

Plně optické zpracování signálů ve vláknových optických sítích

Pavel Honzátko

Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, Praha

Optické komunikace 2012, 25.10. 2012

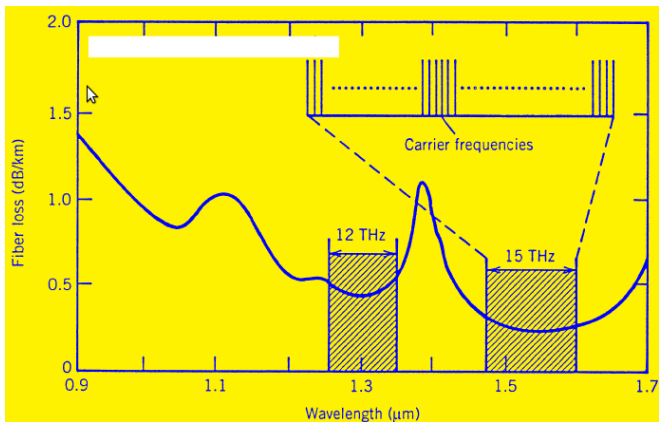


- 1 Úvod
- 2 TDM: Systémy s časovým multiplexem
 - Pokročilé experimenty - 100Gb/s Ethernet, 1Tb/s Ethernet
 - Plně optické metody zpracování v systémech TDM
 - Vlnový konvertor založený na křížové fázové modulaci ve vysoce nelineárním vlákně a braggovské mřížce
 - Převodník formátu RZ na NRZ s využitím Sagnacova interferometru
- 3 WDM: Systémy s vlnovým multiplexem
 - Pokročilé experimenty
 - Modulační formáty a spektrální efektivita
 - Plně optické síťové prvky v sítích WDM
 - Vlnové konvertory založené na čtyřvlnovém směšování
 - Opakovač DPSK založený na degenerovaném FWM
- 4 OFDM: Ortogonální kmitočtový multiplex
- 5 Závěr

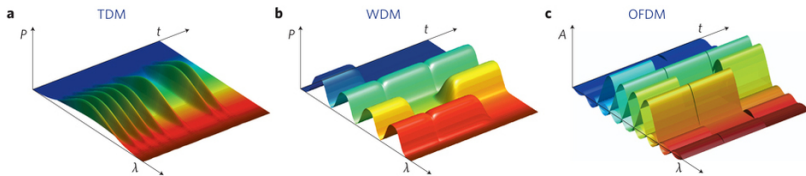
Outline

- 1 Úvod
- 2 TDM: Systémy s časovým multiplexem
 - Pokročilé experimenty - 100Gb/s Ethernet, 1Tb/s Ethernet
 - Plně optické metody zpracování v systémech TDM
 - Vlnový konvertor založený na křížové fázové modulaci ve vysoce nelineárním vlákně a braggovské mřížce
 - Převodník formátu RZ na NRZ s využitím Sagnacova interferometru
- 3 WDM: Systémy s vlnovým multiplexem
 - Pokročilé experimenty
 - Modulační formáty a spektrální efektivita
 - Plně optické síťové prvky v sítích WDM
 - Vlnové konvertory založené na čtyřvlnovém směšování
 - Opakovač DPSK založený na degenerovaném FWM
- 4 OFDM: Ortogonální kmitočtový multiplex
- 5 Závěr

Pásmo propustnosti optických vláken



Využití pásma propustnosti optických vláken



D. Hillerkuss et al., Nature Photonics 5, 364–371 (2011)

Time division multiplexing

Sériový přenos signálů
 Vysoká přenosová rychlost
 → Krátké pulzy
 → Optické zpracování
 → Široké spektrum
 → Disperze, nelinearita

Wavelength division multiplexing

Mnohokanálový přenos nezávislých signálů
 Standard: stupnice ITU
 C pásmo 1530–1570 nm,
 L pásmo 1570–1620 nm
 Kmitočty: 196–186 THz
 Rozteč kanálů 100 GHz
 cca 100 kanálů

Orthogonal frequency division multiplexing

Paralelní přenos signálu
 Modulace fázově koherentních subnosných
 Spektrální efektivita až 7b/s/Hz
 Odolnost proti disperzi, PMD

Outline

- 1 Úvod
- 2 TDM: Systémy s časovým multiplexem
 - Pokročilé experimenty - 100Gb/s Ethernet, 1Tb/s Ethernet
 - Plně optické metody zpracování v systémech TDM
 - Vlnový konvertor založený na křížové fázové modulaci ve vysoce nelineárním vlákně a braggovské mřížce
 - Převodník formátu RZ na NRZ s využitím Sagnacova interferometru
- 3 WDM: Systémy s vlnovým multiplexem
 - Pokročilé experimenty
 - Modulační formáty a spektrální efektivita
 - Plně optické síťové prvky v sítích WDM
 - Vlnové konvertory založené na čtyřvlnovém směšování
 - Opakovač DPSK založený na degenerovaném FWM
- 4 OFDM: Ortogonální kmitočtový multiplex
- 5 Závěr

TDM: Pokročilé experimenty - 100Gb/s Ethernet

Cíl: 100Gb/s Ethernet

- Standardizace-kompatibilita zařízení
- Jednoduchost
- Flexibilita
- Nízká cena

Je kompatibilní s optickými transportními sítěmi (OTN, optical transport network) definovanými ITU-T. OTN se skládá z optických síťových prvků (ONE, optical network elements) zajišťujícími

- transport
- multiplexování
- přepínání
- řízení
- dohled

TDM: Pokročilé experimenty - 100Gb/s Ethernet

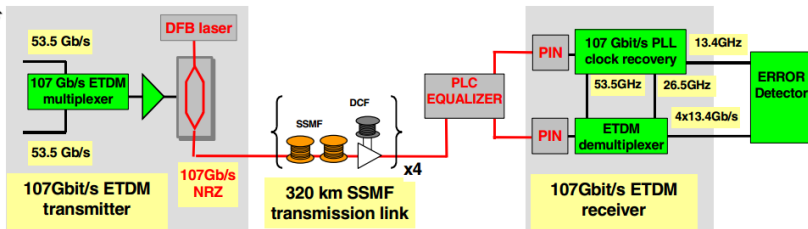
Integrovaný eTDM přijímač 107 Gb/s, Fraunhofer Institute, Berlin

480 km disperzně manipulované trasy, C. Schubert et al.

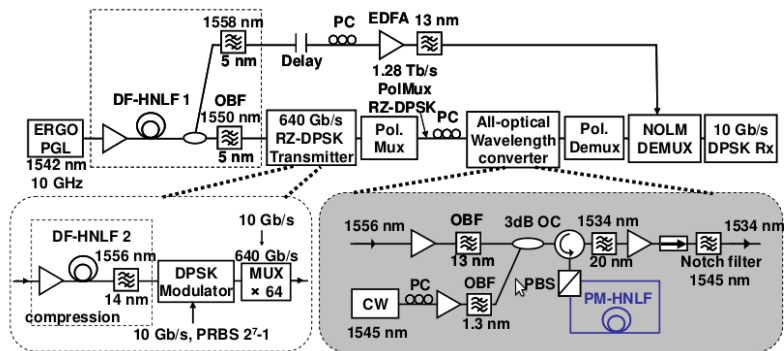
J. of Lightwave Technol. 25, 122-130 (2007).

