

# 相干光通信中预均衡技术的激光器线宽容忍度

张惠忠, 董泽

华侨大学信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021

**摘要** 介绍了一种基于参考的预均衡(RPE)技术,该技术基于自相干混频技术,可实现自相干零差检测系统中传递函数精确定性信息的测量,并且可对传输信号进行预加重处理。RPE技术可以对所有电和光的线性损失进行预补偿,电和光的线性损失包括调制器和功率放大器引起的带宽限制,以及光学前置滤波器造成的高频分量损失。RPE校准性能很大程度上取决于发射机与接收机的激光器线宽。研究了自相干零差检测系统中几种常见激光源的RPE校准性能,提出了一种能够获得传递函数精确定性信息的相位纠正算法。利用几种典型激光源,在波分复用带宽限制为25 GHz、速率为32 Gbit/s的偏振复用正交相移键控相干光通信系统中证实了该算法的可行性。

**关键词** 光通信; 激光器线宽; 相干检测; 预均衡技术; 数字信号处理

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.030605

## Laser Linewidth Tolerance of Pre-Equalization Technology in Coherent Optical Communication

Zhang Huizhong, Dong Ze

College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China

**Abstract** A reference-based pre-equalization (RPE) technology is introduced. The technology, which is based on the self-coherent mixing frequency technology, can measure the accurate qualitative information of transfer function in self-coherent homodyne detection system and pre-emphasize the transmission signal. The RPE technology can pre-compensate all electrical and optical linear loss, including the bandwidth limitation of modulator and power amplifier and the high-frequency component loss caused by optical pre-filter. The calibration performance of RPE strongly depends on the laser linewidth of both the transmitter and the receiver. We investigate the RPE calibration performances of several laser sources which are universal in self-coherent homodyne detection system, and develop a phase correction algorithm to obtain accurate qualitative information of the transfer function. The feasibility of the algorithm is verified when we use several types of laser sources in coherent optical communication system with polarization-multiplexed quadrature phase shift keying. The wavelength division multiplexing bandwidth limitation is 25 GHz and the rate is 32 Gbit/s.

**Key words** optical communications; laser linewidth; coherent detection; pre-equalization technology; digital signal processing

**OCIS codes** 060.1660; 060.2330; 060.4510; 070.4340

## 1 引言

随着具有百吉比特每秒传输速率的光传输网系统的商业化,研究者们对进一步提高频谱效率来满足带宽需求产生了浓厚的兴趣<sup>[1-5]</sup>。奈奎斯特波分复用(Nyquist-WDM)是在远距离光传输系统中实现超高频谱利用率的最佳解决方法<sup>[6]</sup>。然而,系统中的前置窄带滤波器是以增加信道串扰和码间干扰(ISI)为代价来减小信道间隔的。最大后验概率(MAP)<sup>[7]</sup>和最大似然序列估计(MLSE)<sup>[8]</sup>这两种方法能够有效减小由相邻

收稿日期: 2016-10-24; 收到修改稿日期: 2016-11-14

基金项目: 国家自然科学基金(61401166)

作者简介: 张惠忠(1993—),男,硕士研究生,主要从事相干光通信方面的研究。E-mail: 1064718471@qq.com

导师简介: 董泽(1984—),男,博士,教授,主要从事相干光通信方面的研究。E-mail: zdong9@hqu.edu.cn(通信联系人)

信道串扰和 ISI 引起的信号损失,但是接收端的数字信号处理(DSP)系统较为复杂。在发射端采用脉冲整形或基于参考的预均衡(RPE)技术能够有效抑制 ISI<sup>[9-11]</sup>,由于正弦脉冲为无限冲激响应,因此要求有限脉冲响应(FIR)滤波器达到几百抽头才能获得矩形光谱,系统成本较高。考虑到前置滤波器的影响,本课题组在文献[12]提出的发射机中采用 RPE 技术,以实现 RPE 整形。该方法利用对传递函数的评估实现了发射信号频域内的 RPE,从而降低了前置滤波器产生的 ISI。为了精确估算传递函数,激光源的线宽需窄于二进制相移键控(BPSK)信号的带宽,即窄于 400 Hz,从而有效避免相位噪声失真。国内外对 RPE 技术的研究都只限于采用何种技术。Zhuang 等<sup>[13]</sup>提出了在恒包络调制[如正交相移键控(QPSK)]的单载波系统中采用相位 RPE 技术;Keller 等<sup>[14]</sup>提出了基于信号干扰信噪比的 RPE 处理技术。这些方法在一定程度上都增加了系统的复杂度,而激光器线宽对 RPE 性能影响的研究还未见报道。

