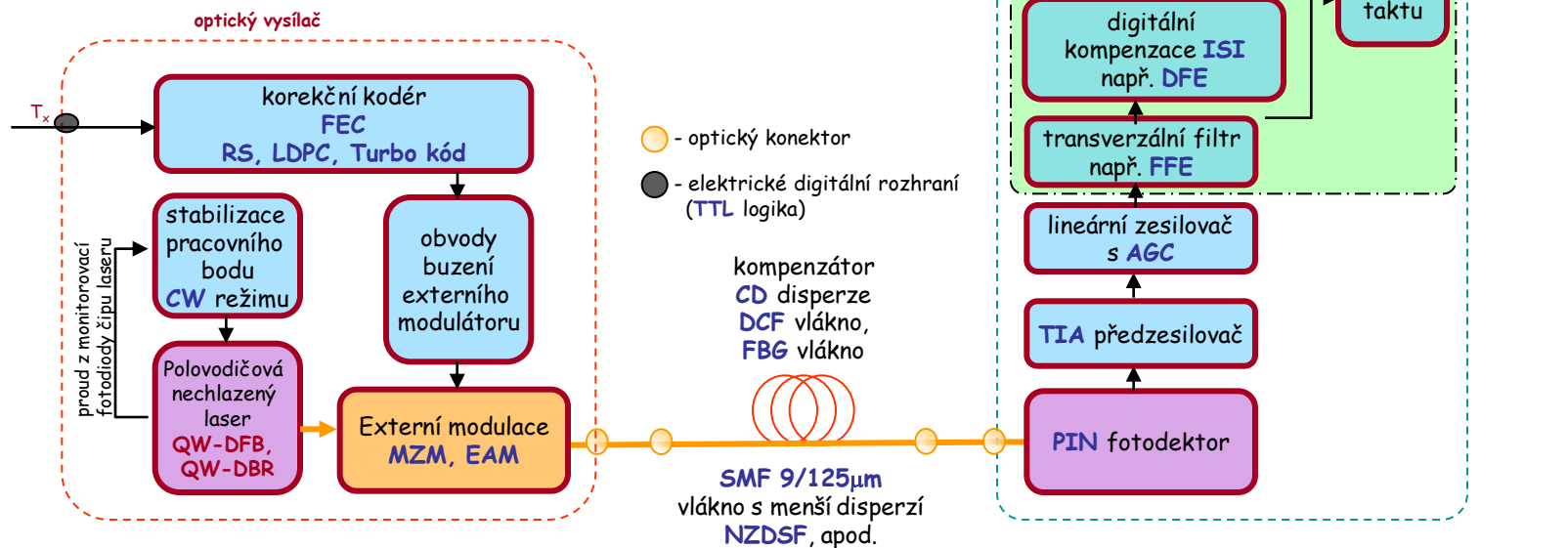
Optický systém s LD - potlačení vlivu CD a PMD

- vliv chromatické disperze lze snížit několika možnostmi, které lze použít samostatně nebo je lze pro dosažení větší účinnosti nasadit najednou, je to otázka složitosti a poté také ceny
- na straně vysílače lze použít řešení s **externím modulátorem**, který umožní dosáhnout **minimálního čirpu** a tím **zmenšení vlivu chromatické disperze** vlákna, protože ta je nepřímo úměrná šířce spektra zdroje (čirp šířku spektra rozšiřuje)
- na optické straně lze použít kompenzátory CD jako je **disperzi kompenzující vlákno DCF** nebo **bragg mřížka FBG**, popř. **optický etalon** nebo jiné uspořádání
- další možností je použít optické vlákno s menší chromatickou disperzí, např. **NZDSF** - toto však naráží na možnosti vláken instalované trasy
- poslední možností je kompenzace trasy pomocí elektronické kompenzace disperze - EDC
- EDC umožňuje kompenzovat obecně ISI, tj. i vliv PMD disperze
- pokud je zachován dostatečný SNR na přijímáči (vhodná kombinace optických zesilovačů) lze výše uvedenými systémy výrazně zvětšit překlenutelnou vzdálenost systému
- vliv PMD a CD lze výrazně také ovlivnit snížením modulační rychlosti (DPSK) nebo použitím lepší modulační (CS-RZ, DB)



Optický systém s LD - korekční kódy

- použitím **dopředného korekčního kódu FEC (Forward Error Correction)** lze výrazně zlepšit výslednou chybovost systému až o několik řádů
- pokud je např. chybovost fyzického kanálu 10^{-4} , lze FEC kódem snížit chybovost na 10^{-9} až 10^{-10}
- v praxi je nutné volit vzhledem k vysokým rychlostem přenosu procesně nenáročné FEC kódy
- v praxi se často používá **Reed-Solomon (RS)** kód s různých kódovým poměrem
- použití **LDPC** a **Turbo kódů** je zatím v optických systémech limitováno velkými rychlostmi a časovou náročností těchto pokročilých algoritmů -> tyto kódy se zatím v praxi nepoužívají



