

# 高速相干光通信系统中的自适应步长恒模算法

邸雪静<sup>1</sup> 童程<sup>1</sup> 张霞<sup>2</sup> 张晓光<sup>1</sup> 席丽霞<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>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)  
(<sup>2</sup>山东省光通信科学与技术重点实验室, 山东 聊城 252059)

**摘要** 对于高速光通信系统中的相干检测来说,盲均衡是一项常用的恢复传输符号的技术。目前应用最广泛的盲均衡算法是恒模算法,但是一方面它不能兼顾收敛速度和收敛精度,另一方面在偏分复用系统中很容易陷入奇异性。因此提出了一种改进型的恒模算法——自适应步长恒模算法,并在 112 Gb/s 偏分复用 16 进制正交幅度调制系统中对提出的算法进行了测试。与传统的恒模算法相比,改进后的算法收敛速度仅为恒模算法的 1/20;收敛稳定后误差函数的方差比恒模算法降低了 0.7 dB;对偏分复用系统中的奇异性有很好的抵抗能力;在不考虑奇异性问题时,光信噪比代价与恒模算法相比降低了 1.5 dB。

**关键词** 光通信;恒模算法;相干检测;偏分复用;正交幅度调制

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1006004

## Adaptive Step-Size Constant-Modulus Algorithm for High-Speed Optical Coherent Communication System

Di Xuejing<sup>1</sup> Tong Cheng<sup>1</sup> Zhang Xia<sup>2</sup> Zhang Xiaoguang<sup>1</sup> Xi Lixia<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Shandong Provincial Key Laboratory of Optical Communications Science and Technology,  
Liaocheng, Shandong 252059, China

**Abstract** In coherent detection of a high-speed optical communication system, blind equalization is a common technique to recover transmitted symbols, and one of the most widely used algorithms is constant-modulus algorithm (CMA). But on one hand, it can not converge fast and precisely enough; on the other hand, it can be caught in singularity problem while operating on a polarization division multiplexed system. A modified CMA, which is adaptive step-size CMA, is proposed. The performance of the proposed algorithm is numerically tested in a 112 Gb/s polarization division multiplexed 16 quadrature amplitude modulation (QAM) optical coherent system. Compared with conventional CMA, the convergence rate of the modified CMA is 20 times faster, and the variance of the error function is 0.7 dB lower. Besides, the modified CMA can overcome the singularity problem quite well. Without considering the singularity problem, the optical signal noise rate (OSNR) penalty is 15 dB lower than that of conventional CMA.

**Key words** optical communications; constant-modulus algorithm; coherent detection; polarization multiplexing; quadrature amplitude modulation

**OCIS codes** 060.4510; 060.1660; 060.4230

## 1 引言

近年来光通信系统的传输速率和频谱利用率不断提高,100 Gb/s 以上的系统正在成为研究热点<sup>[1,2]</sup>。一方面,高阶调制格式<sup>[3,4]</sup>已经引起了广泛

关注,以 16 进制正交幅度调制(16QAM)信号为例,在符号速率相等的情况下,它的比特率是当前广泛应用的正交移相键控(QPSK)信号的 2 倍。另一方面,偏分复用技术既能将两路相对独立的信号分配

**收稿日期**: 2012-04-19; **收到修改稿日期**: 2012-05-07

**基金项目**: 北邮青年创新专项基金(BUPT2011RC009)、高等学校博士学科点专项科研基金(20110005110014)和山东省自然科学基金(ZR2010FM043)资助课题。

**作者简介**: 邸雪静(1990—),女,硕士研究生,主要从事高速相干光通信系统中补偿算法方面的研究。

E-mail: silentsnowy@bupt.edu.cn

**导师简介**: 张晓光(1961—),男,博士,教授,主要从事高速光通信系统方面的研究。E-mail: xgzhang@bupt.edu.cn

到两个正交偏振态上,又能够使频谱效率加倍。对于高阶调制格式而言,接收端只能采用相干接收技术,并利用多种数字信号处理(DSP)算法<sup>[5~8]</sup>对接收到的光信号进行处理。然而高速率的高阶调制格式和偏分复用技术都使得光信号对偏振模色散及偏振串扰等信道损伤更加敏感,需要在相干接收机中使用性能更加优异的均衡算法来恢复光信号<sup>[9,10]</sup>。