研究了 RPE 方案中不同激光器线宽的特性,它们呈现的不同特性能够精确反应出前置滤波器所导致的频率损失,并对多个可重构光分插复用器(ROADM)节点的损失进行了补偿,以实现超 Nyquist-WDM 的高频谱效率。对三个不同线宽的激光器进行实验,结果表明,激光器线宽越大,信号功率越不连续,信道串扰和自混频现象越严重。通过传递函数的反馈来实现频域信号的预加重,传递函数一般通过自相干零差检测获得。为了提高 RPE 技术中激光器线宽的容忍度,提出了一种基于相位噪声均值的相位纠正算法(PCA),该算法在使用商用的低成本激光器时也能精确测量传递函数。

## 2 RPE 技术原理和 PCA 原理

### 2.1 RPE 的激光器线宽特性

RPE 技术中采用 PCA 的原理如图 1 所示。在背靠背(BTB)链路中,先发送一个 BPSK 的参考信号。传递函数可以表示为

$$h_{TF} = S_{ref}/R_{ref}, \quad (1)$$

式中  $S_{ref}$  和  $R_{ref}$  分别为频域内发送和接收的 BPSK 信号。发送信号  $S$  乘以传递函数  $h_{TF}$  后的信号记为  $S_{pre-eq}$ ,即

$$S_{pre-eq} = S \cdot h_{TF}. \quad (2)$$

在发射端,利用采样率为 34 GSa/s 的高速数模转换器(DAC, 型号 VEGA DAC II, 德国 Micram 公司)产生一个长度为  $2^{15}$  的伪随机二进制序列(PRBS)。在自相干零差检测系统中,信号源与本地振荡器(LO)采用相同的激光源,这样能够避免探测时出现载波频率偏移现象。将同相正交调制器(I/Q MOD)中的双并行马赫-曾德尔调制器(M-ZMs)均置于 0 偏置,并采用全幅度驱动以实现零啁啾的  $0, \pi$  相位调制。二进制信号经过电放大器(EA)实现功率提升后,驱动其中的一个 M-ZMs,以获得 BPSK 信号。

BPSK 信号经过具有前置滤波性能的可编程波长选择开关(WSS)后,由  $90^\circ$  光混频器实现偏振和相位分集的相干检测。利用模数转换器(ADC)和数字示波器,对得到的  $10^6$  个数据点进行采样收集,并进行离线数字信号处理(DSP)。DSP 中数据点进行两倍重采样后,取 20 组 BPSK 信号参数的平均值以获得时钟恢复所需的相位信息,之后利用发射模式和接收模式的相关性实现时域同步。

在早先的自相干零差检测系统中,采用线宽约为 400 Hz 的光纤激光器(ESL, 型号 Eternal SlowLight, Orbits Lightwave 公司)作为激光源<sup>[15]</sup>。然而,较大的激光器线宽引起的相位损耗是不可避免的。图 2 为采用 RPE 技术的自相干零差检测系统传递函数的校准性能比较,图中比较了由带宽为 0.4, 0, 1, 6 MHz 的 ESL、外腔激光器(ECL)和分布反馈激光器(DFB)构成的自相干零差检测系统中 16 Gbit/s BPSK 信号有/无经过 WSS 的性能。可以看出,对于 ESL, BPSK 信号不经过 WSS 时的时域电谱图[图 2(a1)]是连续的,相应的星座图[图 2(b1)]是非常清晰的。图 2(b4)为在 BTB 实验中,16 Gbit/s 脉冲宽度调制(PDM)-BPSK 信号经过 10 GHz WSS 后的星座图。由于前置滤波器产生了 ISI,因此将一个 BPSK 分解为 4 个清晰的点图。显然,激光器线宽越大(ESL、ECL、DFB 的线宽依次增加),BPSK 信号功率越不连续。