320 km SSMF trasy, K. Schuh et al., OFC2007, Paper OWE2, Alcatel.

Disperze kompenzovaná DCF a IO kompenzátořem se 7 MZI



TDM: Pokročilé experimenty: 1Tb/s Ethernet



Laboratorní přenos 1.28 Tb/s v systému POLMUX DPSK
 Hu et al., Opt. Express 18, 9961, 2010

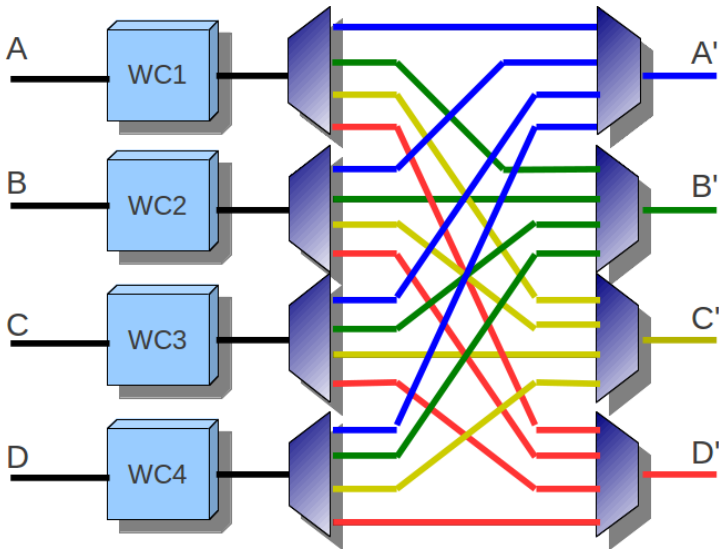
Plně optické metody zpracování v systémech TDM

- ⊕ Obchází optoelektronické konverze
- ⊕ Obvodová jednoduchost, spolehlivost

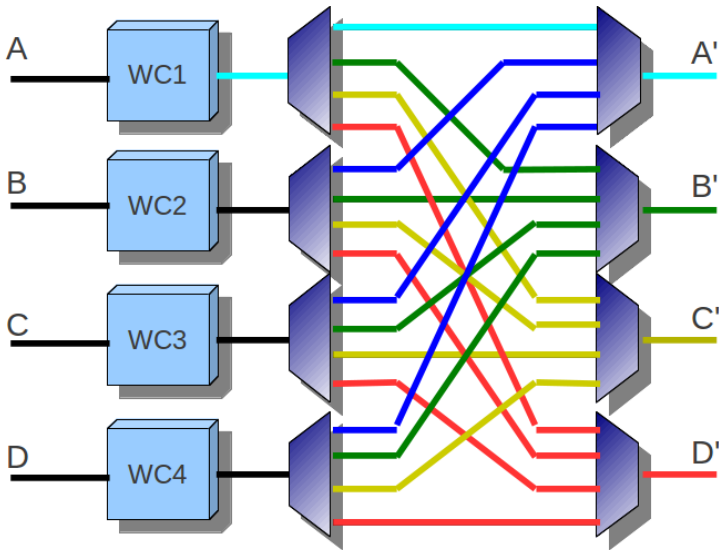
Základní obvody

- Vlnový konvertor
- Směrovač paketů
- Převodník formátu (rozhraní mezi dálkovými trakty a metropolitními sítěmi, zlepšení parametrů dálkových traktů)
- Opakovač - 1R, 2R, 3R.
- Diagnostické přístroje - optický vzorkovací osciloskop, generátor PRBS, měřič chybovosti

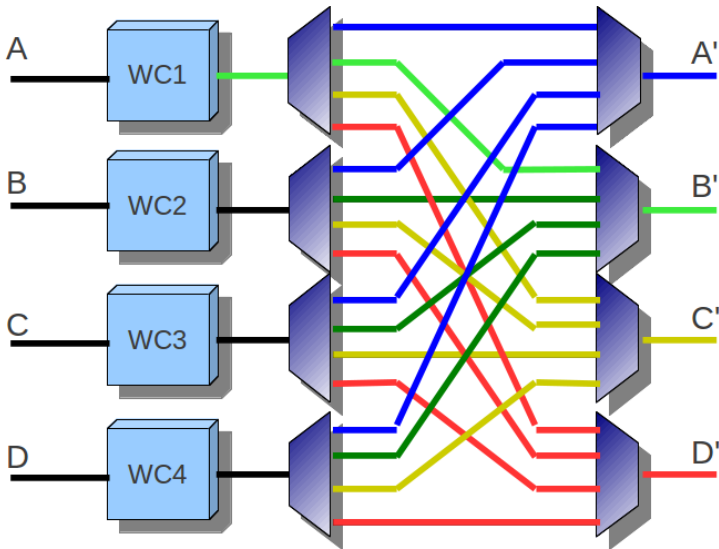
Směrovač paketů



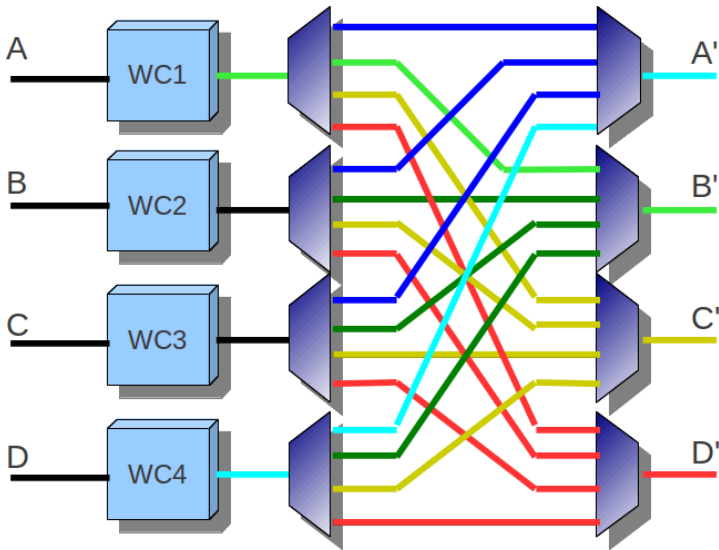
Směrovač paketů



Směrovač paketů



Směrovač paketů



Vlnový konvertor

Nelinearity v optických vláknech

- ⊖ Dlouhá délka.
- ⊖ Menší stabilita (proměnné zpoždění, polarizace).
- ⊕ Velká šířka pásma.
- ⊕ Nízký šum.

Nelinearity v SOA

- ⊕ Krátká interakční délka.
- ⊕ Kompaktní půdorys.
- ⊖ Rezonanční SOA - závislost na historii (patterning).
- ⊖ Transparentní SOA - velký rozdíl vstupního a konvertovaného signálu.

Kaskádní nelinearity v PPX

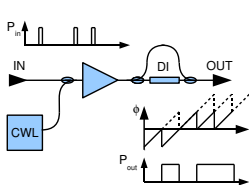
- ⊕ Krátká interakční délka.
- ⊕ Kompaktní půdorys.
- ⊕ Velká šířka pásma.
- ⊕ Nízký šum.