Metody modulace optického záření

modulace = metoda „vtisknutí“
informačního obsahu nosné vlně
optického záření

změnou amplitudy
elektrického
pole záření nebo výkonu
úměrně modulačnímu signálu

změnou fáze, popř. frekvence
záření úměrně modulačnímu
signálu

změnou polarizace záření

- dnes nejrozšířenější systém modulace vůbec
- u analogové optické modulace se výkon zdroje záření mění přímo úměrně velikosti modulačního signálu
- těmto systémům se často říká **IM/DD**, což znamená, že se jedná o systémy s modulací intenzity (alias výkonu) a přímou detekcí na detektoru
- výhodou je jednoduché řešení vysílače a přijímače
- nevýhodou je ztráta informace o stavu fáze a polarizace optické nosné - může komplikovat situace u systémů s měkkým rozhodováním
- nelze použít přímo pro systémů s modulací fáze a polarizace

- relativně opomíjený, nicméně několik desítek let známý a prozkoumaný systém modulace (nejen v RF, ale i v optice)
- dnes opět „oprašovaný“ princip modulace, který umožňuje snížit modulační (symbolovou) rychlost při zachování vysoké přenosové rychlosti
- snížení modulační rychlosti je výhodné vzhledem k dnešním limitům elektrooptických komponent (max 100 GHz)
- zatím se jeví jako prakticky použitelná metoda DPSK, která je dostatečně odolná proti negativním vlivům optické trasy (CD, PMD, nelinearity) a zároveň nevyžaduje velký SNR
- lze použít i složitější vícecestavové **QAM** modulace, ale za cenu nutného zvýšení SNR

- dodnes relativně opomíjená modulace
- vzhledem k obtížné realizaci se většinou používá jen v kombinaci s digitálními modulacemi
- dnes se očekává její použití v kombinaci s **DPSK** modulací fáze v systému **100G** Ethernetu na dlouhé vzdálenosti (longhaul) - **DP-DQPSK** (Dual Polarization Differential Quadrature Phase Shift Keying)

Nároky kladené na modulace

Citlivost na straně přijímače, dobré SNR

Odolnost pro optickým nelinearitám trasy

Odolnost proti chromatické disperzi - CD

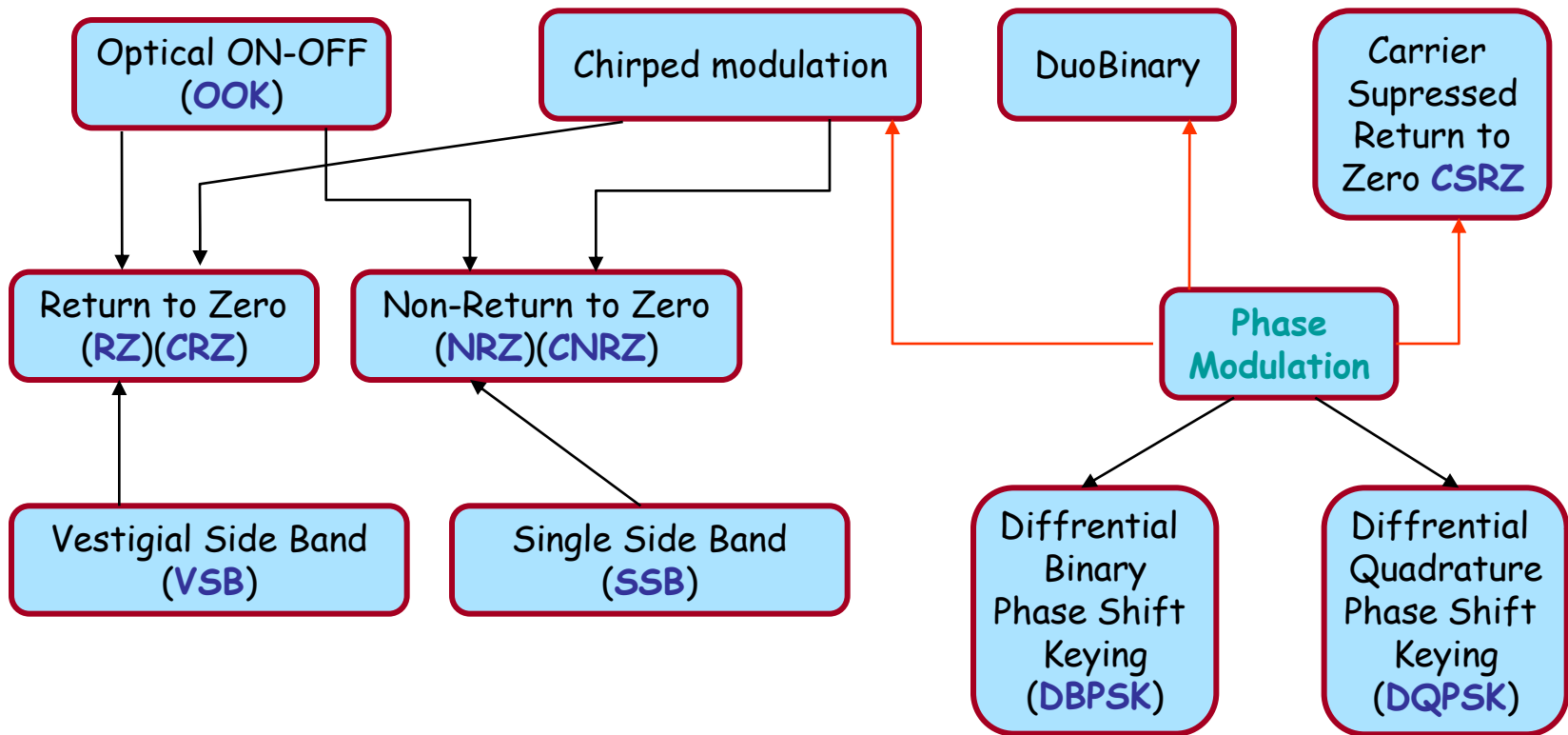
Odolnost proti polarizačně vidové disperzi - PMD