对于 DFB, BPSK 信号不经过 WSS 时的时域电谱图[图 2(a3)]中有明显间隔,对应的星座图是由 ESL 的两点扩散为类似圆形的轮廓[图 2(b3)],这是由于相比自相干零差检测系统要求的零载波频率最大偏移条件,较大的激光器线宽产生的相位噪声占更主导地位。此外,信号经过 10 GHz WSS 后的性能更差,原先两个点的星座图分解成几个较为模糊的圆圈[图 2(b6)]。因此,对于所提出的 RPE 方案,较大的激光器

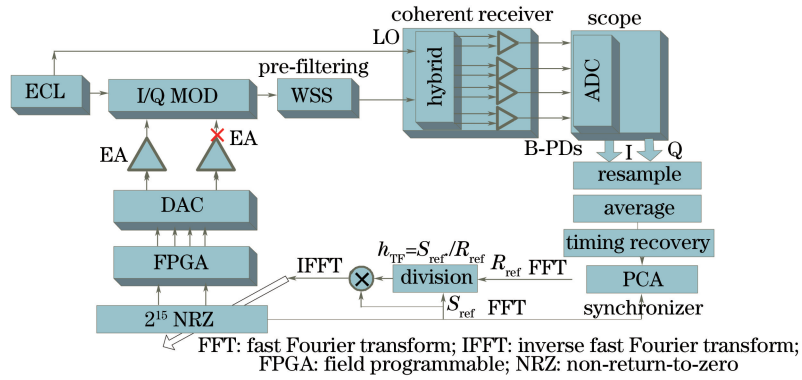


图 1 RPE 技术中采用 PCA 的原理

Fig. 1 Principle of RPE technology using PCA

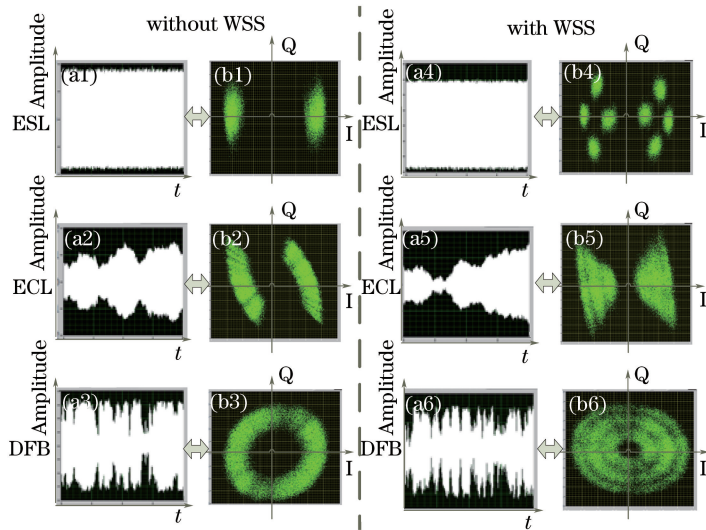


图 2 采用 RPE 技术的自相干零差检测系统传递函数的校准性能比较。

(a1)~(a6) BPSK 信号有无经过 WSS 时的时域电谱图; (b1)~(b6) 图 2(a1)~(a6) 对应的星座图

Fig. 2 Calibration performance comparison of transfer function of self-coherent homodyne detection system with RPE technology. (a1)-(a6) Time domain electric spectra of BPSK signal with or without WSS;

(b1)-(b6) constellation plots corresponding to Figs. 2(a1)-(a6)

线宽使利用发射模式和接收模式的相关性完成时域同步变得很难实现。为保持信道的线性响应,应尽量避免在恢复 BPSK 信号时进行盲目的均衡处理。当 RPE 方案中使用低成本激光源所产生的相位噪声不能忽略时,如何实现时域同步成为一个难题。

