

112 Gbit/s 信号混传多种速率信号的非线性效应影响

林 密 张阳安 张锦南 张明伦 黄永清

(北京邮电大学信息光子学与光通信教育部重点实验室, 北京 100876)

摘要 主要研究在波长间隔 50 GHz 的密集波分复用系统中, 112 Gbit/s 偏分复用差分四相移键控信号在不同速率的相邻信道影响下经过长距离传输后的非线性容忍度。实验结果表明, 112 Gbit/s 信号结合 43 Gbit/s 信号或者 10 Gbit/s 信号传输时系统得到较好的非线性容忍度, 验证了在严重的非线性效应存在的情况下同步传输系统的可行性。

关键词 光通信; 非线性效应; 交叉相位调制; 偏分复用差分四相移键控; 相干接收; 密集波分复用

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0306006

Influence of Nonlinear Effects in 112 Gbit/s Transmission Co-Propagating Multi-Rate Neighbors

Lin Mi Zhang Yang'an Zhang Jinnan Zhang Minglun Huang Yongqing

(Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract Nonlinear tolerance of 112 Gbit/s polarization-multiplexed differential quadrature phase-shift keying signal over long-haul transmission with different types of neighboring channels, and with a cascade of 50-GHz grid is increased. The result indicates considerable tolerance to nonlinear effects is observed and proves the feasibility of 112 Gbit/s overlaying existing 10 Gbit/s or 43 Gbit/s commercial systems despite the presence of strong cross-phase modulation.

Key words optical communications; nonlinear effects; cross-phase modulation (XPM); polarization-multiplexed differential quadrature phase-shift keying; coherent detection; dense wavelength division multiplexing (DWDM)

OCIS codes 060.4510; 060.2330; 060.4370; 060.4080; 060.1660

1 引 言

随着宽带通信业务的快速发展, 流量承爆炸式的增长, 为了满足传输容量日益增长的需求, 单波信道的传输速率越来越高, 正在从目前的 10 Gbit/s 升级到 40 Gbit/s 乃至 100 Gbit/s, 但随之而来的是升级中面临的众多难题。出于经济性的考虑, 100 Gbit/s 并不会直接取代现有的系统, 10, 40, 100 Gbit/s 信号需要共同传输, 因此 100 Gbit/s 密集波分复用(DWDM)在建立时必须考虑前向兼容性, 在保证传输性能的同

时, 多种速率业务混合传输几乎没有任何损伤, 满足现阶段以及较长时间的混传需要。

相干接收技术结合电域数字信号处理技术可以大大提高接收机灵敏度, 同时很好地补偿光信号传输中的线性损伤, 色度色散(CD)和偏振模色散(PMD)^[1~4]。然而 100 Gbit/s 信号承载在现有 10 Gbit/s 和 40 Gbit/s DWDM 系统上, 应该满足现有 10 Gbit/s 和 40 Gbit/s DWDM 系统要求, 同时传输性能应与现有 10 Gbit/s 和 40 Gbit/s DWDM

收稿日期: 2011-08-25; **收到修改稿日期**: 2011-10-25

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2009RC0401, 2009RC0405)和中国博士后科学基金(20100470259)资助课题。

作者简介: 林 密(1985—), 女, 博士研究生, 主要从事高速光通信方面的研究。E-mail: lmnice1985@gmail.com

导师简介: 黄永清(1963—), 女, 博士, 教授, 主要从事光纤通信系统方面的研究。E-mail: yqhuang@bupt.edu.cn

系统达到相同量级。要想满足上述要求,补偿混传系统中的非线性效应特别是交叉相位调制(XPM)引发的损耗成为一个核心研究问题^[5,6]。

100 Gbit/s 线路传输技术采用结合偏分复用和差分四相位调制(PDM-DQPSK)的调制技术,它具有非常窄的频谱宽度和较高的频谱利用率,而且具有较大的色散容限、PMD 容限和非线性容限。本文研究在 50 Gbit/s 波长间隔的 DWDM 系统中,不同传输速率相互作用下的传输性能。实验结果比较了在经过 1200 km 传输相干接收后,10.7 Gbit/s 开关键控(OOK)和 43 Gbit/s DQPSK 相邻信道对 112 Gbit/s PDM-DQPSK 信道作用下的非线性效应抑制效果,验证在严重的非线性效应存在的情况下多速率同步传输系统的可行性。

