

基于多载波的相干波分复用太比特传输实验研究

张 霞^{1,2} 田 凤¹ 张晓光¹ 白成林²

(¹ 北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)
(² 聊城大学山东省光通信科学与技术省重点实验室, 山东 聊城 252000)

摘要 基于循环频移器(RFS)的多载波产生原理,得到了间隔为 25 GHz,载噪比为 25 dB 的 20 个子载波的多载波输出,将波特率为 16 Gbaud(即 64 Gbit/s)的归零码十六进制正交幅度调制(RZ-16QAM)信号加载到这些子载波上,并且进行偏分复用(PDM)生成 PDM-RZ-16QAM 信号,实验实现了 2.56 Tbit/s PDM-RZ-16QAM 信号 792 km 标准单模光纤(SSMF)的传输和相干接收。实验测得的背靠背相干光波分复用(CO-WDM)系统在误码率为 1×10^{-3} 的情况下,光信噪比需求比理论值(FEC)增加了 4.1 dB。传输后,最佳入射光功率处的误码率为 4.5×10^{-3} ,小于前向纠错的软判决门限(2.4×10^{-2}),此时对应的 CO-WDM PDM-RZ-16QAM 中心信道信号恢复后 x 和 y 偏振方向的星座图清晰规则,说明传输性能很好,并且系统的频谱效率达到了 5.1 bit/(s · Hz)。

关键词 光通信;多载波;十六进制正交幅度调制;太比特传输

中图分类号 TN911.22 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0605005

Study of Coherent Optical Wavelength Division Multiplexing Terabit Transmission Experiment System Based on Multi-Carrier

Zhang Xia^{1,2} Tian Feng¹ Zhang Xiaoguang¹ Bai Chenglin²

¹ State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

² Key Laboratory of Optical Communications Science & Technology in Shandong Province, Liaocheng University, Liaocheng, Shandong 252000, China

Abstract 20-tone, 25 GHz spacing multi-carrier with the tone-to-noise ratio (TNR) larger than 25 dB is generated based on recirculating frequency shifter (RFS). Each subcarrier is modulated with a return-zero 16-quadrature amplitude modulation (RZ-16QAM) signal at 16 Gbaud and then polarization division multiplexing (PDM) is employed to further increase the capacity. At last, 2.56 Tbit/s, PDM-RZ-16QAM, coherent optical wavelength division multiplexing (CO-WDM) transmission over 792 km standard single-mode fiber (SSMF) with 25 GHz channel spacing using coherent detection is experimentally demonstrated. Compared to the theoretical limits, the measured optical signal to noise ratio (OSNR) sensitivity curve in back-to-back system is shifted by approximately 4.1 dB at a bit-error rate (BER) of 1×10^{-3} . After transmission, the BER value of 4.5×10^{-3} at the optimal launchpower is under the threshold value of soft-decision forward error correction (FEC) of 2.4×10^{-2} , and the corresponding constellations diagrams of x and y polarizations for recovered CO-WDM PDM-RZ-16QAM signals of the central channel show the excellent performance. The spectrum efficiency of our transmission system is 5.1 bit/(s · Hz).

Key words optical communications; multi-carrier; 16-quadrature amplitude modulation; terabit transmission

OCIS codes 060.2330; 060.4510; 060.3510; 060.2630

收稿日期: 2013-10-07; **收到修改稿日期**: 2013-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(61205065)、高等学校博士学科点专项科研基金(20110005110014)、信息光子学与光通信国家重点实验室(北京邮电大学)开放基金、山东省自然科学基金项目(ZR2010FM043)

作者简介: 张 霞(1975—),女,博士研究生,副教授,主要从事多载波传输方面的研究。

E-mail: wenerzhang2002@163.com

导师简介: 张晓光(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事光通信领域方面的研究。E-mail: xgzhang@bupt.edu.cn