一般来说,均衡算法<sup>[5~7,11]</sup>可以分为两大类:盲均衡和非盲均衡。目前应用最广泛的是由Godard<sup>[12]</sup>提出的恒模算法(CMA),可以利用它来恢复出具有一定程度的恒模特性的传输信号。但是CMA的收敛速度比较慢,收敛精度也不够好,且很容易在收敛中陷入奇异性<sup>[13,14]</sup>。所谓奇异性是指,在偏分解复用的过程中两路输出信号会以一定概率收敛到同一路输入信号。

本文提出一种自适应步长恒模算法(AS-CMA),其迭代步长可以根据接收信号的误差函数值来进行自适应调整。在112 Gb/s偏分复用16QAM系统中对提出的算法进行了仿真测试,并将其与CMA进行了一系列对比。

## 2 自适应步长恒模算法

### 2.1 偏分复用系统中的恒模算法

发送端发出的信号在信道中会受到各种损伤,为了保证通信质量,需要在接收端对信号进行均衡恢复,其过程如图1所示。

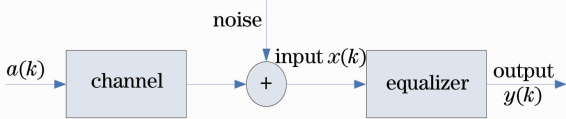


图1 使用盲均衡器的信道模型

Fig.1 Channel model of blind equalizer

CMA是目前应用最广泛的一种盲均衡算法,其目标函数可以定义为

$$J(k) = E[(|y(k)|^2 - R_2)^2], \quad (1)$$

式中 $E[\cdot]$ 为算式的期望值, $y(k)$ 为滤波器的输出, $R_2$ 为由输入数据符号 $a(k)$ 决定的正实数,定义为

$$R_2 = \frac{E[|a(k)|^4]}{E[|a(k)|^2]}. \quad (2)$$

在偏分复用系统中,CMA应用在如图2所示的蝶形滤波器中,第 $k$ 个符号经过滤波器的输出为

$$X_{out}(k) = \mathbf{h}_{xx}^H(k)\mathbf{X}_{in}(k) + \mathbf{h}_{yx}^H(k)\mathbf{Y}_{in}(k), \quad (3)$$

$$Y_{out}(k) = \mathbf{h}_{xy}^H(k)\mathbf{X}_{in}(k) + \mathbf{h}_{yy}^H(k)\mathbf{Y}_{in}(k). \quad (4)$$

对于 $N$ 个抽头的有限脉冲响应(FIR)滤波器来说,

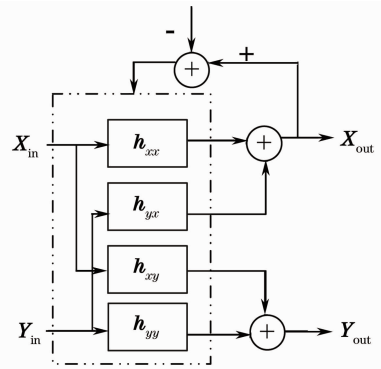


图2 蝶形滤波器的模型

Fig.2 Model of butterfly filter

$\mathbf{h}_{xx}$ ,  $\mathbf{h}_{yy}$ ,  $\mathbf{h}_{xy}$ 和 $\mathbf{h}_{yx}$ 是长度为 $N$ 的抽头系数向量,随着接收符号的迭代更新,其权重的迭代公式为<sup>[15]</sup>

$$\mathbf{h}_{xx}(k+1) = \mathbf{h}_{xx}(k) + \mu[R_2 - |X_{out}(k)|^2] \times X_{out}(k)\mathbf{X}_{in}^*(k), \quad (5)$$