## 2.2 PCA 原理

为了改善传递函数计算中信道估计的精确性并提高系统对激光器线宽的容忍度,在 RPE 方案中提出了一种基于相位噪声均值的 PCA。基于相位噪声均值的 PCA 结构框架图如图 3 所示。假设  $a(t)$  为发射的 BPSK 信号,则自相干零差检测得到的接收信号  $r(t)$  可表示为

$$r(t) = a(t) \exp [j\phi(t)] + n(t), \quad (3)$$

式中  $\phi(t)$  为相位噪声,  $n(t)$  为信道噪声。根据(3)式,可以得到相位噪声为

$$\phi(t) = a(t)/r(t) = \exp [-j\phi(t)] + n(t). \quad (4)$$

以相同的符号率对  $a(t)$  和  $\phi(t)$  进行采样,使它们具有相同的时钟频率,以提高其相关性并得到较好的时钟恢复能力。为了使测试中的相位噪声最小化,对  $N$  个并行连续采样模块的采样值取平均。模块间隔的最优值取决于激光器线宽与符号率的乘积。在 16 Gbit/s BPSK 校准系统中,ESL、ECL 和 DFB 的  $N$  值分别取 64, 128, 512。将最佳平均相位角与(4)式相乘,并将恢复的二进制信号与发射信号的商在频域内进行相应的快速傅里叶变换(FFT)以得到传递函数。

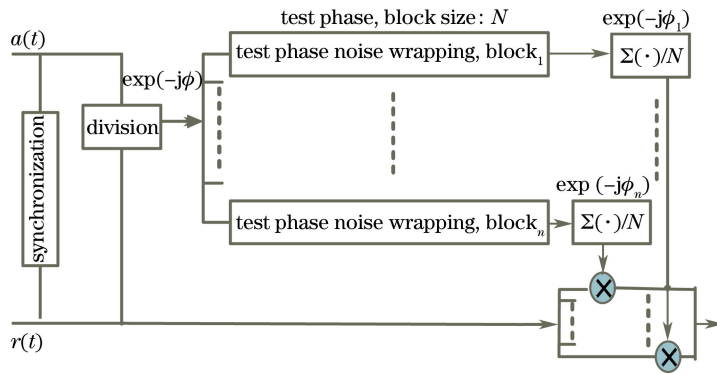


图 3 基于相位噪声均值的 PCA 结构框架图

Fig. 3 PCA structural frame based on phase noise mean value

图 4 为 RPE 方案中有/无 PCA 的系统传递函数。可以看出,前置滤波器抑制了预加重的高频分量。有 PCA 的系统传递函数比没有 PCA 时在频率与波特率的比值( $q$ )为  $0.7 \sim 1.0$  时分辨率更高。图 4 中插图为 BPSK 参考信号有/无 PCA 时相应的眼图,对比图 4(a)、(b)的插图可知,图 4(a)插图中的眼图模糊不清,表明没有引入 PCA 的 RPE 系统的实验精度较低;图 4(b)插图中的眼图清晰,表明有 PCA 的 RPE 系统能够有效补偿由前置滤波器导致的部分高频信号失真。

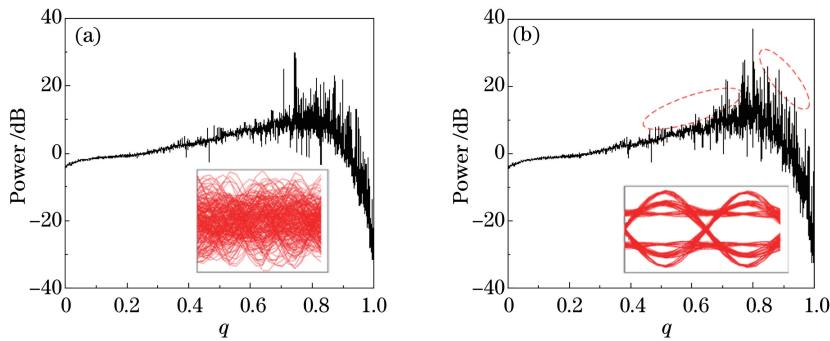


图 4 16 Gbit/s BPSK 信号的传递函数和相应的眼图。(a)无 PCA; (b)有 PCA

Fig. 4 Transfer functions of 16 Gbit/s BPSK signal and corresponding eye diagrams.