Vlnové konvertory s polovodičovým optickým zesilovačem

Modulace koncentrace nosičů

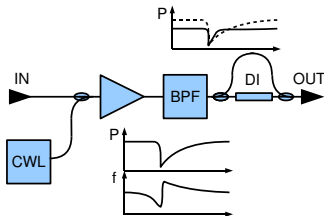
- Spektrální zářez
- Ohřev nosičů
- Mezipásové přechody

XGM + XPM + DI



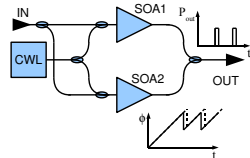
J. Leuthold *et al*, "100 Gbit/s all optical wavelength conversion ..", Electron. Lett. 36, 1129, 2000.

XGM + XPM + FILTER + DI



Y. Liu *et al*, "Error-free all-optical wavelength conversion at 160 Gb/s .." J. Lightwave Technol., vol. 24, no. 1, p. 230236, 2006.

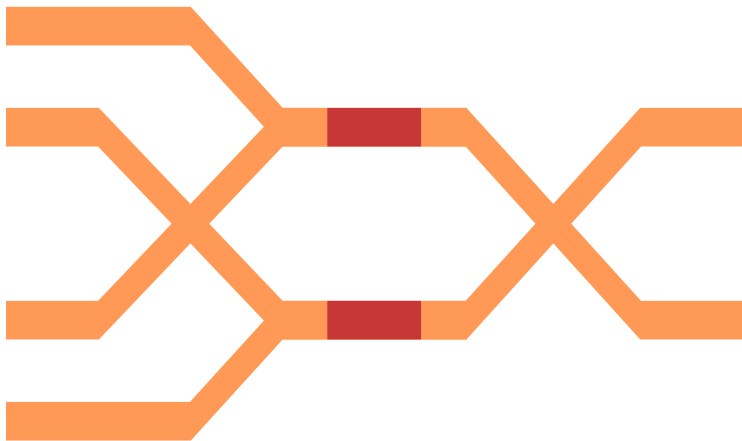
XGM + XPM + MZI



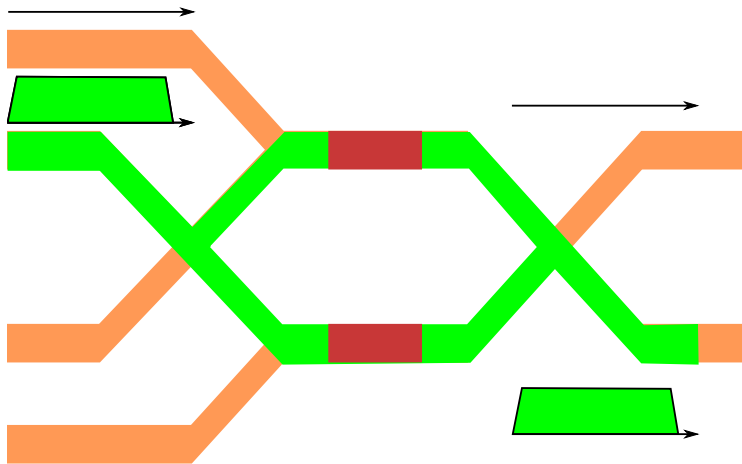
Y. Ueno *et al*, US patent No. 6,208,455 B1, 2001.



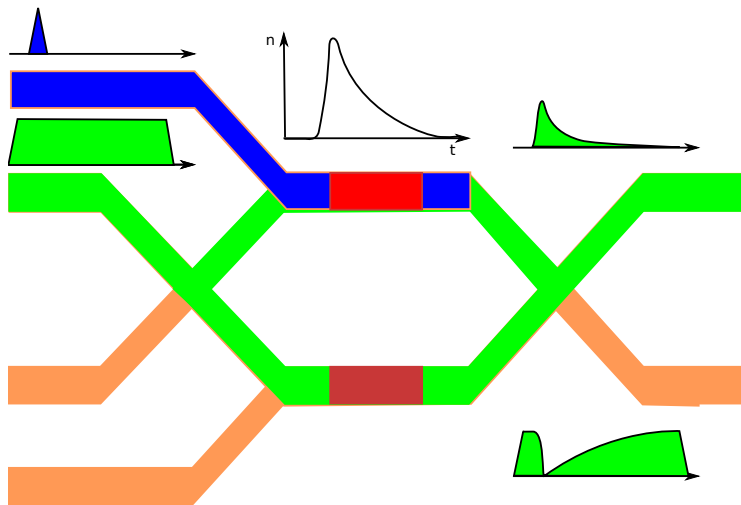
Vlnový konvertor se SOA v MZI



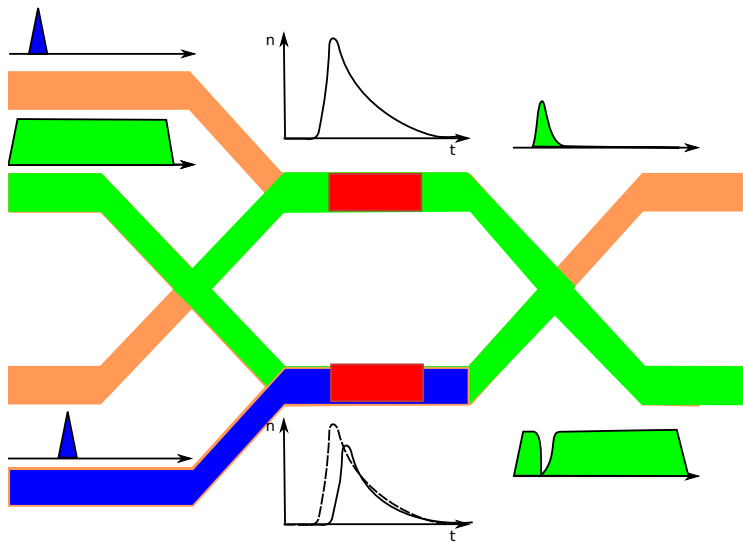
Vlnový konvertor se SOA v MZI



Vlnový konvertor se SOA v MZI



Vlnový konvertor se SOA v MZI

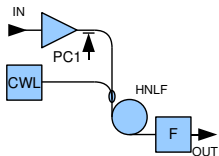


Vláknové vlnové konvertory

Nelinearita v optických vláknech - Kerrův jev: $n = n_0 + n_2 I$

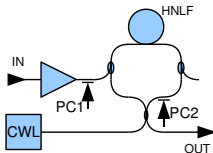
- Automodulace fáze
- Křížová fázová modulace
- Čtyřvlnové směšování

XPM + Filtration



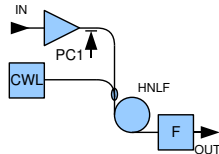
B. Olsson *et al*, IEEE Photon. Technol. Lett., 12, 846-848, 2000.