1 引 言

目前,基于多载波光源^[1]实现太比特以及更高速的传输已经成为下一代光纤通信系统的发展方向^[2-4]。传统的密集波分复用系统要采用多个独立的激光器,在文献[5]的实验报道中,就使用了320个激光器,这些激光器的特性很难做到十分一致,使系统的稳定性降低,同时设计成本巨大,而基于多载波光源的相干光正交频分复用或相干光波分复用系统(CO-WDM)只需要一个激光器,就可以实现多信道的信号传输,并且不同信道之间频谱正交,间隔相等,性能稳定。在实现多载波光源的几种方式中^[6-8]基于循环频移器(RFS)产生多载波的方案由于载波数目较多以及具有高稳定性和高平坦度因而成为首选方案,已经有24个载波^[9]、36个载波^[10]及50个载波^[11]产生的报道。但是由于产生的多载波光源载噪比不高(小于20 dB),一般只能用于差分正交相移键控(DQPSK)传输系统,频谱利用率也只能达到4 bit/(s·Hz)^[12]。因此,产生高载噪比、高平坦度及高稳定度^[13]的多载波光源,使其能够应用于十六进制正交幅度调制(16QAM)^[14-15]及偏分复用(PDM)16QAM^[16](PDM-16QAM)等更高阶调制格式的传输系统并研究其传输性能非常必要。

本文利用RFS技术,产生了载噪比大于25 dB,间隔为25 GHz,20个子载波的多载波光源,然后将波特率为16 Gbaud的16QAM信号加载到这些子载波上,并且进行偏分复用生成PDM-RZ-16QAM信号,最后实验实现了2.56 Tbit/s PDM-RZ-16QAM信号800 km的传输,并对该信号进行相干接收,得到了传输后信号的最佳入射光功率图、星座

图、光信噪比(OSNR)图等。

2 多载波光源的产生装置

基于RFS的多载波光源产生的实验装置如图1所示。其中,连续波(CW)激光器的波长为1543.01 nm,经过50:50的耦合器后,进入RFS输入I/Q调制器实现单边带频移,微波源输出两路25G射频信号,经过放大器和相移器(PS)后输入到I/Q调制器的两个入口,以保证幅度相等、相位差为90°的平衡条件。波长选择开关(WSS)具有较高的深度和陡峭度,用来控制输出的子载波数目;掺铒光纤放大器(EDFA)的输出饱和功率为27 dBm,提供足够的增益补偿环路中功率损耗以保持每次输出的子载波功率相等;偏振控制器(PC)用来控制环路中的偏振态,使输出多载波更加平坦稳定。经过第一次循环,频率为 $f_0 + f_m$ 的子波输出;第二次循环后频率为 $f_0 + 2f_m$ 的子波输出;经过N次循环之后,就产生了子载波频率分别为 $f_0 + f_m, f_0 + 2f_m, \dots, f_0 + Nf_m$ 的多载波。