Vysoká spektrální účinnost

Odolnost proto vícenásobné filtraci v opticky směrovaných sítích

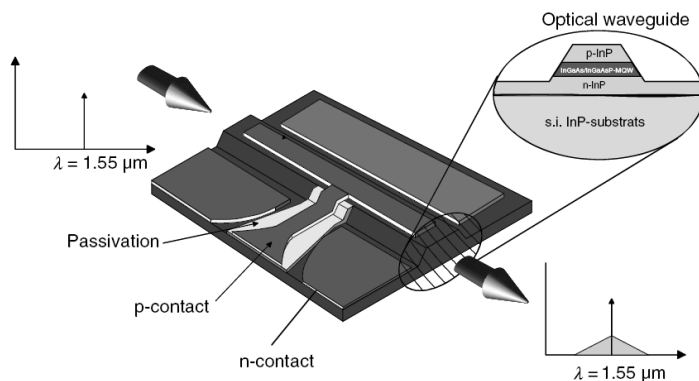
Složitost a cena koncového zařízení

Vysokorychlostní modulace

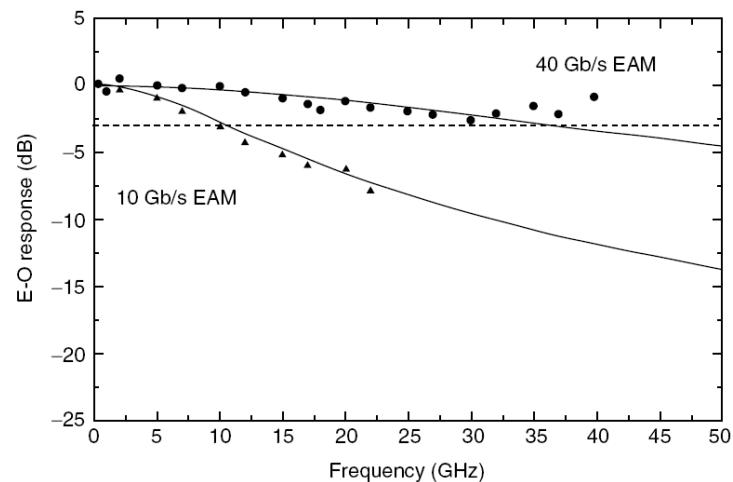


Elektro-Absorpční Modulátor (EAM)

dnes dostupné komerčně pro rychlosti 10 až 40 Gbit/s



kniha: Microwave Photonics—From Concepts to Devices and Applications

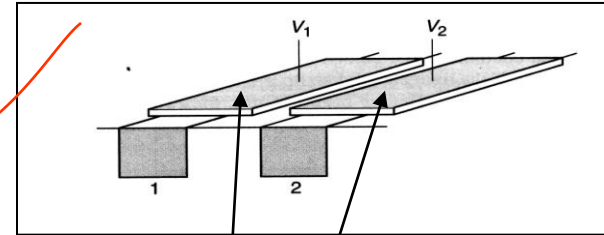
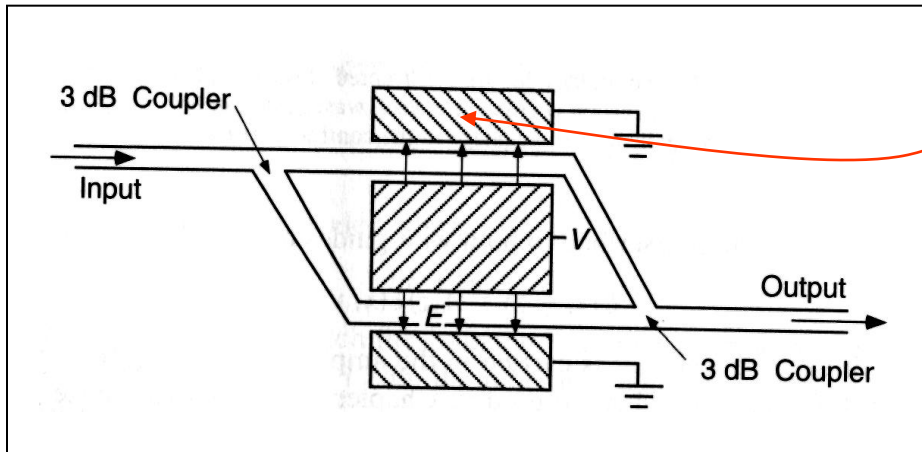