NOLM



J. Yu *et al*, IEEE J. Lightwave Technol. 18, 1001-1005, 2000.

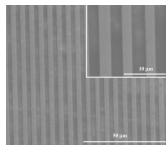
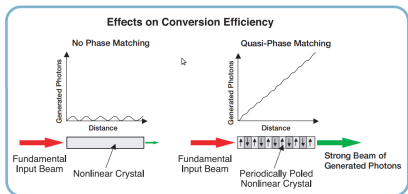
FWM



K. Igarashi *et al*, OFC, Technical Digest (CD), 2004 paper TuC6.

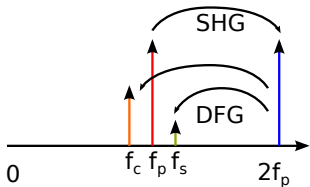


Vlnové konvertory s PPX

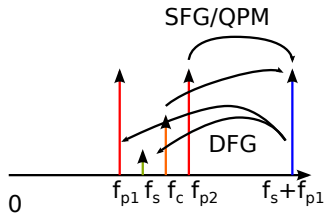


J.J. Carvajal et al., Journal of Luminescence 129, 2009, 1441-1447

cSHG/DFG

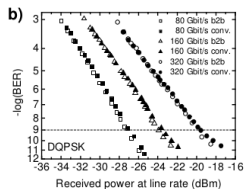
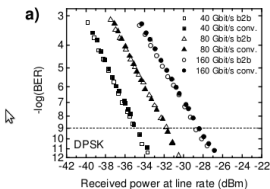
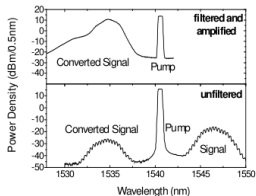


cSFG/DFG



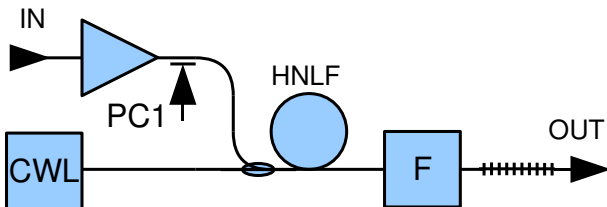
Vlnové konvertory s PPX

Zachovávají amplitudovou i fázovou informaci



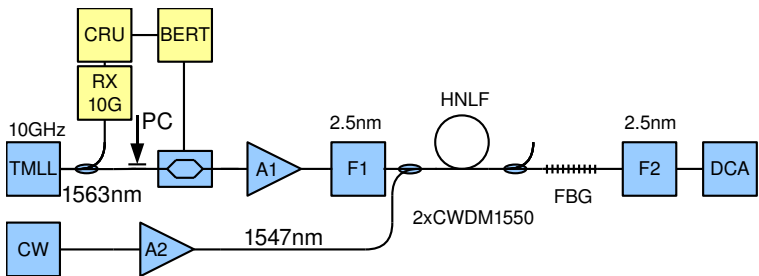
B. Huettl et al., 320 Gbit/s DQPSK All-Optical Wavelength Conversion using Periodically Poled LiNbO₃, CLEO, CThF1.

Vlnový konvertor založený na křížové fázové modulaci ve vysoce nelineárním vlákně a braggovské mřížce



Motivace

- Vyšší konverzní účinnost než metoda založená na XPM/filtraci a na nelineární vláknové smyčce
- Vyšší stabilita než nelineární vláknová smyčka s obyčejným, polarizaci nezachovávajícím vláknem
- Nepotřebuje fázovou synchronizaci jako FWM

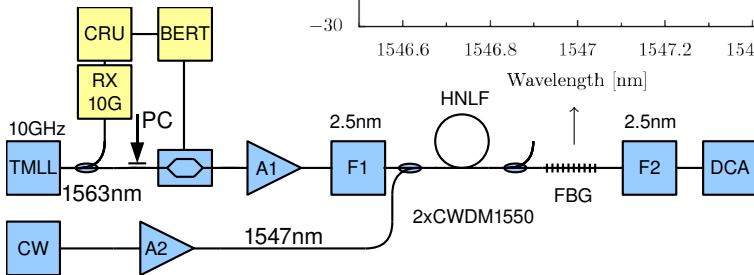
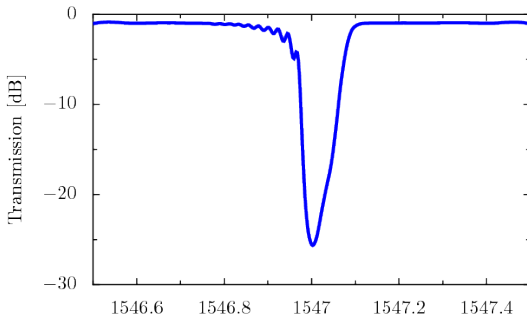


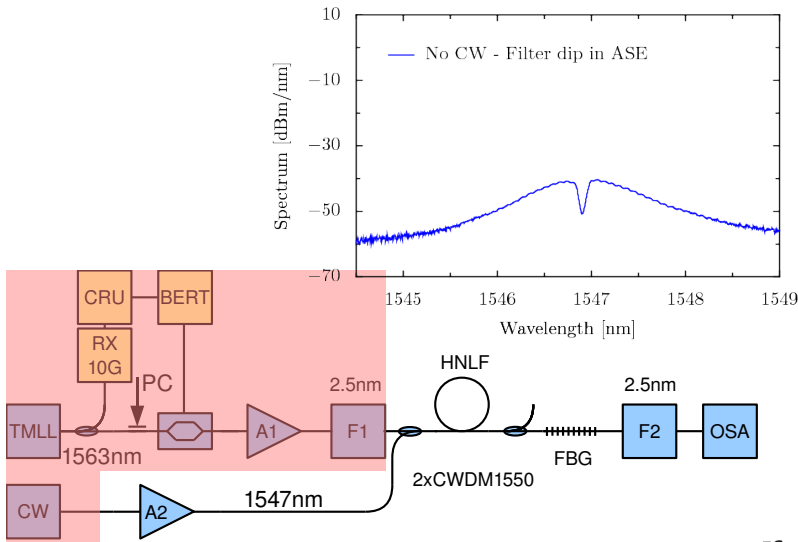
Fiber Bragg grating params:

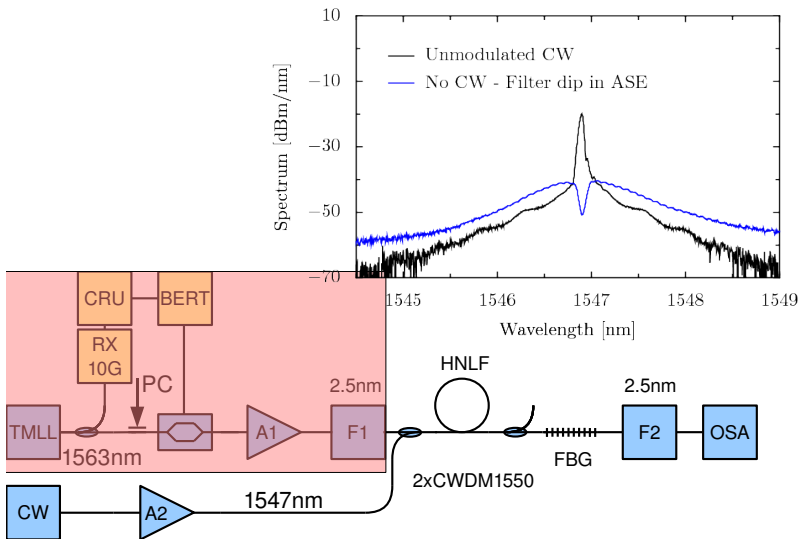
$$T_{dip} - T_{nr} = 24.5 \text{ dB}$$

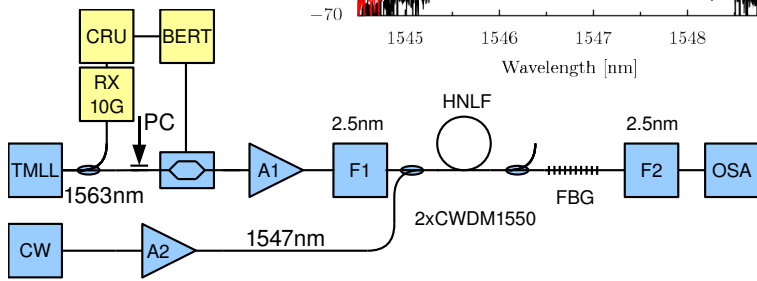
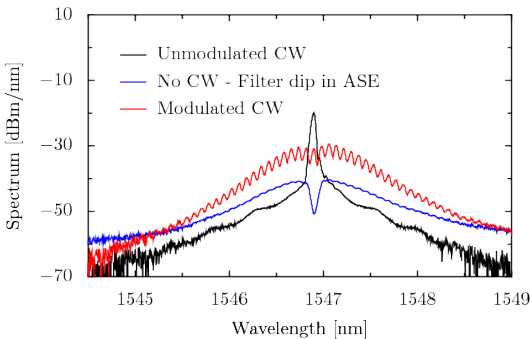
$$B = 0.13 \text{ nm}$$