$$\mathbf{h}_{xy}(k+1) = \mathbf{h}_{xy}(k) + \mu[R_2 - |X_{out}(k)|^2] \times X_{out}(k)\mathbf{Y}_{in}^*(k), \quad (6)$$

$$\mathbf{h}_{yx} = -\mathbf{h}_{xy}^*, \quad (7)$$

$$\mathbf{h}_{yy} = \mathbf{h}_{xx}^*, \quad (8)$$

进行迭代更新,式中 $\mu$ 是算法的迭代步长, $R_2$ 是由(2)式计算所得。由(7)式和(8)式可知,只有两个子滤波器是相互独立的,而另外两个子滤波器与它们呈正交的关系,从而在结构上初步防止了奇异性的出现。

研究表明,算法的收敛性能在很大程度上取决于迭代过程中选取的步长,之前已有一些关于迭代步长的研究成果<sup>[16,17]</sup>。当迭代步长较小时,算法的收敛速度会比较慢,跟踪能力会比较弱;另一方面当迭代步长较大时,收敛速度会加快,但是收敛精度不好,甚至有可能收敛不到最优解。所以,选择合适的步长其实是在收敛速度和精度之间进行取舍。

### 2.2 自适应步长恒模算法

传统CMA的迭代步长是一个固定的值,根据之前的论述可知,这样的取值无法兼顾算法的收敛速度和精度。为了解决这个问题,提出了一种改进型的恒模算法——AS-CMA,其步长能够根据接收信号的误差函数值来自适应调整大小。

理论上可以任意选取步长的表达式,前提是它能够满足越接近最优解其值越小的原则。给出了一种自适应步长的计算方法:

$$\mu(e) = k_1[1 - \exp(-k_2 e^2)], \quad (9)$$

式中 $k_1$ 和 $k_2$ 分别是两个调整步长值的常数, $e$ 是接收信号的误差函数值:

$$e(k) = y(k)[R_2 - |y(k)|^2]. \quad (10)$$

可见,当接收信号的误差函数值越大时,计算所得的步长值越大,相反误差函数值越小,步长越小。

CMA 的最终目标是使误差函数值不断减小,可以将误差函数近似看成目标函数。由于大多数目标函数都是非凸函数,图 3(a)中 CMA 使用固定步长进行迭代,非常容易陷入奇异性问题,只在两点之间不停更新,而其函数值并没有进一步趋于最优解。而图 3(b)中 AS-CMA 可以较好地解决这一问题,随着迭代过程中目标函数值的减小,步长也调整到较小的值,从而逐渐接近最优解,进一步克服了收敛过程中的奇异性。

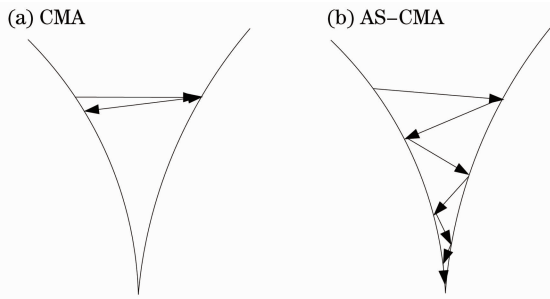


图 3 算法迭代过程的示意图

Fig. 3 Iteration process of two algorithms

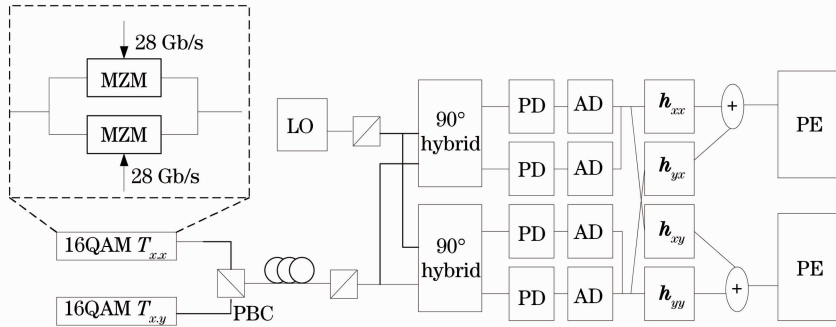


图 4 112 Gb/s 偏分复用 16QAM 相干光通信仿真系统

Fig. 4 Simulation scheme of 112 Gb/s polarization-division multiplexed 16QAM coherent optical communication system