2 系统平台

图 1(a)为 112 Gbit/s PM-QPSK 实验系统发射机。实验中光源采用外腔激光器(ECL),激光器的线宽小于 100 kHz,光束首先被马赫-曾德尔(M-Z)调制器调制,驱动电信号频率为 28 GHz 的正弦

信号,对波形进行切割得到占空比为 36% 的归零(RZ)脉冲。DQPSK 信息是通过另外一个 M-Z 调制器和一个调相器调制到光信号上,分别对信号进行 π 和 $\pi/2$ 的相位调制,驱动电信号均为 28 Gbit/s 的非归零(NRZ)信号。这两路 NRZ 信号是由长度为 $2^{11}-1$ 的伪随机序列经过预编码后输出的。DQPSK 信号分成两部分通过集束器,其中一路延时 320 个符号周期,用于消除两路的相干性,然后通过偏分合束器合成偏分复用信号^[7~9]。

为了能更好研究系统中的非线性效应,通过 50 GHz 波长间隔的光交叉波分复用器(Interleaver)将 112 Gbit/s PDM-DQPSK 调制信道与 10.7 Gbit/s OOK 调制信道或者 43 Gbit/s DQPSK 调制信道复用传输,具体传输框图如图 1(b)所示。这里选择 OOK 和 DQPSK 这两种调制格式是由于它们分别是 10 Gbit/s 和 40 Gbit/s 信号速率常用的调制格式。传输链路由若干区段(Span)组成,每个 Span 包含 80 km 单模光纤(SMF)、105% 的带内色散补偿光纤(DCF)和掺铒光纤放大器(EDFA)。

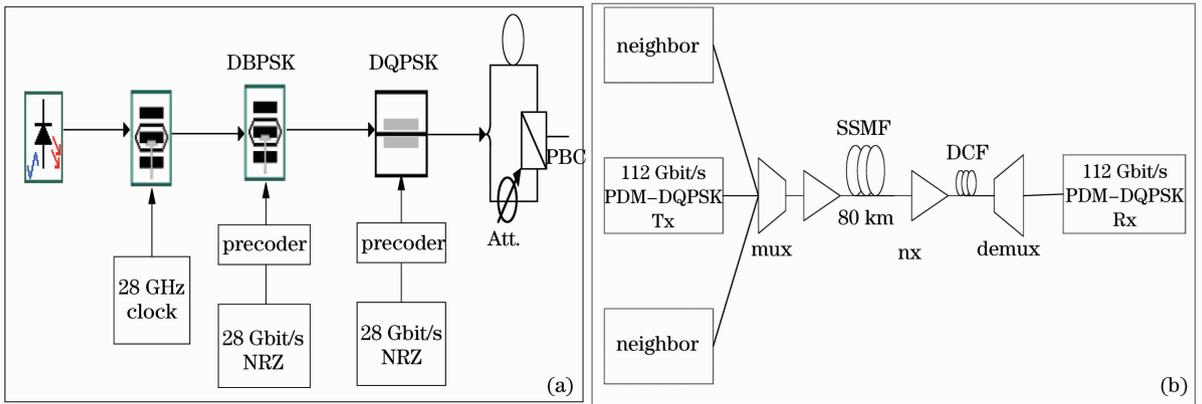


图 1 实验系统框图。(a) 112 Gbit/s PDM-DQPSK 发射机; (b) 传输框图

Fig. 1 Block diagram of experimental setup. (a) 112 Gbit/s PDM-DQPSK transmitter; (b) transmission link