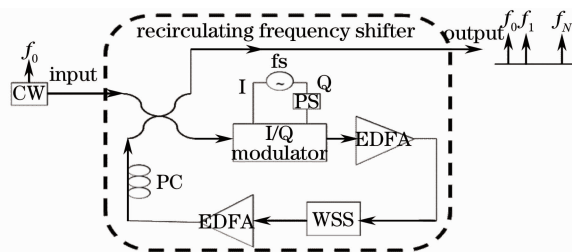


图1 基于RFS的多载波光源产生装置图

Fig. 1 Schematic of the RFS as a multi-carrier generator

图2(a)和(b)分别为实验测得的一次频移后单载波频谱图和20个间隔25 GHz的子载波频谱图。

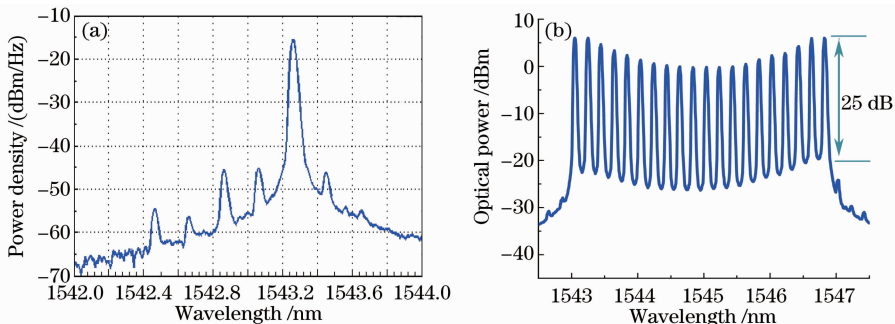


图2 (a) 光源一次频移的光谱图; (b) 20个子载波的多载波输出频谱图

Fig. 2 (a) Optical spectrum after the first loop; (b) spectrum of 20-tone multi-carriers

3 基于多载波的2.56-Tbit/s 16-QAM CO-WDM传输系统

图3给出了基于多载波的2.56 Tbit/s CO-

WDM偏分复用归零码十六进制正交幅度调制(PDM-RZ-16QAM)传输实验系统框架。激光器CW2发出波长为1543.01 nm的光,16 Gbaud四阶

幅移键控(4ASK)电信号通过 I/Q 调制器调制到光源上,为提高频谱利用率,利用强度调制器将非归零码(NRZ)信号切割成归零码(RZ)信号,即形成了 64 Gbit/s RZ-16QAM 信号。然后将该单载波调制信号送入 RFS,产生 20 个间隔 25 GHz 的相同信道,再将这 20 个信道承载的信息偏分复用为 PDM-RZ-16QAM,即使用一个激光器产生了 20 个子载波的 PDM-RZ-16QAM 信号。激光器 CW1 的波长为 1543.06 nm,用来作为测试信道,携带 RZ-16QAM 信号直接经由 WSS 通过路径 P1 进入传输

链路,并被置于从 RFS 出来的 20 个子载波的中心信道。最后所有的偏分复用信号形成总传输速率为 2.56 Tbit/s、基于多载波的 CO-WDM PDM-RZ-16QAM 信号送入 792 km 光纤链路中进行传输。其中传输链路包括 3 段 88 km 的标准单模光纤(SSMF),EDFA 用来补偿链路中的损耗,声光调制器(AOM)来控制循环次数,增益平坦滤波器(GEF)用来保证所有的信道保持同样的功率,链路中的 WSS 滤出一路信号,用于后面相干接收系统的解调和数字信号处理。