(a) Without PCA; (b) with PCA

### 3 实验设置和实验结果

图 5 为采用不同激光器线宽的 RPE 技术传递 PDM-QPSK 信号的相干检测实验装置原理图,图中 OC 为光耦合器,DL 为延迟线,ATT 为衰减器,PD 为光电探测器,EDFA 为掺铒光纤放大器,MZM 为马赫-曾德尔调制器。分别使用 ESL、ECL 和 DFB 产生中心波长为  $1550.1 \text{ nm}$  的连续激光,以比较不同激光器线宽对 RPE 性能的影响。由采样率为  $1 \text{ GSa/s}$  的高速 DAC (型号 VEGA DAC II,德国 Micram 公司)的两个端口分别产生两路  $32 \text{ Gbit/s}$  QPSK 的电二进制 I/Q 信号,然后分别通过两个  $3 \text{ dB}$  带宽为  $55 \text{ GHz}$  的宽带电放大器(型号 SHF S807B,德国 SHF 公司)实现功率放大。利用放大后的 I/Q 信号驱动富士通公司生产的带宽为  $30 \text{ GHz}$  的 I/Q 调制器,调制连续激光以产生 QPSK 信号。利用偏振复用器实现信号的偏振复用,保偏光纤耦合器(PM-OC)将信号均分为两束,光延迟线提供  $150$  个符号延时,偏振合束器(PBC)将信号进行重组,并利用可编程 WSS 对光进行滤波。在接收端,将线宽小于  $100 \text{ kHz}$  的 ECL 作为振荡源;在平衡光电探测(B-PDs)前,采用  $40 \text{ GHz}$  的接收机( $U^2T$  集成相干光接收机,德国  $U^2T$  光电公司)实现  $90^\circ$  极化解复用和相位的分集相干检测。使用采样率为  $50 \text{ GSa/s}$ 、带宽为  $20 \text{ GHz}$  的高速实时示波器(DPO 72004C, Tektronix)实现模数转换和数据采集。DSP 的步骤如下:

- 1) 采用平方律方法进行时钟提取;
- 2) 基于恒模算法,采用  $13$  个抽头并利用  $T/2$  ( $T$  为周期)间隔的自适应法拉第滤波器进行偏振模色散

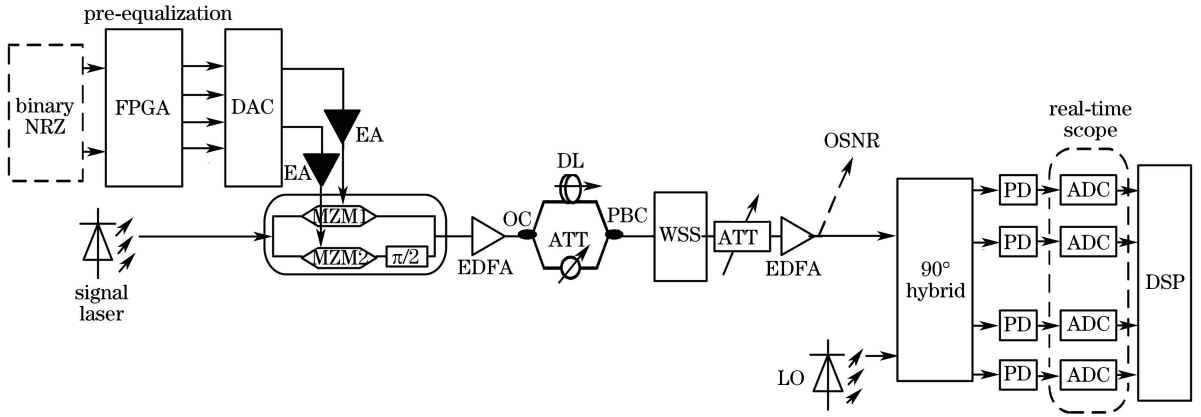


图 5 单信道 32 Gbit/s PDM-QPSK 信号相干检测的实验装置图

Fig. 5 Experimental setup diagram of coherent detection for single channel 32 Gbit/s PDM-QPSK signal