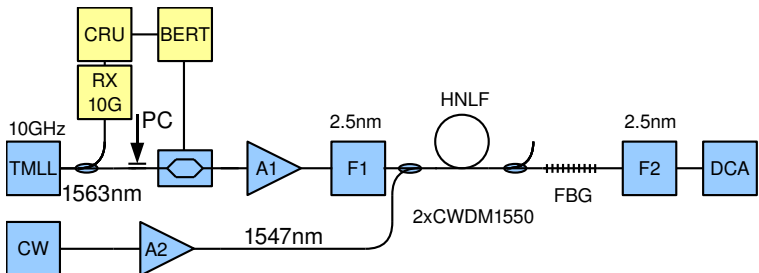
$$\lambda_r = 1547 \text{ nm}$$





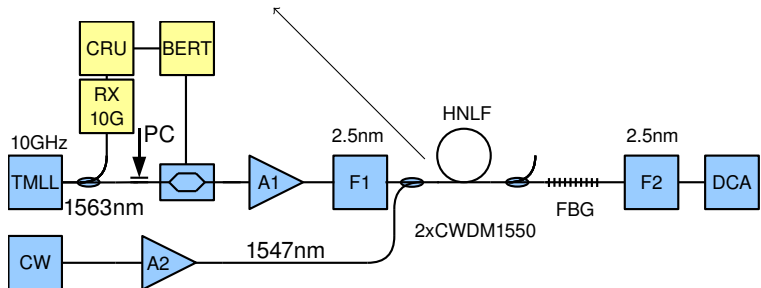
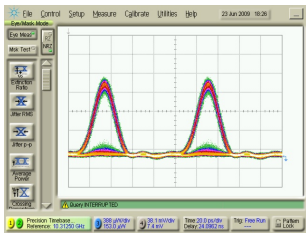






Pavel Honzátko

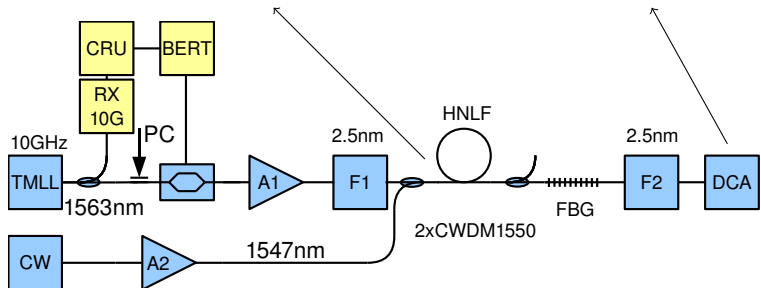
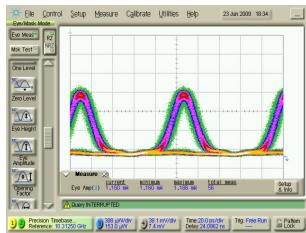
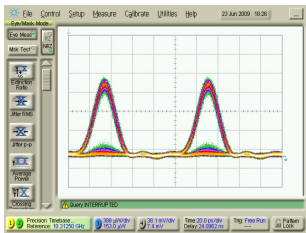
Plně optické zpracování signálů ve vláknových optických sítích



Pavel Honzátko

Plně optické zpracování signálů ve vláknových optických sítích

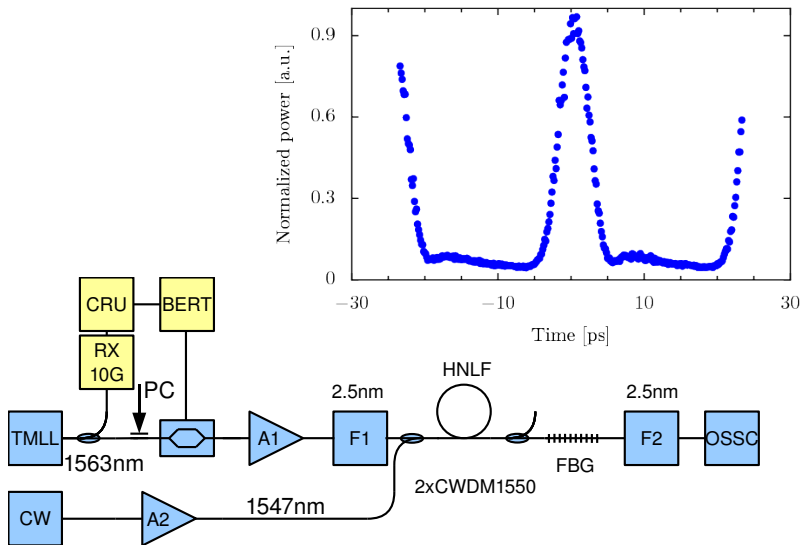




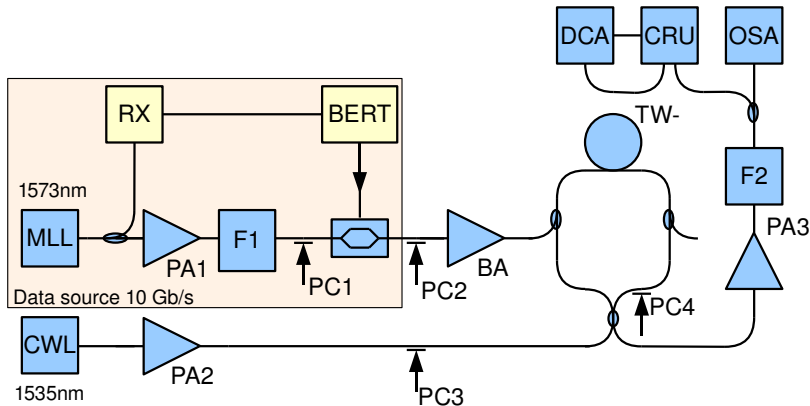
Pavel Honzátko

Plně optické zpracování signálů ve vláknových optických sítích





Převodník formátu RZ na NRZ s využitím Sagnacova interferometru

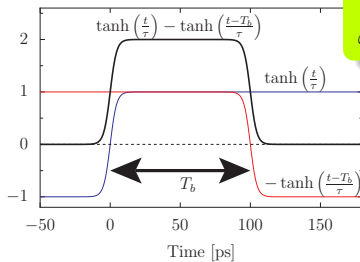
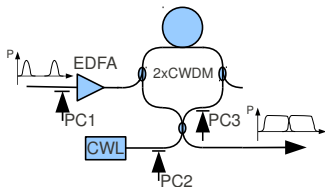