### 3.2 步长计算式中两个常数的选取

(9)式给出了自适应步长的计算方法,根据以往的经验,CMA 所取的固定步长一般在  $0 \sim 1$  之间。将  $k_1$  的取值范围初步限定为  $0 \sim 1$ ,  $k_2$  的取值范围为  $0 \sim 10$ , 然后进一步讨论。图 5 给出了  $R_{\text{OSN}}$  为 22 dB 时遍历  $k_1$  和  $k_2$  的值得到的系统误码率分布图。从图中可以明显看出,当  $k_1$  和  $k_2$  的值落在中部平坦的低谷带时,系统的误码率很小(小于  $10^{-3}$ ),而如果没有选在这一区域,则对应的系统误码率很大,从而可以得出参数对  $(k_1, k_2)$  的取值范围。由图 5 可以看出,可取的参数对很多,在仿真中选择的  $(k_1, k_2)$  取值为  $(0.18, 3)$ , 这是众多可选参数对中的一对。

## 3 仿真系统及结果

### 3.1 搭建仿真系统

图 4 是利用仿真软件搭建的 112 Gb/s 偏分复用 16QAM 相干光通信系统,接收端是多偏振态相干检测模块,图中 LO 为本地振荡器,PBC 为偏振分束控制器。源激光器和本地激光器的线宽都设定为 500 kHz,即总线宽是 1 MHz,差分群时延(DGD)取 100 ps。由于现有的 DSP 算法<sup>[18~20]</sup>可以较好地补偿色散,故而本文假设系统中的色散已经被完全补偿,不再考虑色散的影响。信道中混入高斯白噪声,取光信噪比  $R_{\text{OSN}}$  的基底取 0.1 nm。扰偏器的琼斯矩阵为<sup>[13]</sup>

$$T = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \exp(-j\phi) \sin \alpha \\ -\exp(j\phi) \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}, \quad (11)$$

对于偏分复用系统,当  $\alpha$  为  $\pi/4$  和  $3\pi/4$  时,易出现奇异性。在接收端,经过  $90^\circ$  混合器、光电探测器(PD)和模数转换(AD)之后,光信号进入蝶形滤波器,这就是 CMA 及 AS-CMA 迭代更新的部分。此后滤波器的输出信号经过相位恢复和判决器(PE),相位恢复部分采用四次方算法<sup>[3]</sup>,虽然它是为 QPSK 信号设计的,但也是 16QAM 系统中相位恢复的常用算法,对此不做更多讨论。

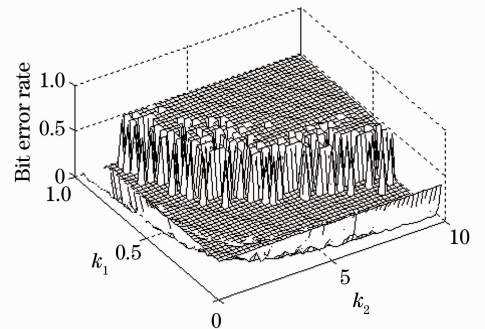


图 5 改变步长计算式中两个参数时的误码率分布  
Fig. 5 Bit error rate distribution when changing two parameters of calculating the step size

### 3.3 仿真结果及分析

比较 CMA 和 AS-CMA 对奇异性的抵抗力。设 CMA 的迭代步长为 0.005, AS-CMA 中的两个参数  $k_1$  和  $k_2$  分别为 0.18 和 3。图 6 给出了两种算法遍历矩阵  $T$  中  $\alpha$  和  $\phi$  两个角度后的误码率分布。

从图 6(a) 中可以很明显地看到当  $\alpha$  在  $\pi/4$  和  $3\pi/4$  附近时, 使用 CMA 的系统误码率急剧增大, 形成了两个尖峰, 表示在这里出现了奇异性, 算法没