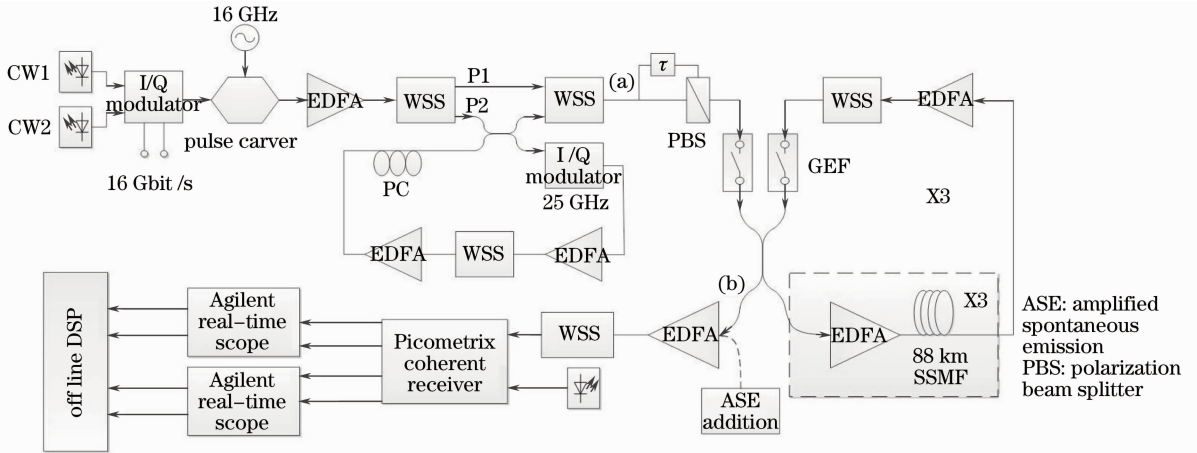


图 3 2.56 Tbit/s CO-WDM 16-QAM 传输系统框图

Fig. 3 Experiment setup for the 2.56 Tbit/s 16-QAM CO-WDM transmission system

经过传输,在接收端采用 Picometrix 公司的相干接收机和采样速率为 80 GS/s 的安捷伦实时示波器进行接收,经光电转换后的电信号进行离线的数字信号处理(DSP)。离线处理的算法单元主要包括以下 7 个部分:1) 色度色散补偿模块(CD

compensation); 2) 偏振模色散补偿和偏分解复用模块[恒模算法(CMA)]; 3) 时钟恢复模块; 4) 频率恢复; 5) 最小均方(LMS)均衡器; 6) 载波相位恢复; 7) 判决和误码率(BER, R_{BE})检测。图 4(a)和(b)分别给出了传输前后的多载波频谱对比图。

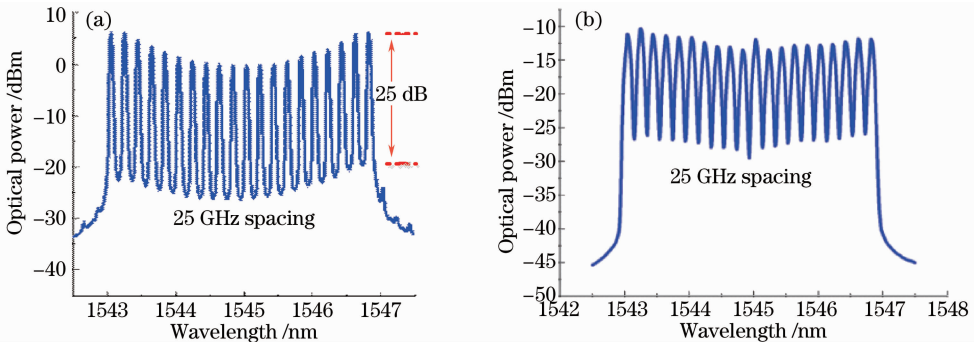


图 4 (a) 传输前的 20 个载波频谱图和(b) 传输后的 20 个载波频谱图

Fig. 4 Spectra of twenty carriers (a) before transmission and (b) after transmission

4 实验结果及传输性能分析

4.1 背靠背系统性能分析

实验中测量了 128 Gbit/s PDM-RZ-16QAM 信号在一定误码率下单信道的背靠背 OSNR 需求和

20 个 CO-WDM 信道中其中一路信道的背靠背 OSNR 代价需求。从图 5 可以看出,与理论值相比,在 1×10^{-3} 的误码率下测得的单信道 OSNR 需求大概增加了 3.2 dB。这是因为理论值仅考虑了传输

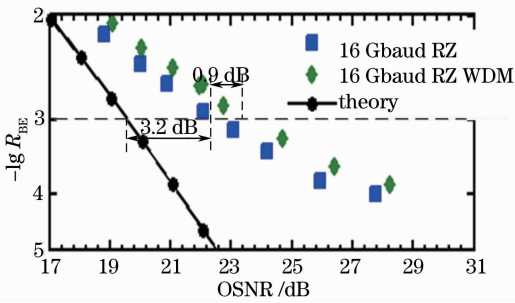


图5 128 Gbit/s PDM-RZ-16QAM 背靠背 OSNR 需求
Fig. 5 Measured back to back system OSNR requirements of 128 Gbit/s PDM-RZ-16QAM