Převodník formátu RZ na NRZ s využitím Sagnacova interferometru

Motivace

- Rozhraní přístrojů vyžadujících na vstupu signál NRZ
- Na dálkových trasách snížení zkreslení spojené s jedním druhem modulačního formátu
- Rozhraní dálkových a metropolitních sítí
 - Demultiplexace RZ ze 100 Gb/s na 10 Gb/s
 - Převod 3ps RZ pulzů na 100ps NRZ

Převodník formátu RZ na NRZ s využitím Sagnacova interferometru



Nonlinear phase shifts for sech-pulse

$$\varphi_{NL}^+ = \eta + \gamma P_p \int_0^L \text{sech}^2[(t - \sigma\xi)/\tau] d\xi$$

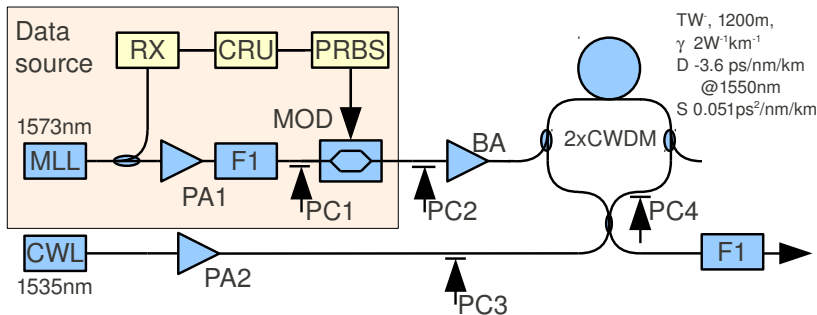
$$= \eta + \gamma \bar{P}L \{ \tanh[(t - T_b)/\tau] - \tanh[t/\tau] \}$$

$$\varphi_{NL}^- = \eta - \gamma \bar{P}L$$

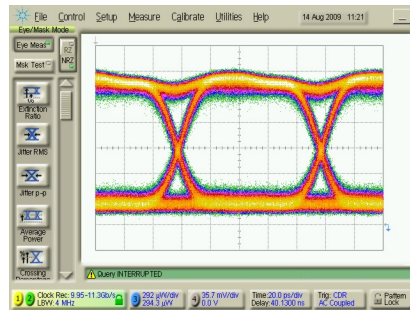
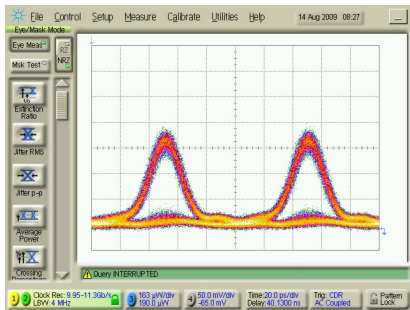
- The width of the phase deviation is given by walk-off
- The magnitude depends only on $\bar{P}L$.



Experimental realization of RZ/NRZ converter based on NOLM



Experimental realization of RZ/NRZ converter based on NOLM - Results



Outline

- 1 Úvod
- 2 TDM: Systémy s časovým multiplexem
 - Pokročilé experimenty - 100Gb/s Ethernet, 1Tb/s Ethernet
 - Plně optické metody zpracování v systémech TDM
 - Vlnový konvertor založený na křížové fázové modulaci ve vysoce nelineárním vlákně a braggovské mřížce
 - Převodník formátu RZ na NRZ s využitím Sagnacova interferometru
- 3 WDM: Systémy s vlnovým multiplexem
 - Pokročilé experimenty
 - Modulační formáty a spektrální efektivita
 - Plně optické síťové prvky v sítích WDM
 - Vlnové konvertory založené na čtyřvlnovém směšování
 - Opakovač DPSK založený na degenerovaném FWM
- 4 OFDM: Ortogonální kmitočtový multiplex
- 5 Závěr

WDM: Systémy s vlnovým multiplexem

Mnohokanálový přenos nezávislých signálů

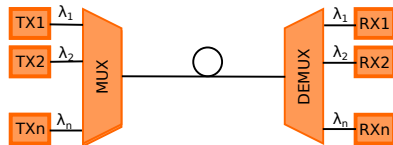
Kmitočty definovány stupnicí ITU

C pásmo 1530-1570 nm, L pásmo 1570-1620 nm

Rozteč kanálů 100 GHz, příp. 50GHz

10 Gb/s při rozteči 100 GHz →
spektrální efektivita 0.1b/s/Hz

40 Gb/s při rozteči 50 GHz →
spektrální efektivita 0.8b/s/Hz



Modulační formáty - binární

Spektrální efektivita teoreticky 1b/s/Hz
Nízká odolnost proti kaskádnímu filtrování (OADM)

On-off-keying (OOK)

Spektrální efektivita až 0.7b/s/Hz (FEC 7%,
přeslechy, drift laserů)

Differential phase shift keying (DPSK)

Spektrální efektivita až 0.8b/s/Hz

Duobinární formát (DB)

Spektrální efektivita 2x
lepší než NRZ. Inter-
symbolová interference
zavedena kontrolovaně.

Modulační formáty - vícestavové

Kombinovaná modulace amplitude, fáze, polarizace

Spektrální efektivita prakticky až 6b/s/Hz (RZ-DBPSK-ASK, Jeppesen, CLEO2005, CMQ4)

Menší symbolová rychlost → větší odolnost k D a PMD

Vyžadují větší SNR

Menší odolnost proti NL

Return-to-zero differential quaternary phase-shift keying (RZ-DQPS)

5.12 Tb/s = 64 × 85.4 Gb/s, spektrální efektivita 1.6 b/s/Hz

3x větší odolnost proti D než RZ-DPSK

Yoshikane, ECOC 2004 Th4.4.3

POLMUX RZ-DQPS

Složitější RX

Menší tolerance k PMD
POLMUX se dá kombinovat s D(Q)PSK.

Nedá se kombinovat s OOK kvůli XPM.

2-b/s/Hz, 40 Gb/s, 4x100 km SMF28

P. S. Cho, Photon. Technol. Lett. 16,

656–658, 2005.

POLMUX 16-QAM

112Gb/s, 14 GBaud, rozteč 25 GHz, spektrální efektivita 4.1b/s/Hz, 1022km nekompenzovaná SMF.