40Gbit/s EAM od fa CIP



Parameter	Test condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
Minimum insertion loss	$P_{IN} = 0\text{dBm}$, $V_{DC} = +0.6\text{V}$		4.8	6	dB
Modulation depth	$P_{IN} = 0\text{dBm}$, V_{DC} in $[0; -3]\text{V}$		10		dB
Polarisation dependent loss	$P_{IN} = 0\text{dBm}$, $V_{DC} = 0\text{V}$		1		dB
Small signal 3dB RF bandwidth	$P_{IN} = 0\text{dBm}$, $V_{DC} \sim -1.5\text{V}$	28	35		GHz
Dynamic insertion loss under NRZ modulation	$P_{IN} = +11\text{dBm}$, $V_{DC} \sim -2.7\text{V}$, $V_{pp} = 2.9\text{V}$		10	12	dB
Dynamic extinction ratio under NRZ modulation	$P_{IN} = +11\text{dBm}$, $V_{DC} \sim -2.7\text{V}$, $V_{pp} = 2.9\text{V}$	8	9		dB
Dispersion penalty over 2.4 km smf-28 optical fibre (40ps/nm) under NRZ modulation	$P_{IN} = +11\text{dBm}$, $V_{DC} \sim -2.7\text{V}$, $V_{pp} = 2.9\text{V}$		1	2	dB

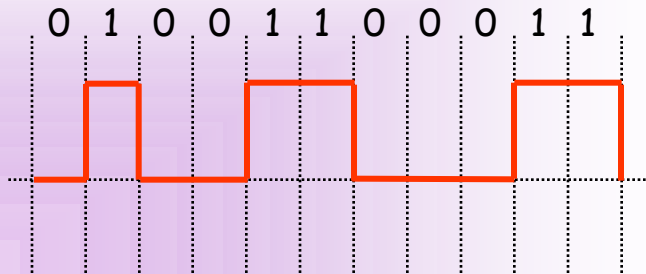
Mach-Zehnder Modulátor (MZM)



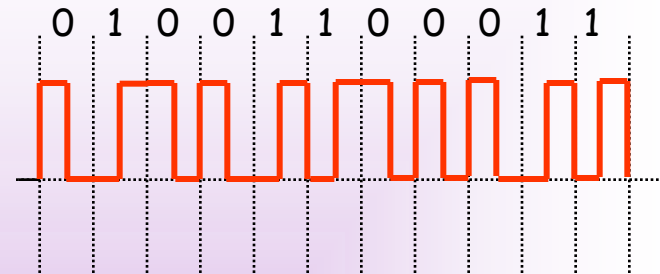
- princip založen na existenci elektro-optického jevu (**Pockels cell**)
- využívá principu rozdělení světelného svazku do dvou ramen
- na základě EOJ dochází se změnou napětí na elektrodách ke změně indexu lomu v obou optických ramenech a tedy k fázovému posuvu světla
- následné sloučení paprsků z obou ramen - fázové sčítání - destruktivní nebo konstruktivní světelná interference na výstupu
- lze realizovat jak amplitudovou, výkonovou či fázovou modulaci

Časový průběh symbolů (bitů) - linkový kód

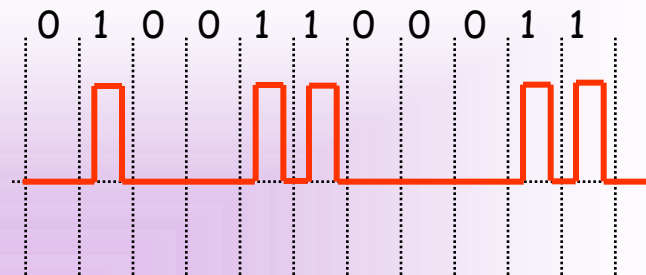
NRZ - bez návratu k nule (SONET, SDH)



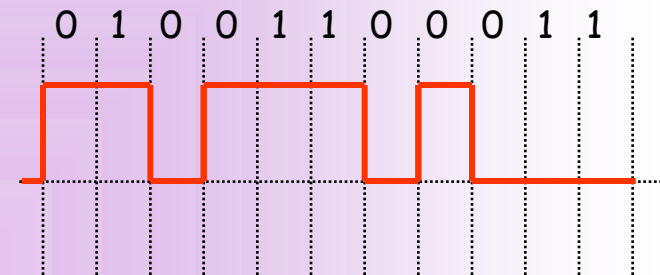
Manchester - (Ethernet)



RZ - s návratem k nule (dálkové trasy)