有收敛到最优解; 而从图 6(b) 则可以可以看出使用 AS-CMA 的误码平面非常平坦, 没有出现尖峰, 由此可以初步说明 AS-CMA 对奇异性有很好的抵抗力。

之后再比较两种算法的误码性能, 如图 7(a) 所示。当  $\alpha = \pi/2$  时, 扰偏器对传输信号的影响最小, 可以看到图中两条线几乎重合, 说明在此条件下两种算法的误码性能十分接近; 当  $\alpha = \pi/4$ , 即扰偏器对传输信号有一定的影响时, AS-CMA 的误码性能

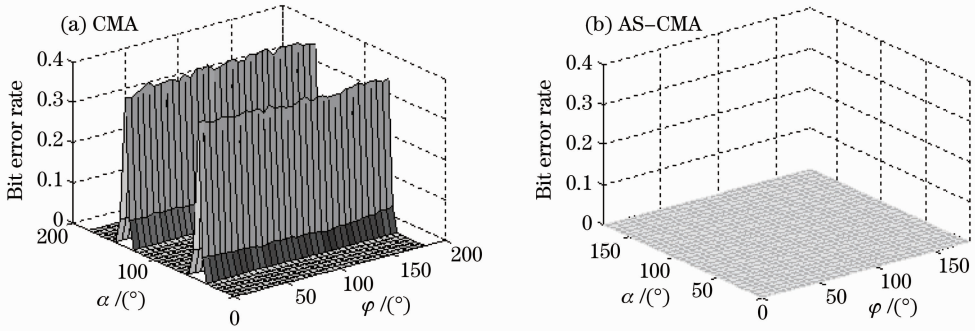


图 6 遍历  $\alpha$  和  $\phi$  后的误码率分布

Fig. 6 Bit error rate distribution of traversing  $\alpha$  and  $\phi$

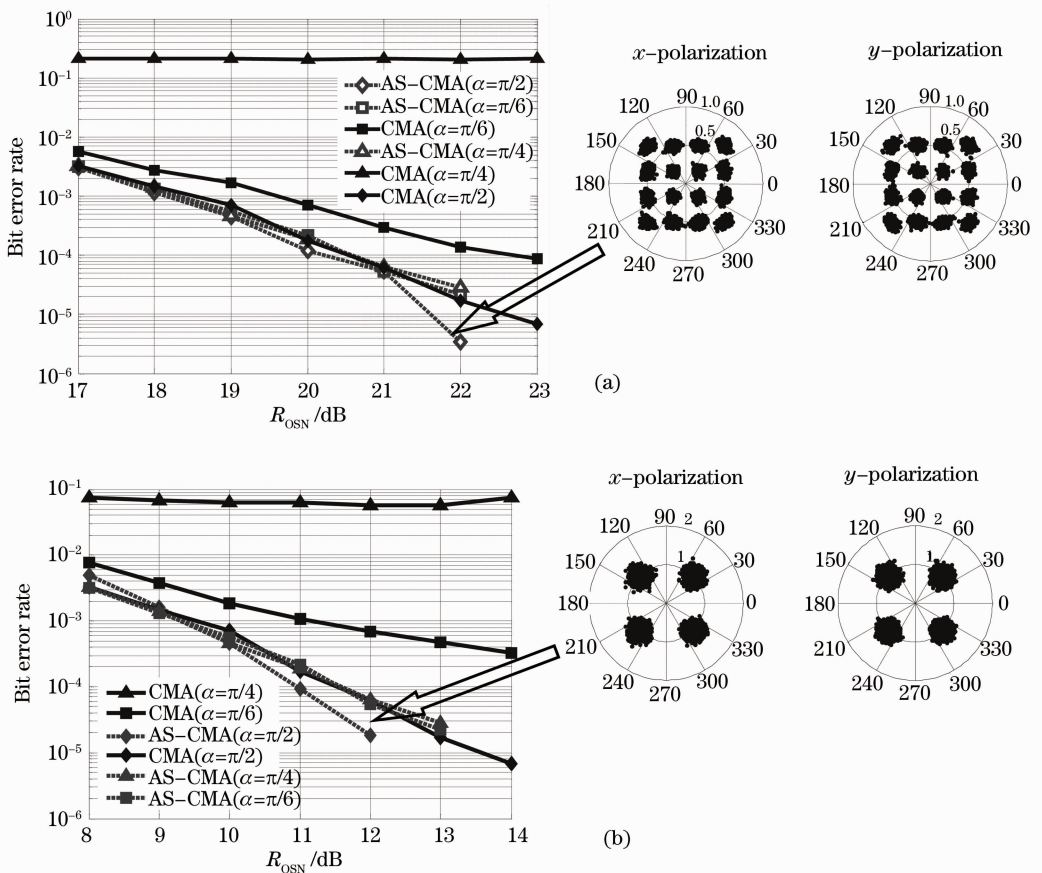


图 7 CMA 和 AS-CMA (a) 在 PDM-16QAM 系统中 (b) 在 PDM-QPSK 系统中的误码率性能

Fig. 7 Bit error rate performance of CMA and AS-CMA in (a) a PDM-16QAM system and (b) a PDM-QPSK system

几乎没有变化,而 CMA 要得到相同的误码率所需的  $R_{OSN}$  至少提高了 1.5 dB;当  $\alpha = \pi/4$  时,扰偏器对传输信号的影响最大,AS-CMA 的误码性能同样维持在与上述条件相同的水平,而 CMA 则陷入了奇异性根本无法收敛。由此可知,AS-CMA 对变化的扰偏角度有很平坦的误码性能,且对奇异性有很好的抵抗力。图 7 中的子图是经过 AS-CMA 均衡及相位恢复后的输出信号星座图。为了与 QPSK 系统对比,做出了两种算法在 PDM-QPSK 系统中的误码率曲线和星座图,如图 7(b)所示,从中可以看出,两种算法的表现基本上与 PDM-16QAM 系统一致。