Rozteč 16.67 GHz, spektrální efektivita 6.2b/s/Hz, 630km

Winzer, Bell Lab

J. Lightwave Technol. 28, 2010, 547.

WDM: Pokročilé experimenty

Zaměření se na přenosovou kapacitu vlákna

NTT/ECOC 2006:

14 Tb/s = $2 \times 70 \times 111$ Gb/s

70 kanálů s roztečí 100 GHz

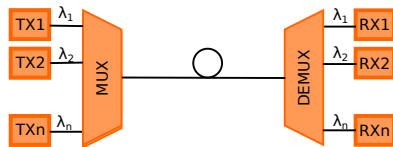
Celkem 7 THz, omezeno zesilovači

Modulační formát

PMUX-CSRZ-DQPSK

Vzdálenost 160 km

Spektrální efektivita 2.2b/s/Hz



WDM: Pokročilé experimenty

NEC:

32 Tb/s = 320x114Gb/s

Rozteč 25 GHz, Pásmo 8 THz

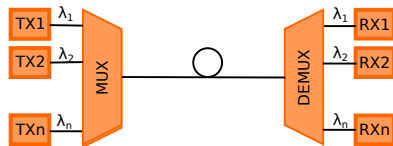
580km

POLMUX-RZ-8QAM, koherentní
detekce

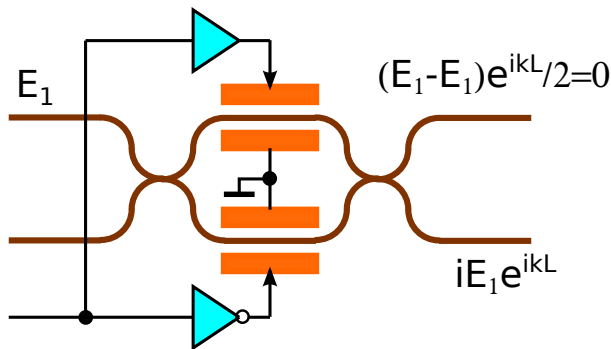
Spektrální efektivita 4.6b/s/Hz

C/L EDFA, SMF28 ULL (ITU G.652)

X. Zhou et al., J. of Lightwave Technol. 28, 456-465, 2010.



Modulátor OOK - MZI v komplementárním zapojení

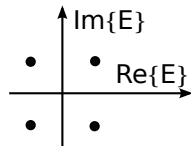
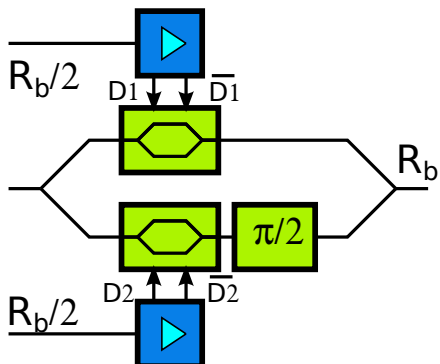


$$E = iE_1 \left(e^{i\varphi_u} + e^{i\varphi_l} \right) = iE_1 e^{i\varphi} \left(e^{i\delta\varphi} + e^{-i\delta\varphi} \right)$$

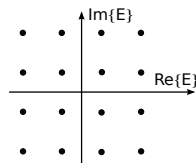
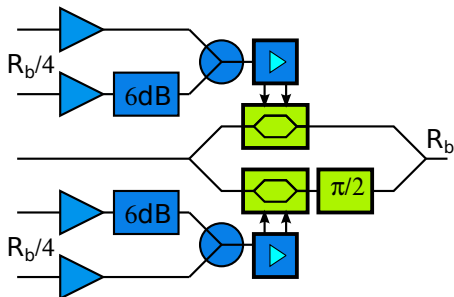
$$\varphi = (\varphi_u + \varphi_l)/2, \quad \delta\varphi = (\varphi_u - \varphi_l)/2$$

Komplementární zapojení \rightarrow Nulový chirp: $\varphi_u = -\varphi_l \rightarrow \varphi = 0$.

Modulátor DQPS - I/Q modulátor



Modulátor 16-QAM



Princip vlnové konverze - Čtyřvlnové směšování (FWM)

Zákony zachování

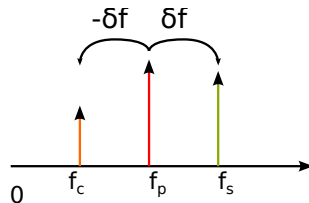
Zákon zachování energie

$$2f_p = f_s + f_c$$

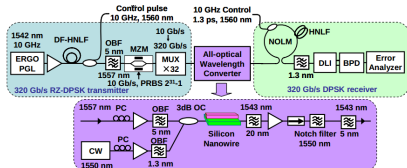
$$\delta f = f_s - f_p = f_p - f_c$$

Zákon zachování hybnosti
fázový synchronismus

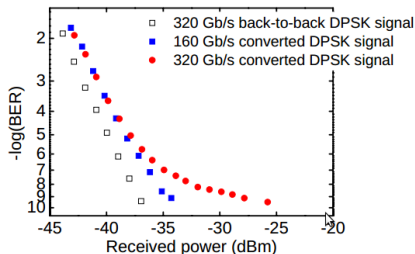
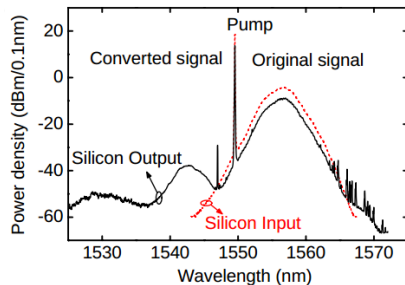
$$2\beta_p - \beta_s - \beta_c + \delta\beta^{NL} = 0$$



Vlnová konverze signálu RZ-DPSK s rychlostí 320 Gb/s



ERGO: 10 GHz/1.5ps pulzy
 Kompresa + SPM: 400m DF-HNLF,
 $D = -0.45 \text{ ps/nm/km}$, $\gamma = 10.5 \text{ /W/km}$
 Filtrace, modulace, multiplexace,
 375fJ/b, 1ps
 FWM: Křemíkové nanovláknno: 250nm
 x 450nm x 3.6mm



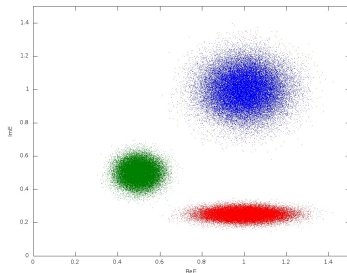
H. Hu et al., 320 Gb/s Phase-Transparent Wavelength Conversion in

a Silicon Nanowire, OSA/OFC/NFOEC 2011, OWG6.pdf

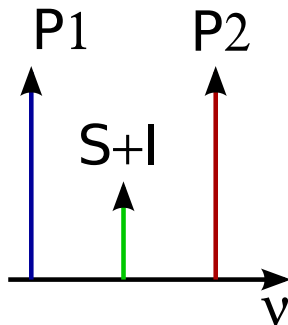
Opakovač DPSK

DPSK citlivý na fázový šum -
 zesilovače, NL interakce
 Parametrický zesilovač - fázově závislé
 zesílení → stlačení fázového šumu
 Saturovaný režim - stlačení
 amplitudového šumu