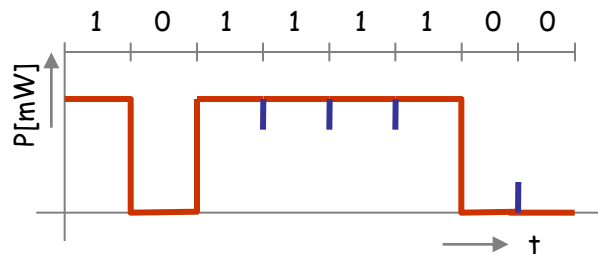


NRZI - optická rozhraní

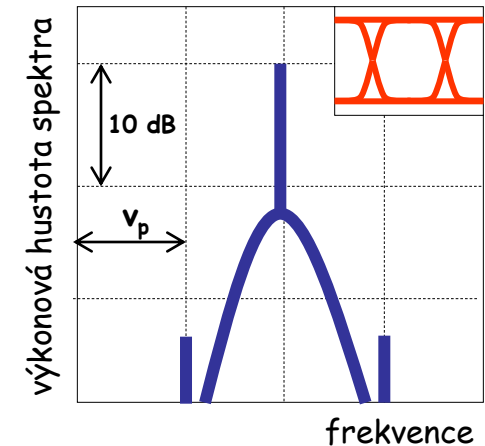
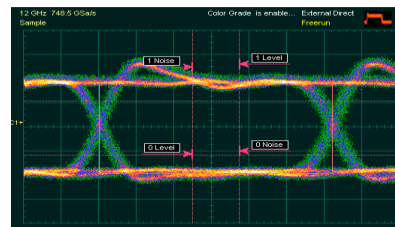
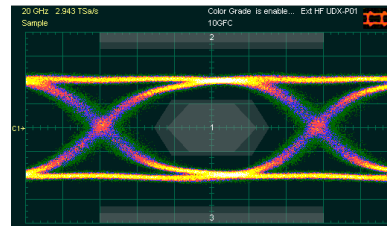
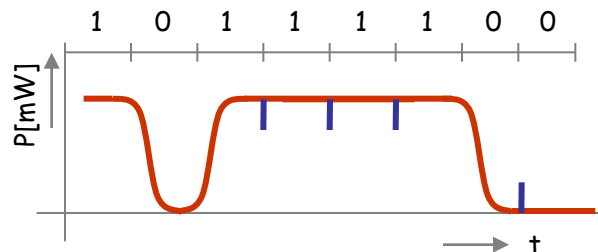


OOK-NRZ

- dnes nejrozšířenější systém modulace vůbec
- modulaci lze realizovat buď **přímou modulací** laseru (cca do 10 Gbit/s) nebo externím **Elektro-Absorpčním Modulátorem (EAM)** nebo **Mach-Zehnder Modulátorem (MZM)**
- pro vysoké rychlosti je tato modulace reálně dosti náchylná na ISI, tj. je méně odolná proti vícenásobné filtraci nebo chromatické disperzi
- její odolnost proti nelinearitám je průměrná (do 10Gbit/s), pro vyšší rychlosti (40-100Gbit/s) jsou pokročilejší modulace na tom lépe

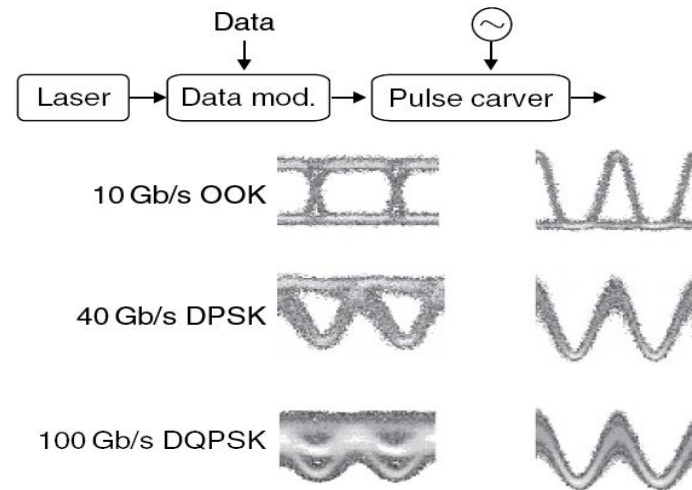
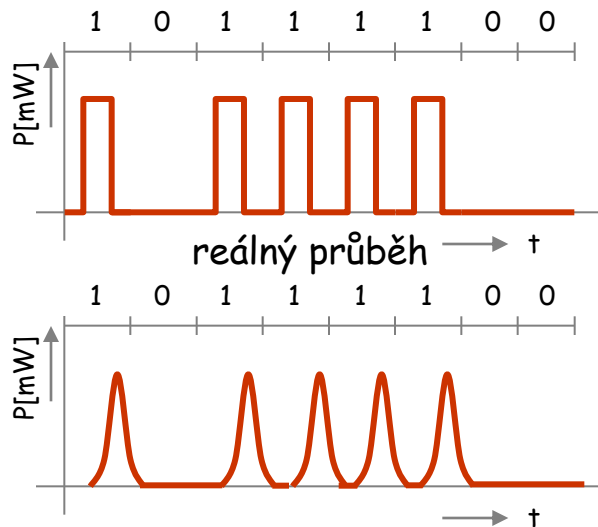