接收端首先通过解复用得到 112 Gbit/s PDM-DQPSK 信道,以此作为测试信道输入到理想的相干零差接收机,具体如图 2 所示。输入到接收机的光信号和本地震荡光信号,分别经过偏振分束器(PBS)分别得到相应的两个正交偏振态的光信号,偏振态相同的信号进入 2×4 90° 混合器(2×4 90° Hybrid)混频后,经平衡探测器(Balance detector)转换为光电流,分别得到相应偏振态的同相(In-Phase)和正交(Quadrature)成分的信息,这样的电信号经由模数转换器(ADC)转换为数字信号进入

终端(计算机),进行信号损伤的补偿以及判决^[10,11]。

计算机端的数字信号处理用来补偿光信号在传输和接收中受到的损伤,包括线性损伤(如 CD、PMD)和非线性损伤(如非线性相位噪声)等;同时由于 90° 混合器存在制造缺陷,光电探测器之间有响应度的差异,本地光源和信号之间有相位和频率上的不匹配等等。整个信号的离线处理包括时钟恢复和提取、色度色散补偿、偏振模色散补偿、相位估计^[12]、频率恢复以及判决,具体处理流程如图 3 所示。

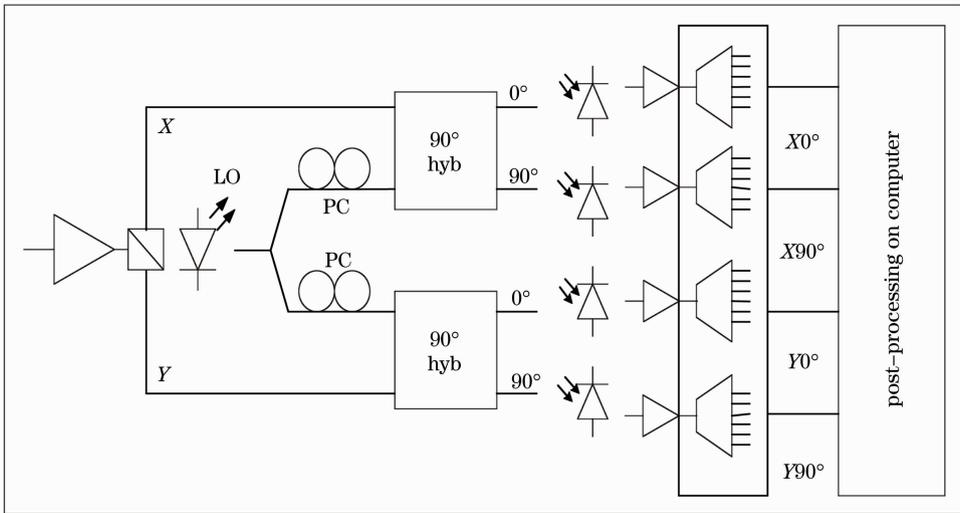


图 2 相干接收机框图

Fig. 2 Block diagram of coherent receiver

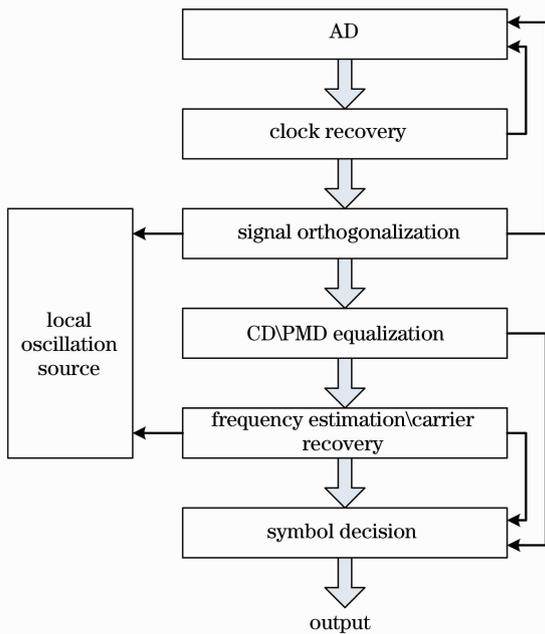


图 3 信号处理流程

Fig. 3 Signal processing flow chart

3 结果分析

为了更加突出不同速率信道之间的相互作用,整个 DWDM 系统为 8 波的传输容量,并选取最中间的波长为 1550.12 nm 第 4 波长信道为测试信道,因为中间信道相比于两侧信道受到的非线性效应影响更为严重。测试信道速率为 112 Gbit/s PDM-DQPSK 信号,而其余相邻信道速率为两种不同的速率,分别为 7×10.7 Gbit/s OOK 和 7×43 Gbit/s DQPSK。在实验中,设定除测试信道外全部相邻信道总的发射功率为 -2, -1, 1 和 2 dBm 四个不同的