和模式色散的恢复与均衡;

3) 利用接收的光信号进行频率偏移估计和载波恢复,采用 MLSE 算法进行相位恢复。

图 6(a)为有/无 RPE 时单信道 32 Gbit/s PDM-QPSK 信号通过带宽为 25 GHz WSS 的光谱图。对于有 RPE 的 32 Gbit/s PDM-QPSK 信号,相似的重点在功率谱的频率偏移为  $\pm 37.5$  GHz 和 45 GHz 处。零频偏处的功率谱类似一个矩形,这是因为光滤波器使某些高频分量损失,对高频分量作预加重处理,相应的低频分量被抑制。图 6(a)的(I)和(II)分别表示光信噪比(OSNR)为 22 dB 时无/有 RPE 时的星座图,可以看出(II)更为清晰,表明 RPE 方案对 ISI 的预补偿效果较好。为研究 RPE 对 ISI 的影响,实验测得的 OSNR 性能如图 6(b)所示。由图 6(b)可以得到不同激光器线宽在带宽为 25 GHz 的光滤波下 32 Gbit/s PDM-QPSK 信号在比特误码率(BER)为  $1 \times 10^{-3}$  时所要求的 OSNR。可以看出,有 RPE 时 OSNR 改善了 5 dB。值得注意的是,有 RPE 的信号比原始信号多了 1 dB 的光信噪比冗余,这是受 DAC 采样率(1 GSa/s)的运算限制的结果。

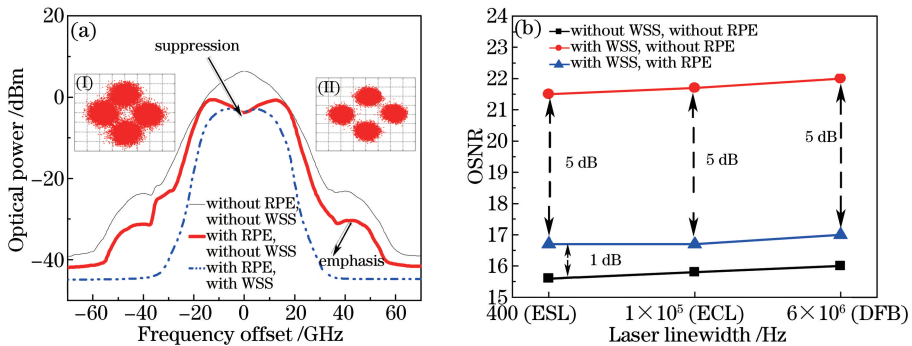


图 6 (a) 32 Gbit/s PDM-QPSK 信号通过带宽为 25 GHz 的 WSS 光谱图[插图(I)为 OSNR

为 22 dB 时无 RPE、有 WSS 的星座图,插图(II)为 OSNR 为 22 dB 时有 RPE、有 WSS 的星座图];(b) OSNR

Fig. 6 (a) Optical spectra of 32 Gbit/s PDM-QPSK signal after WSS with 25 GHz bandwidth [OSNR is 22 dB,

inset (I) is constellation diagram without RPE and with WSS when OSNR is 22 dB, and inset (II) is

constellation diagram with RPE and with WSS when OSNR is 22 dB]; (b) OSNR

## 4 结 论

比较了使用几种常见激光源(ESL、ECL 和 DFB)并采用 RPE 方案时自相干零差检测系统的性能,发现激光器线宽越大,信号的功率谱越不连续,自混频现象越严重,系统性能越差。为了提高 RPE 方案中激光器线宽的容忍度,提出了一种基于相位噪声均值的 PCA,使用商用的低成本激光器时,该算法也能精确估算传递函数,使传递函数在  $q$  为 0.7~1.0 时分辨率更高,从而使实验精度更高。实验证明了在相干检测中,有 RPE 和 WSS 时的系统眼图更清晰,对 ISI 的降低和对信号的预补偿效果更好;采用 RPE 方案时系统的性能