reálný průběh

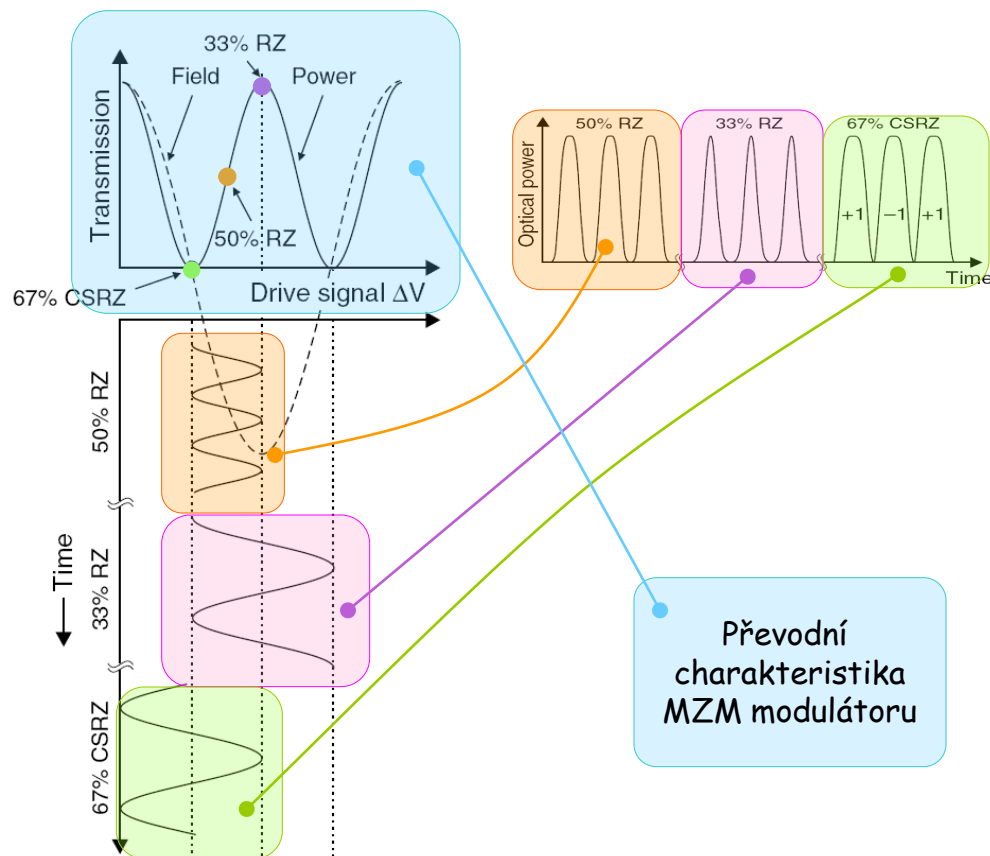


OOK-RZ

- je to modulace s návratem k nule
- disponuje větší šířkou optického spektra
- v porovnání s **NRZ** modulací stačí pro stejnou hodnotu **BER** o 1-3 dB menší **OSNR** i při zachování stejné šířky pásma přijímače jako u **NRZ**
- **RZ** je lépe odolná proto **ISI**
- taktéž obecně díky větší šířce optického spektra je **RZ** modulace vhodnější pro nelineární režim pro vysoké rychlosti nad 10 Gbit/s
- pro přenos lze použít různé šířky pulsů (50 %, 33 %, 67 %, apod.)
- modulaci lze realizovat buď elektronicky nebo čistě opticky
- do rychlosti 10 Gbit/s to lze udělat elektronicky
- pro rychlosti 40 Gbit/s a vyšší se používá optické řešení převodu NRZ na RZ pomocí pulzního tvarovače (**carver**)



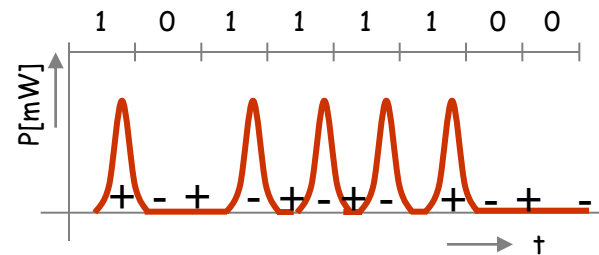
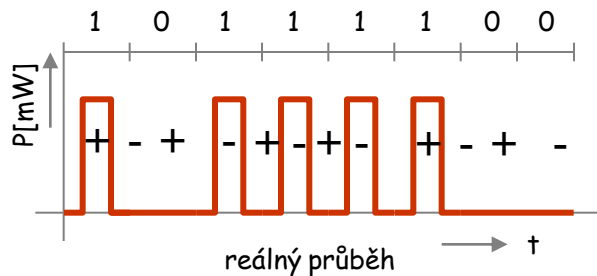
Realizace OOK-RZ a CSRZ pomocí MZM



- **RZ** modulace se dosahuje **harmonickým budícím signálem** zavedených do **MZM** modulátoru
- **50 % RZ** lze dosáhnout např. buzením harmonickým signálem s frekvencí **rovnou přenosové rychlosti** s body rozkmitu mezi minimem a maximum převodní charakteristiky MZM modulátoru, změnou ss úrovně a rozkmitu lze také měnit šířku RZ pulsů
- **33 %** lze dosáhnout pomocí buzení harmonickým signálem s **poloviční frekvencí** než je přenosová rychlost s body rozkmitu mezi oběma minimy převodní char. **MZM** modulátoru
- **67 %** modulaci s potlačenou optickou nosnou - **CSRZ** lze dosáhnout harm. signálem s **poloviční frekvencí** s body rozkmitu mezi oběma maximy se střední hodnotou ležící v prostředním minimu - sousední bity vykazují periodickou změnu fáze bez ohledu na logický stav bitu