功率值。针对每一个相邻信道总功率值,调整 112 Gbit/s 信道的发射功率从 -6~6 dBm 变化,每次改变 1 dBm,传输 1200 km 记录其误码率(BER),误码曲线如图 4 中所示(实验中考虑了带内色散补偿)。从图 4 中可以看到当相邻信道功率不变时,随着测试信道发射功率的增加,光信噪比(OSNR)提高,误码性能会得到改善,然而非线性效应影响也逐步增大,一旦光强超过一定值时非线性效应所造成的相位噪声严重制约信道性能,导致误码率劣化。

图 4(a)是相邻信道为 7×10.7 Gbit/s OOK 的误码率曲线,可以看出 OOK 信道对 112 Gbit/s 信道的产生了严重 XPM 的影响,然而随着相邻信道总功率值的减小,这种影响的减小也是显著的。同时可以观察到 112 Gbit/s 信道的最佳发射功率为 1.5~2.5 dBm 之间,此时误码率曲线都达到谷底。

图 4(b)显示了相同测试步骤下的相邻信道为 7×43 Gbit/s DQPSK 的误码率曲线。再一次发现 112 Gbit/s 信道的最佳发射功率在 1.5~2.5 dBm 之间,另外可以看出测试信道为最佳发射功率时,相邻信道总的发射功率即使达到 2 dBm,整个系统仍可以保持较好的 XPM 容忍度。

比较图 4(a)和图 4(b)得出,10.7 Gbit/s OOK 信号在相同条件下引发的 XPM 影响要比 43 Gbit/s DQPSK 显著,这是由于 DQPSK 信号所有比特幅度相同,而 OOK 信号自身功率的快速变化导致较大的相位起伏,因此角度调制的 XPM 损伤较小。另外 112 Gbit/s 信道的最佳发射功率为 2dBm。在最佳发射功率时,相邻信道功率为 2 dBm,DQPSK 信道能比 OOK 信道改善 1.7 dB,而随着相邻信道功