链路中 EDFA 的放大自发辐射(ASE)噪声,而实验中光信号还会受到来自于发射机、射频器件、接收机等热噪声和电噪声的影响。与单信道信号相比,CO-WDM 系统另外还要受到来自其他信道的交叉相位调制串扰的影响,载噪比需求又增加了大约 0.9 dB OSNR 代价,即在 1×10^{-3} 的误码率下,测得的多信道 OSNR 需求总值比理论值共增加了约 4.1 dB。

图 6(a)~(d)分别给出了误码率为 1×10^{-3} 时单信道和 CO-WDM 多信道传输时中间信道背靠背情况下 x 和 y 偏振方向的星座图。从图 6 可以看出,星座图中各点清晰,规则分布,说明 PDM-RZ-16QAM 背靠背系统性能很好。

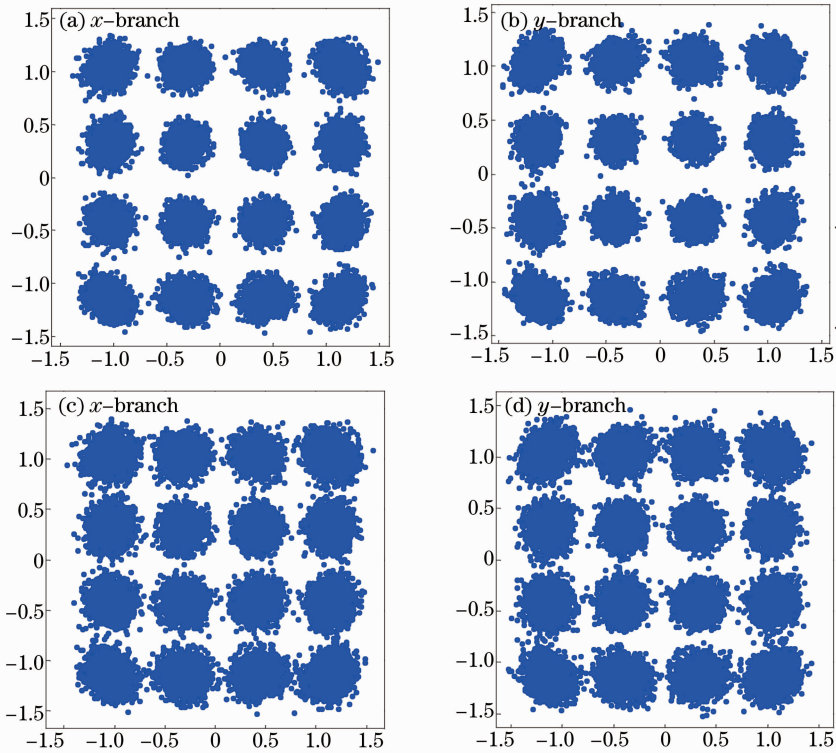


图 6 PDM-RZ-16QAM 星座图。单信道背靠背(a) x 偏振方向, (b) y 偏振方向;
多信道时中间信道背靠背(c) x 偏振方向, (d) y 偏振方向

Fig. 6 PDM-RZ-16QAM constellation diagrams in back to back system. Single channel (a) x -branch data and (b) y -branch data; central channel of multi-channels (c) x -branch data and (d) y -branch data

4.2 CO-WDM 系统传输性能分析

为研究 2.56 Tbit/s PDM-RZ-16QAM 信号经 792 km CO-WDM 系统的传输性能,实验中在有效范围内改变信道的入射功率,得到如图 7 所示中间信道的入射功率与误码率的关系,从图中可以看出其最优发射功率为 1 dBm,此时对应的误码率为 4.5×10^{-3} ,在前向纠错(FEC)的软判决门限(2.4×10^{-2})以下,说明经传输后的信号性能很好。