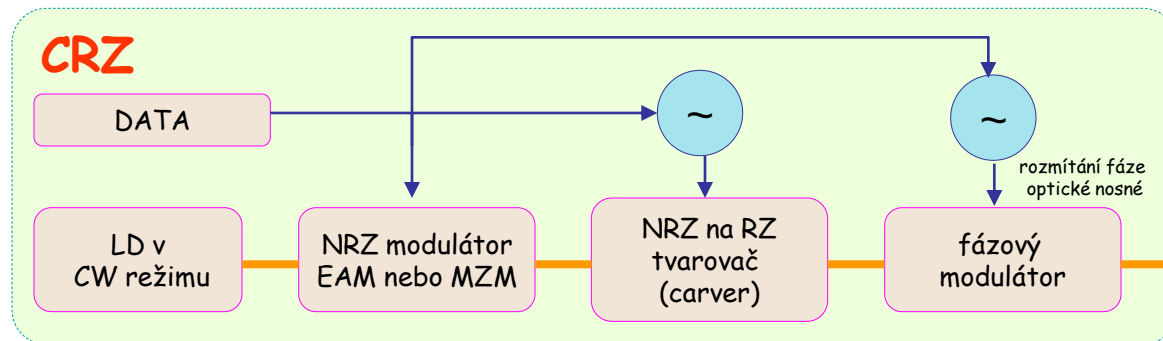
Modulace s potlačenou optickou nosnou a návratem signálu k nule- CSRZ

- **Carrie Supressed Return-to-Zero (CSRZ)**
- tento typ modulace se řadí do třídy **pseudo-vícestavových modulací** (pseudomultilevel)
- je charakterizována změnou fáze optické nosné u každého bitového intervalu, nezávisle na jeho logické hodnotě (log. 1 nebo log. 0)
- tato modulace se nejlépe realizuje pomocí MZM modulátoru, viz předchozí „slide“
- vzhledem k tomu, že je zhruba u $\frac{1}{2}$ bitů **fáze kladná** a u **druhé poloviny bitů záporná**, v průměru se odečtou a ve spektru signálu se nenachází velká výkonová složka nosné, která sama o sobě žádnou informaci nenese - následně lze tedy zvýšit výkon jen do té části spektra, která nese užitečnou informaci
- tato modulace vykazuje obecně lepší odolnost proto nelineárním jevům při rychlostech 40 Gbit/s
- její další výhodou je, že signál s touto modulací lze vcelku „ostře“ filtrovat, aniž by ztratila své kvality - lze z ní také udělat optickou filtrací signál s částečně potlačeným postranním pásmem - VSB modulaci



Modulace s frekvenčně rozmítanou optickou nosnou a návratem signálu k nule- CRZ

- Chirped Return-to-Zero (CRZ)
- patří do třídy RZ modulací, kde se ale mírně mění v čase (**chirping**) fáze optické nosné v době vysílání RZ pulsu
- rozmítání vede k větší šířce optického spektra, které tato modulace zabírá - > horší spektrální účinnost
- tato modulace většinou velice dobře odolává nelineárním jevům (oproti klasické RZ a NRZ modulaci) a je laditelná na konkrétní velikost zbytkové disperze
- dnes se velice často tento typ modulace používá u dálkových podmořských tras, kde se sice kompenzuje disperzní mapou celková disperze trasy, ale díky sklonu disperzní charakteristiky vláken jsou některé DWDM kanály nedokompenzované - zde lze vhodným nastavením velikosti rozmítání přizpůsobit daná kanál zbytkovým disperzním podmínkám trasy
- modulační amplituda fáze je kolem 1 rad/puls
- pro realizaci CRZ modulace je nutné použít ještě jeden frekvenční modulátor (náročnější na synchronizaci) nebo použít „dual-drive“ MZM