最后比较两种算法的收敛性能( $\alpha = \pi/6, R_{OSN} = 22$  dB),如图 8 所示。图中实线为 CMA,虚线为 AS-CMA,横轴表示迭代次数,纵轴表示迭代过程中误差函数值的方差。若以误差函数值的方差是 -3.5 dB 为标准,CMA 要经过 2070 次迭代,而 AS-CMA 只需要 120 次迭代;而比较两者收敛到稳定状态后,AS-CMA 对应的误差函数值的方差比 CMA 低 0.7 dB。显然,AS-CMA 的收敛性能明显优于 CMA。

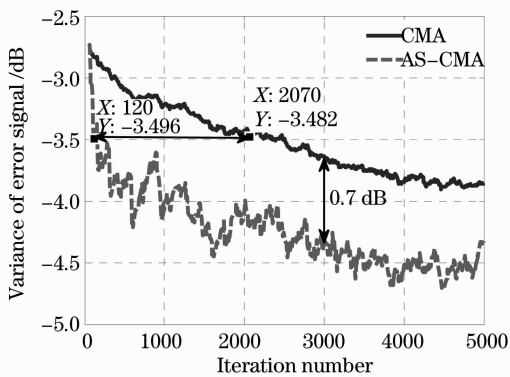


图 8 CMA 和 AS-CMA 的收敛性能

Fig. 8 Convergence performance of CMA and AS-CMA

## 4 结 论

提出了一种自适应步长恒模算法,在迭代过程中步长根据传输符号的误差函数值进行自适应调整。在仿真软件搭建的 112 Gb/s 偏分复用 16QAM 相干光传输系统上对算法进行了测试。测试结果表明,改进后的算法收敛速度仅约为 CMA 的 1/20;收敛稳定后误差函数的方差比 CMA 降低了 0.7 dB;不考虑奇异性问题时,改进后的算法对光信噪比的要求比 CMA 降低了 1.5 dB;此外它对偏分复用系统中的奇异性有很好的抵抗能力。

## 参 考 文 献

1 M. Birk, P. Gerard, R. Curto *et al.*. Real-time single-carrier

coherent 100 Gb/s PM-QPSK field trial [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2011, **29**(4): 417~425