图中 8(a)和(b)为中间信道最优发射功率点对

应的 x 偏振方向和 y 偏振方向的星座图。研究发现该传输系统的频谱效率为 5.1 bit/(s · Hz),优于传统(非多载波)WDM 系统的频谱效率 4.2 bit/(s · Hz)^[17]。与贝尔实验室基于多载波的 1.2 Tbit/s QPSK 信号传输实验结果相比[频谱效率为 3.7 bit/(s · Hz)],该传输系统频谱效率要高出 bit/(s · Hz)^[18],而与文献[19]基于多载波的 16QAM 信号传输实验相比[频谱效率为 3.17 bit/(s · Hz)],要高出约 2 bit/(s · Hz)。

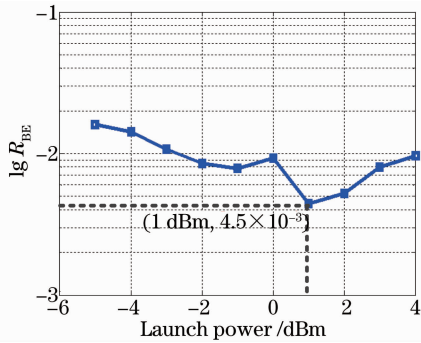
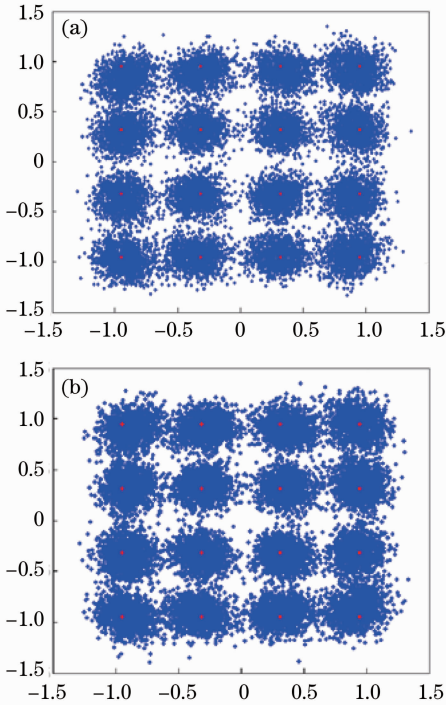


图7 中间信道信号的误码率与入射功率的关系

Fig. 7 BER results versus launch power for the central transmitted channel

图8 最佳入射功率时对应的星座图。(a) x 偏振方向；
(b) y 偏振方向Fig. 8 Constellation diagrams of (a) x -branch and (b) y -branch at the optimal launch power

5 结 论

基于RFS技术,产生了载噪比大于25 dB的20个子载波的多载波光源,并利用产生的多载波完成了2.56 Tbit/s PDM-RZ-16QAM信号792 km单信道和波分复用系统的传输实验,然后对该信号进行相干接收,通过分析传输后信号 x 以及 y 偏振方向的星座图发现传输后的信号性能恢复得很好,此时传输系统的频谱效率为5.1 bit/(s·Hz)。