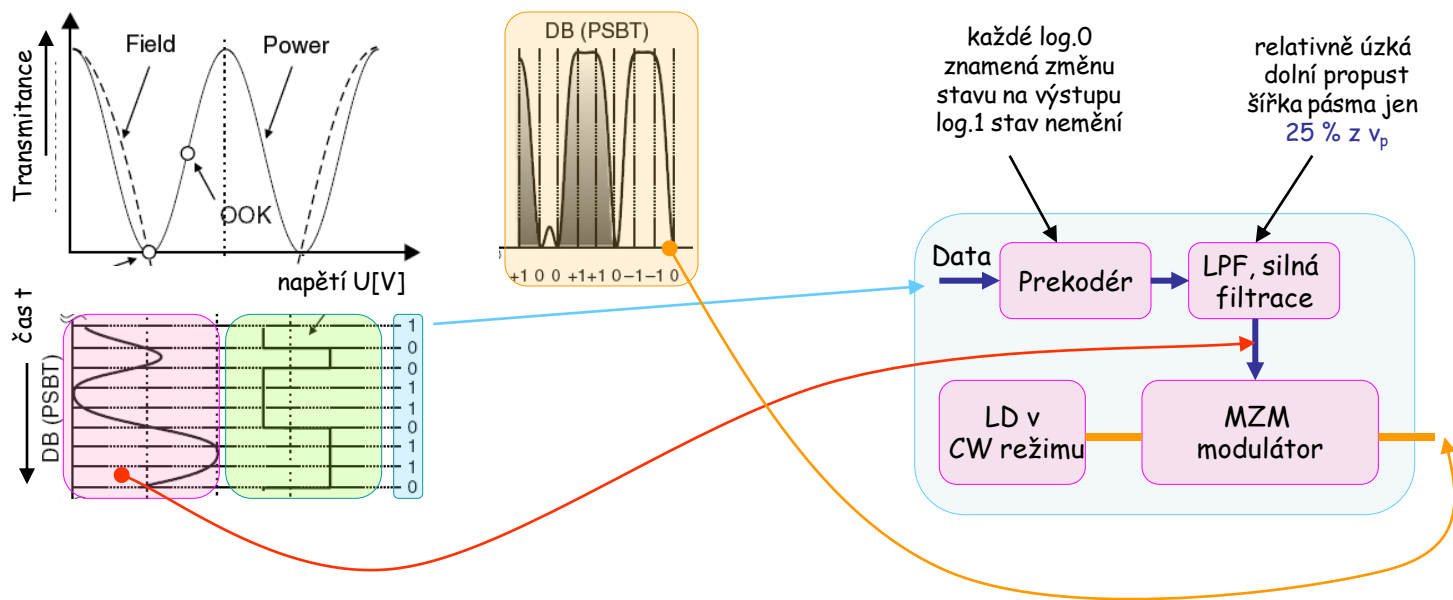


Modulace s potlačeným spektrem VSB a SSB

- do této třídy patří dvě modulace
 - se zcela potlačeným jedním pásmem **SSB** (Single Side Band)
 - s částečně potlačeným pásmem **VSB** (Vestigial Side Band)
- obě tyto modulace využívají myšlenky, že při modulaci vznikají dvě postranní pásma, kde každý z nich nese stejnou informaci, proto není nutné přenášet obě, ale stačí jen jediné
- SSB se v praxi realizuje dosti komplikovaně kvadraturní modulací, kde na I je datový signál a na Q je jeho signál po Hilbertově transformaci (problém s realizací širokopásmového Hilbert transformátoru)
- častěji se setkáme s VSB modulací, která vznikne ryze optickou filtrací klasicky modulované nosné (obě postranní pásma)
- optickou filtraci lze provést na straně vysílače -> zvýšení spektrální účinnosti v DWDM systémech nebo na straně přijímače
- tuto modulaci lze kombinovat např. s CRZ, NRZ nebo RZ, takže vznikají modulace VSB-RZ, VSB-NRZ nebo VSB-CRZ
- VSB je stejně dobře odolná vůči nelineárním jevům jako její oboupásmové protějšky pro rychlosti 20 Gbit/s a výše, pro nižší rychlosti se ukazuje, že díky nelinearitám se částečně obnoví potlačené pásmo a tím se zmenšuje spektrální účinnost

Duobinární modulace - DB

- patří do třídy modulací s pamětí
- při zachování stejné modulační rychlosti umožňuje získat robustnější signál odolnější vůči CD disperzi !!
- schopnost potlačení CD u DB spočívá v tom, že sousední log.1 symboly, mezi nimiž je log.0 symbol, mají vzájemně obrácenou fázi, takže při překrytí hran (projev ISI) se příspěvky odečtou, naopak u OOK se konstruktivně sčítají a dochází k ISI
- odolnost pro nelinearity je zhruba shodná s OOK modulacemi
- silnější nelinearity však mohou zcela degradovat výhody DB modulace
- při 40 Gbit/s se chová o něco lépe než OOK, nicméně složitější vícecestavové modulace DB modulaci předčí



Závěr a shrnutí

- s neustálým navyšováním potřebné kapacity je nutné řešit otázku spektrální účinnosti i u optických systémů
- rychlostní limit současných elektronických obvodů vede k opětovnému zvážení použití vícecestavových fázových modulací, které při zachování stejné přenosové rychlosti umožňují snížit modulační rychlost nebo naopak při zachování modulační rychlosti umožňují zvýšit přenosovou rychlost
- trend **NIL** (**Nothing In Line**) v páteřních sítích zvyšuje nároky na trasu a zkreslení signálu
- pro kompenzaci vlivu CD a PMD se používají elektronické kompenzátory disperze **EDC**
- pro snížení BER se začínají uplatňovat rychlé FEC kódy založené na Reed Solomon (RS) kódech
- 100 Gbit/s Ethernet PHY (fyzická vrstva) standard pro dálkové trasy bude s největší pravděpodobností používat modulaci DPo-DQPSK (**Dual Polarisation Differential Quadrature Phase Shift Keying**) v kombinaci s FEC RS kódem
- propustnost sítě je dána technologickým limitem uzlů, uzly (IP směrovače , apod.) dnes zaostávají za dosažitelnou rychlostí přenosových systémů
- metody optického přepínání jako je „optical packet switching“ a nebo „burst switching“ jsou zatím prakticky v nedohlednu (proveditelnost ale zkoumána již před min. 15 lety)
- posun v aplikacích CWDM sítí v MANech
- čistě optické zpracování signálu je zatím jen snem !!