比没有采用 RPE 方案时提高了 5 dB 左右。该研究为提高通信的频谱效率、降低成本且不增加系统复杂度的研究提供了新思路。

### 参 考 文 献

- [1] Winzer P. Beyond 100G ethernet[J]. IEEE Communications Magazine, 2010, 48(7): 11388258.
- [2] Chandrasekhar S, Liu X. Experimental investigation on the performance of closely spaced multi-carrier PDM-QPSK with digital coherent detection[J]. Optics Express, 2009, 17(24): 21350-21361.
- [3] Zhang Xia, Tian Feng, Zhang Xiaoguang, *et al.* Study of coherent optical wavelength division multiplexing terabit transmission experiment system based on multi-carrier[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0605005.  
张霞, 田凤, 张晓光, 等. 基于多载波的相干波分复用太比特传输实验研究[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0605005.
- [4] Djordjevic I B. On the irregular nonbinary QC-LDPC-coded hybrid multidimensional OSCD-modulation enabling beyond 100 Tb/s optical transport[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(16): 2969-2975.
- [5] Zhang Lei, Zhang Xiaoguang, Xi Lixia, *et al.* Modified optical-signal-noise-ratio monitoring method based on high order statistical moment in PM-QPSK coherent optical system[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0505004.  
张磊, 张晓光, 席丽霞, 等. PM-QPSK 相干光通信系统中基于高阶统计矩的光信噪比监测方法的修正[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0505004.
- [6] Ding R, Zhang T, Zhang F. Experimental demonstration of multigranularity switching between optical DFT-spread-OFDM and Nyquist superchannel[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(11): 110604.
- [7] Geng Tianyu, Shu Qin, Ying Dali, *et al.* MAP blind equalization algorithm based on probability and adaptive[J]. Computer Engineering and Design, 2012, 33(10): 3720-3724.  
耿天玉, 舒勤, 应大力, 等. 基于概率和自适应的最大后验概率盲均衡算法[J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(10): 3720-3724.
- [8] Li J, Tipsuwannakul E, Eriksson T, *et al.* Approaching Nyquist limit in WDM systems by low-complexity receiver-side duobinary shaping[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(11): 1664-1676.
- [9] Wang J, Xie C, Pan Z. Generation of spectrally efficient Nyquist-WDM QPSK signals using digital FIR or FDE filters at transmitters[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(23): 3679-3686.
- [10] Bao Y, Li Z, Li J, *et al.* Nonlinearity mitigation for high-speed optical OFDM transmitters using digital pre-distortion[J]. Optics Express, 2013, 21(6): 7354-7361.
- [11] Cheng Yun, Liu Yi, Chen Lin, *et al.* Investigation of short distance optical fiber transmission technology based on Nyquist pulse subcarrier modulation[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2015, 26(2): 245-250.  
成运, 刘懿, 陈林, 等. 基于 Nyquist 脉冲副载波调制的短距离光纤传输技术研究[J]. 光电子 • 激光, 2015, 26(2): 245-250.
- [12] Dong Z, Chien H C, Jia Z, *et al.* Joint digital pre-equalization for spectrally efficient super Nyquist-WDM signal[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(20): 3237-3242.
- [13] Zhuang W, Huang W V. Phase precoding for frequency-selective Rayleigh and Rician slowly fading channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1997, 46(1): 129-142.
- [14] Keller T, Hanzo L. Sub-band adaptive pre-equalised OFDM transmission[C]. IEEE VTS 50<sup>th</sup> Conference on Vehicular Technology, 1999: 6505596.
- [15] Zhou X, Yu J. Multi-level, multi-dimensional coding for high-speed and high-spectral-efficiency optical transmission[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(16): 3641-3653.