参 考 文 献

- Zhang Xia, Bai Chenglin, Zhang Xiaoguang. Theoretical analysis and experimental study of noise suppression in high-signal-noise-rate multi-carrier generation [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1105005.
- 张霞, 白成林, 张晓光. 高载噪比多载波光源的噪声抑制理论及实验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1105005.
- Y R Ma, Q Yang, S Chen, *et al.*. 1-Tb/s per channel coherent optical OFDM transmission with subwavelength bandwidth access [C]. National Fiber Optic Engineers Conference, 2009.
- B Y Zhu, X Liu, S Chandrasekhar, *et al.*. Ultra-long-haul transmission of 1.2-Tb/s multi-carrier no-guard-interval CO-OFDM superchannel using ultra-large-area fiber [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2010, 22(11): 826–828.
- Y R Ma, Q Yang, Y Tang, *et al.*. 1-Tb/s single-channel coherent optical OFDM transmission with orthogonal-band multiplexing and subwavelength bandwidth access [J]. J Lightwave Technol, 2010, 28(4): 308–315.
- X Zhou, J Yu, M Huang, *et al.*. 32 Tb/s (320 × 114 Gb/s) PDM-RZ-8QAM transmission over 580 km of SMF-28 ultra-low-loss-fiber [C]. Conference on Optical Fiber Communication, 2009.
- C Wang, F Zeng, J Yao. All-fiber ultra-wideband pulse generation based on spectral shaping and dispersion-induced frequency-to-time conversion [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2007, 19(3): 137–139.
- J Zhang, J Yu, Z Dong, *et al.*. Generation of full C-band coherent and frequency-lock multi-carriers by using re-circulating frequency shifter loops based on phase modulator with external injection [J]. Opt Express, 2011, 19(27): 26370–26381.
- J Li, X Zhang, F Tian, *et al.*. Theoretical and experimental study on generation of stable and high-quality multi-carrier source based on re-circulating frequency shifter used for Tb/s optical transmission [J]. Opt Express, 2011, 19(2): 848–860.
- X Liu, S Chandrasekhar, B Y Zhu, *et al.*. Efficient digital coherent detection of a 1.2-Tb/s 24-carrier no-guard-interval CO-OFDM signal by simultaneously detecting multiple carriers per sampling [C]. Conference on Optical Fiber Communication (OFC), collocated National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), 2010.
- Y Ma, Q Yang, Y Tang, *et al.*. 1-Tb/s single-channel coherent optical OFDM transmission over 600-km SSMF fiber with subwavelength bandwidth access [J]. Opt Express, 2009, 17(11): 9421–9427.
- Feng Tian, Xiaoguang Zhang, Jianping Li, *et al.*. Generation of 50 stable frequency-locked optical carriers for Tb/s multicarrier optical transmission using a recirculating frequency shifter [J]. J Lightwave Technol, 2011, 29(8): 1085–1091.
- S Chandrasekhar, Xiang Liu, B Zhu, *et al.*. Transmission of a 1.2-Tb/s 24-carrier no-guard-interval coherent OFDM superchannel over 7200-km of ultra-large-area fiber [C]. European Conference on Optical Communication, 2009.
- Hao Zhou, Lixia Xi, Jianping Li, *et al.*. Theoretical analysis of polarization control for the stable output of multi-carrier source based on a re-circulating frequency shifter [J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(10): 100602.
- He Jing, Liu Limin, Chen Lin, *et al.*. Generation of advanced modulation formats based on Mach-Zehnder modulators [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(8): 1185–1190.
- 何晶, 刘丽敏, 陈林, 等. 基于马赫-曾德尔调制器的先进调制格式的产生 [J]. 中国激光, 2008, 35(8): 1185–1190.
- Di Xuejing, Tong Cheng, Zhang Xia, *et al.*. Adaptive step-size constant-modulus algorithm for high-speed optical coherent communication system [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1006004.

- 邸雪静, 童程, 张霞, 等. 高速相干光纤通信系统中的自适应步长横模算法[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1006004.
- 16 Sun Yang, Xi Lixia, Zhang Xiaoguang, *et al.*. Theoretic model and elimination scheme of crosstalk in polarization division multiplexing system [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0206006.
- 孙洋, 席丽霞, 张晓光, 等. 偏分复用系统信道串扰的理论模型及消除方案[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0206006.
- 17 M S Alfiad, M Kuschnerov, S L Jansen, *et al.*. 11×224 -Gb/s POLMUX-RZ-16QAM transmission over 670 km of SSMF with 50-GHz channel spacing[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2010, 22(15): 1150–1152.
- 18 Benyuan Zhu, Xiang Liu, S Chandrasekhar, *et al.*. Ultra-long-haul transmission of 1.2-Tb/s multicarrier no-guard-interval CO-OFDM superchannel using ultra-large-area fiber [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2010, 22(11): 826–828.
- 19 Xingwen Yi, Nicolas K Fontaine, Ryan P Scott, *et al.*. Tb/s coherent optical OFDM systems enabled by optical frequency combs[J]. J Lightwave Technol, 2010, 28(14): 2054–2061.

栏目编辑: 王晓琰