2 C. R. S. Fludger, T. Duthel, D. Borne *et al.*. Coherent equalization and POLMUX-RZ-DQPSK for robust 100-GE transmission[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(1): 64~72

3 M. Seimetz. High-Order Modulation for Optical Fiber Transmission[M]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. 37~54

4 M. Seimetz. Performance of coherent optical square-16-QAM systems based on IQ-transmitters and homodyne receivers with digital phase estimation [C]. *National Fiber Optic Engineers Conference*, Anaheim California, March 5, 2006. NWA4

5 Peng Jun, Guo Jianbing, Chen Dongjin. Research on a union carrier recovery algorithm for high-order QAM[J]. *Study on Optical Communications*, 2011, **37**(3): 20~22

彭 钧, 郭见兵, 陈东进. 一种高阶 QAM 联合载波恢复算法的研究[J]. *光通信研究*, 2011, **37**(3): 20~22

6 I. Fatadin, D. Ives, S. J. Savory. Blind equalization and carrier phase recovery in a 16-QAM optical coherent system [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(15): 3042~3049

7 S. Abrar, A. K. Nandi. Blind equalization of square-QAM signals; a multimodulus approach [C]. *IEEE T. Commun.*, 2010, **58**(6): 1674~1685

8 E. Ip, J. M. Kahn. Digital equalization of chromatic dispersion and polarization mode dispersion [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(8): 2033~2043

9 K. Kikuchi. Optical Fiber Telecommunications VB: Systems and Network[M]. Burlington: Elsevier, 2008. 95~128

10 K. Kikuchi. Coherent optical transmission systems [C]. *Opto-Electronics and Communications Conference*, Sapporo, Japan, July 5, 2010. 120~121

11 C. R. Johnson, Jr. P. Schniter, T. Endres *et al.*. Blind equalization using the constant modulus criterion: a review[J]. *Pro. of IEEE*, 1998, **86**(10): 1927~1950

12 D. Godard. Self-recovering equalization and carrier tracking in a two-dimensional data communication system [J]. *IEEE T. Commun.*, 1980, **28**(11): 1867~1875

13 C. Xie, S. Chandrasekhar. Two-stage constant modulus algorithm equalizer for singularity free operation and optical performance monitoring in optical coherent receiver[C]. *Optical Fiber Communication Conference*, San Diego, California, March 21, 2010. OMK3

14 L. Liu, Z. Tao, W. Yan *et al.*. Initial tap setup of constant modulus algorithm for polarization de-multiplexing in optical coherent receivers [C]. *Optical Fiber Communication Conference*, San Diego, CA, March 22, 2009. 1~3

15 K. Kikuchi. Polarization-demultiplexing algorithm in the digital coherent receiver[C]. *IEEE/LEOS Summer Topical Meetings*, Acapulco, 2008, July 21. 101~102

16 V. Zarzoso, P. Comon. Optimal step-size constant modulus algorithm[J]. *IEEE T. Commun.*, 2008, **56**(1): 10~13

17 W. Xue, X. Yang, Z. Zhang. A variable step size blind equalization algorithm for QAM signals[C]. *Microwave and Millimeter Wave Technology*, Chengdu, May 8, 2010. 1801~1804

18 S. J. Savory, G. Gavioli, R. I. Killey. Electronic compensation of chromatic dispersion using a digital coherent receiver[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(5): 2120~2126

19 Feng Yong, Wen He, Zhang Hanyi *et al.*. Digitalized optical coherent detection of differential phase shift keying signal and chromatic dispersion compensation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 471~476

冯 勇, 闻 和, 张汉一等. 差分相移键控信号的数字相干光检测与色散补偿研究与实现[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 471~476

20 Xu Xia, Xi Lixia, Zhang Xiaoguang *et al.*. Design and optimization of chromatic dispersion compensation block in digital coherent optical receiver[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1106001

徐 霞, 席丽霞, 张晓光等. 光数字相干接收机中色散补偿模块设计与优化 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 1106001