$$E'_I = E_I G, \quad E'_Q = E_Q / G.$$



Opakovač DPSK založený na degenerovaném FWM



Konstruktivní interference

$$\varphi_I = \varphi_S.$$

Degenerované FWM se dvěma čerpacími signály

Degenerované FWM - signálový kmitočet uprostřed dvou čerpacích kmitočtů

$$\nu_S = (\nu_{P1} + \nu_{P2})/2.$$

Zákon zachování energie

$$\nu_I = \nu_{P1} + \nu_{P2} - \nu_S.$$

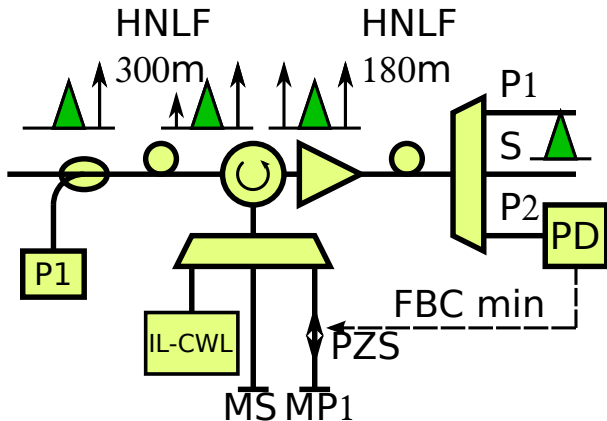
Fázový synchronismus

$$\varphi_I = \varphi_{P1} + \varphi_{P2} - \varphi_S.$$

Destruktivní interference

$$\varphi_I = \varphi_S + \pi.$$

Opakovač DPSK založený na degenerovaném FWM



R. Slavík et al., IEEE J. of Sel. Topics in Quant. Electronics, 18, 859, 2012

Outline

- 1 Úvod
- 2 TDM: Systémy s časovým multiplexem
 - Pokročilé experimenty - 100Gb/s Ethernet, 1Tb/s Ethernet
 - Plně optické metody zpracování v systémech TDM
 - Vlnový konvertor založený na křížové fázové modulaci ve vysoce nelineárním vlákně a braggovské mřížce
 - Převodník formátu RZ na NRZ s využitím Sagnacova interferometru
- 3 WDM: Systémy s vlnovým multiplexem
 - Pokročilé experimenty
 - Modulační formáty a spektrální efektivita
 - Plně optické síťové prvky v sítích WDM
 - Vlnové konvertory založené na čtyřvlnovém směšování
 - Opakovač DPSK založený na degenerovaném FWM
- 4 OFDM: Ortogonální kmitočtový multiplex
- 5 Závěr

OFDM: Ortogonální kmitočtový multiplex

Subnosné ortogonální s ohledem na

integraci přes symbolovou periodu

Spektrální efektivita až 7b/s/Hz

Modulace pomocí iFFT.

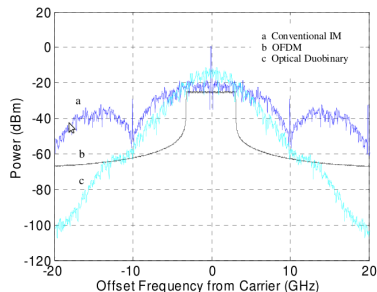
Demodulace pomocí FFT.

Pokud je kanál lineární, demodulace

bez ISI.

Není nutná analogová filtrace

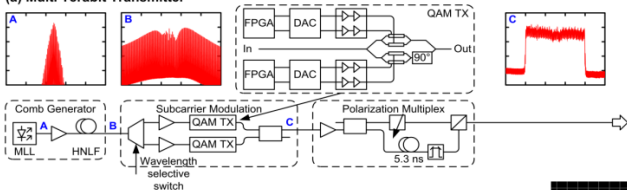
subnosných.



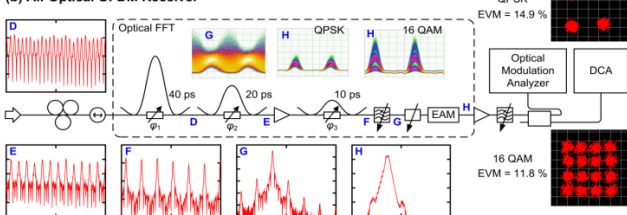
OFDM: Pokročilé experimenty

Zaměřují se na formulaci principů, maximální kapacitu a spektrální efektivitu. Hillerkus, OFC 2010: Plně optická FFT pro generování a demultiplexování 10.8 Tb/s, 75 subnosných, POLMUX 16-QAM, spektrální efektivita 5.8b/S/Hz, rozteč čar 25 GHz, symbolová rychlost 18 Gbd.

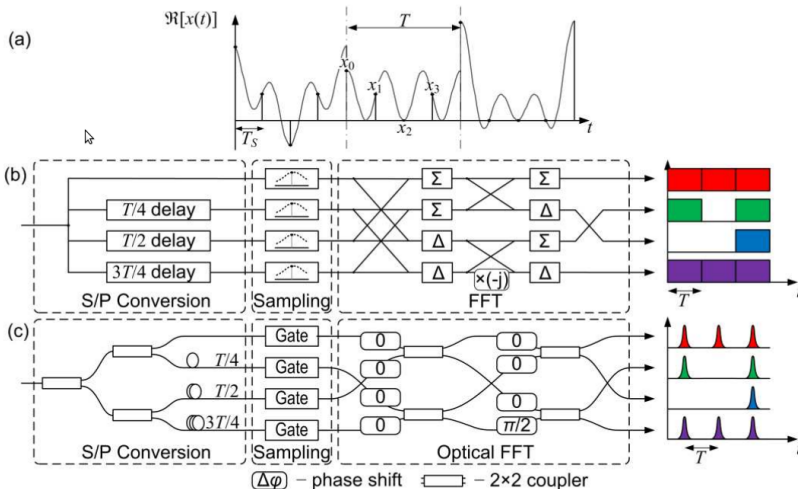
(a) Multi Terabit Transmitter



(b) All-Optical OFDM Receiver



OFDM: FFT

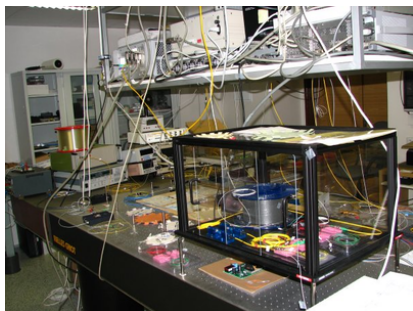


Outline

- 1 Úvod
- 2 TDM: Systémy s časovým multiplexem
 - Pokročilé experimenty - 100Gb/s Ethernet, 1Tb/s Ethernet
 - Plně optické metody zpracování v systémech TDM
 - Vlnový konvertor založený na křížové fázové modulaci ve vysoce nelineárním vlákně a braggovské mřížce
 - Převodník formátu RZ na NRZ s využitím Sagnacova interferometru
- 3 WDM: Systémy s vlnovým multiplexem
 - Pokročilé experimenty
 - Modulační formáty a spektrální efektivita
 - Plně optické síťové prvky v sítích WDM
 - Vlnové konvertory založené na čtyřvlnovém směšování
 - Opakovač DPSK založený na degenerovaném FWM
- 4 OFDM: Ortogonální kmitočtový multiplex
- 5 Závěr

Závěr

- Roční nárůst objemu přenesených dat o 40%.
- Rychlý rozvoj optických sítí - páteřních i přístupových (FTTH).
- Na páteřních sítích se od r. 2006 instalují 40 Gbps systémy, od r. 2009 100 Gbps (Verizon).
- Experimentální TDM systémy umožňují přenosy rychlostí 1.2 Tb/s v jednom kanálu.
- Systémy WDM umožňují přenést po jednom standartním vlákně až 32 Tbps.
- Nejvyšší spektrální efektivita se dá očekávat v systémech OFDM - až 7 b/s/Hz.
- Síťové operace jako vlnová konverze, směrování paketů a regenerace signálů lze provádět plně opticky, bez konverze na elektrické signály.



Poděkování

- Sdružení CESNET za sdílení mnohých přístrojů.
- Akademii věd České republiky za finanční podporu v rámci projektu Informační společnost IST300670502 a TAČR za podporu v rámci projektu TA01011105 Optický paketový přepínač.