率的减少,改善程度也逐渐减少,到-2 dBm 时仅仅改善了 0.3 dB。根据前向纠错技术(FEC)的纠错门限-2.7dB,测试信道为最佳发射功率,除了

10.7 Gbit/s OOK 的相邻信道总功率为 2 dBm 时无法满足系统误码要求外,余下情况都能满足。

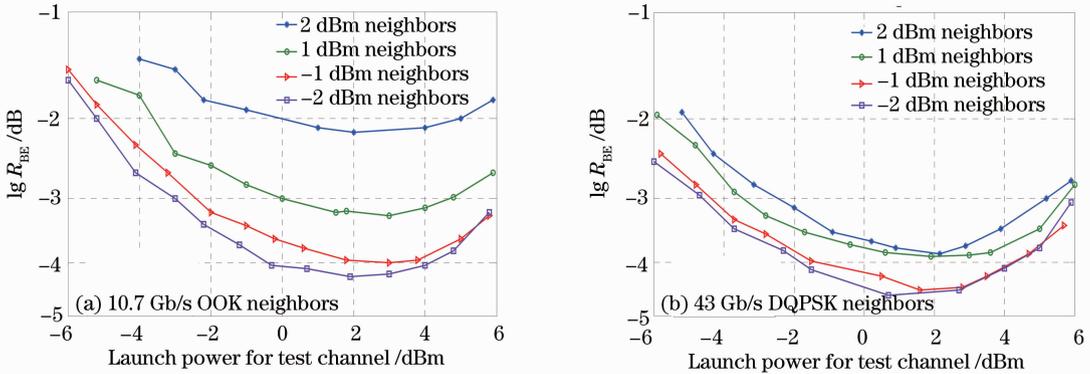


图 4 不同相邻信道总功率时测试信道的误码率曲线。(a)相邻信道为 10.7 Gbit/s; (b)相邻信道为 43 Gbit/s
Fig. 4 BER of the test channel with the different launch power levels of its neighboring channel. (a) 10.7 Gbit/s neighbors; (b) 43 Gbit/s neighbors

更进一步研究不同速率的相邻信道对于 112 Gbit/s信道的非线性影响,在原有 10.7 Gbit/s 和 43 Gbit/s 的基础上新增 112 Gbit/s PDM-DQPSK。图 5 显示了在有无光带内光色散补偿条件下不同相邻信道速率的单信道发射功率与 OSNR 代价的性能曲线。比较图 5(a)和图 5(b)可以看出没有光补偿时的 OSNR 代价要小于有光补偿的情况。这是由于在色度色散的作用下,两个信道的信

号拥有不同的群速度,因而会产生彼此走离(Walk-off)的现象,这样就会降低 XPM 引入的非线性相移。在没有色度色散的影响时[图 5(b)]观察得到相邻信道是低速率的幅度调制对于 112 Gbit/s 测试信道带来很大的非线性效应。测试信道的非线性容忍度在相邻信道为 43 Gbit/s 时略微优于相邻信道为 112 Gbit/s,这是由于 112 Gbit/s PM-QPSK 的波特率较高从而增加了相位匹配的难度。

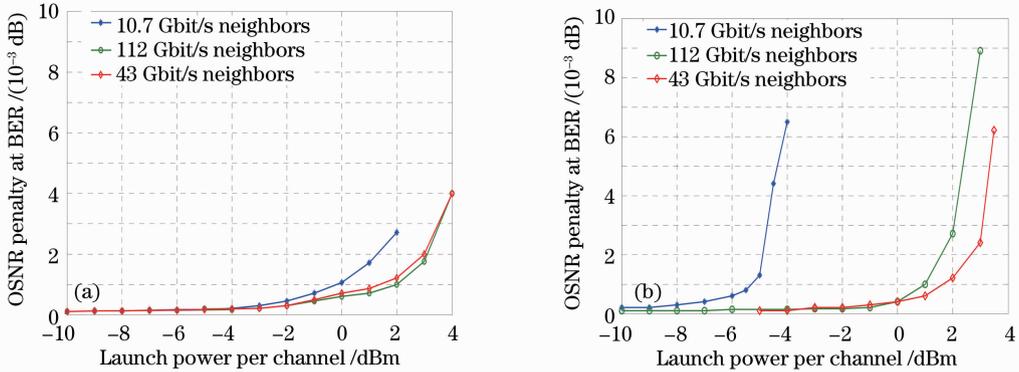


图 5 不同相邻信道时 OSNR 代价与发射功率曲线图。(a)无带内光补偿;(b)有带内光补偿

Fig. 5 OSNR penalty of the test channel with neighboring multi-rate channels. (a) No optical compensation in waveband; (b) full optical compensation in waveband

4 结 论

研究了波长间隔为 50 GHz 的 DWDM 系统中, 112 Gb/s PDM-DQPSK 信号在不同传输速率(10.7 Gbit/s OOK 和 43 Gbit/s DQPSK)的相邻信道影响下经过 1200 km 传输后的 XPM 容忍度。通过严谨的功率调整实验,结果表明在相邻信道的调制码型和传输速率不同,112 Gbit/s 信道发射功率为 2 dBm

时经过 1200 km 传输后还能满足系统的误码率要求。在进一步的实验中还发现角度调制在有无带内色散补偿的条件下都有较好的非线性容忍度,而低速率的幅度调制对于 112 Gbit/s 信号带来了很大的非线性损伤,有带内色散补偿的时候非线性效应尤其显著,因此电色散补偿技术相比光色散补偿技术更适用于系统。实验结果证明了 112 Gbit/s 信号结

合 43 Gbit/s 信号或者 10 Gbit/s 信号传输时相干接收机联合数字信号处理技术能够得到很好的系统性能,验证了在多种速率下同步传输系统的可行性,为 100 Gbit/s 系统升级提供经济性方案。

参 考 文 献

- 1 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics*[M]. Jia Dongfang, Yu Xiahong, Tan Bin et al.. Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 3~15
- G. P. Agrawal. 非线性光纤及其应用[M]. 贾东方, 余霞虹, 谈斌等译. 北京:电子工业出版社, 2002. 3~15
- 2 W. Shieh, X. Yi, Y. Ma et al.. Theoretical and experimental study on PMD-supported transmission using polarization diversity in coherent optical OFDM systems [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(16): 9936~9947
- 3 K. Kikuchi, M. Fukase, S.-Y. Kim. Electronic post-compensation for nonlinear phase noise in a 1000-km 20-Gbit/s optical QPSK transmission system using the homodyne receiver with digital signal processing [C]. OFC 2007. 2007, Paper OTuA2
- 4 R.-J. Essiambre, G. J. Foschini, G. Kramer et al.. Capacity limits of information transport in fiber-optic networks[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, **101**(16): 163901~163904
- 5 Mohammad Alfiad, D. van den Borne, T. Wuth et al.. Effect of carrier phase estimation for 111 Gbit/s POLMUX-RZ-DQPSK equalization in presence of 10.7 Gbit/s OOK neighbours [C]. IEEE/LEOS Summer Topical Meetings, 2008, 175~176
- 6 J. B. Jensen, G. Schiellerup, C. Peucheret et al.. XPM-induced degradation of multilevel phase modulated channel caused by neighboring NRZ modulated channels [C]. OFC 2008. 2008, Paper JThA51
- 7 Jinnan Zhang, Xueguang Yuan, Mi Lin et al.. Transmission of 112 Gbit/s PM-RZ-DQPSK over 960 km with adaptive polarization tracking based on power difference [C]. ECOC 2010. 2010, P2.09
- 8 Lin Mi, Zhang Jinnan, Yuan Xueguang et al.. A novel electric equalization in 40 Gbit/s pol-mux RZ-DQPSK transmission [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(s1): s100201
- 林 密, 张锦南, 袁学光等. 40 Gbit/s 偏复用差分四相移键控传输系统中新型电均衡技术的研究 [J]. 光学学报, 2010, **30**(s1): s100201
- 9 Xi Lixia, Qin Jiangxin, Zhao Xinyuan et al.. Experimental realization of polarization multiplexing differential phase shift keying system using only one demodulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0306001
- 席丽霞, 秦江星, 赵鑫媛等. 只需一个解调器的偏复用差分相移键控系统实验实现 [J]. 光学学报, 2011, **31**(3): 0306001
- 10 C. R. S. Fludger, T. Duthel, D. van den Borne et al.. Coherent equalization and pol-mux-RZ-DQPSK for robust 100-GE transmission [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(1): 64~72
- 11 Hu Yi, Yang Jialong. Technical analysis of 40/100 Gbit/s polarization multiplexing and coherent detection for optical transponder module [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(8): 080601
- 胡 毅, 杨家龙. 40/100 Gbit/s 偏复用相干检测光模块的技术分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(8): 080601
- 12 Qiao Yaojun, Du Xiao, Ji Yuefeng. Phase estimating method in optical QPSK transmission system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1229~1233
- 乔耀军, 杜 晓, 纪越峰. 光四相相移键控传输系统中相位估计算法研究 [J]. 光学学报, 2010, **30**(5): 1229~1233

栏目编辑: 谢 婧