

偏振复用光纤通信系统色散均衡器及算法的研究

曾祥焯^{1,2} 刘剑飞² 赵启大¹

(¹ 南开大学现代光学研究所, 天津 300071)
(² 河北工业大学信息工程学院, 天津 300401)

摘要 设计了一种适用于偏振复用相干解调光纤通信系统的色散均衡器,用于补偿信道传输的色散损伤。该均衡器采用半码元间隔的蝶形有限脉冲响应滤波器结构,与此结构配合的自适应算法分别采用最小均方算法和递归最小二乘算法。通过仿真实验,分析了两种算法对残留色度色散和偏振模色散的补偿容限。仿真结果表明,递归最小二乘算法的补偿效果优于最小均方算法,它可以同时补偿 1760 ps/nm 的残留色度色散和 104.9 ps 偏振模色散引起的差分群时延,比同等条件的最小均方算法提升性能 2.23 dB。

关键词 光通信;色散均衡器;自适应算法;偏振复用;蝶形滤波器;递归最小二乘

中图分类号 TN911.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0206003

Study on Dispersion Equalizer and Algorithm for Polarization Multiplexed Fiber Optics Communication Systems

Zeng Xiangye^{1,2} Liu Jianfei² Zhao Qida¹

(¹ Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)
(² School of Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract A dispersion equalizer is designed to compensate dispersions of polarization multiplexing coherent fiber optics communication systems. The proposed equalizer is realized with fraction spaced butterfly finite impulse response (FIR) structure and the corresponding adaptive algorithms are least mean square (LMS) and recursive least squares (RLS), respectively. The residual chromatic dispersion (CD) and polarization mode dispersion (PMD) tolerances of both algorithms are analyzed by simulation. The simulation results show that RLS can compensate 1760 ps/nm residual CD and 104.9 ps differential group delay (DGD) simultaneously and it has 2.23 dB promotion than LMS.

Key words optical communications; dispersion equalizer; adaptive algorithm; polarization multiplexing; butterfly filter; recursive least squares

OCIS codes 060.1660; 060.2330

1 引 言

100 Gb/s 的光纤通信系统已成为当前光通信技术研究的热点^[1~4],其中偏振复用(PolMux)、相干解调和多进制调制是该系统中常用的新技术^[2~10]。在这样的应用背景下,接收端的电域均衡技术也针对这些新技术做出了相应的调整。均衡器的核心是均衡结构和自适应算法。针对偏振复用的

均衡结构多采用蝶形滤波器结构,滤波器形式多为有限脉冲响应(FIR)滤波器,常用的自适应算法为最小均方(LMS)算法^[7~14]。

本文根据偏振复用光纤信道的信道模型建立均衡器的蝶形 FIR 滤波器结构,在此均衡结构的基础上,分别实现最小均方(LMS)算法和递归最小二乘(RLS)算法。通过仿真实验,比较两种算法对残留

收稿日期: 2011-07-09; 收到修改稿日期: 2011-09-14

基金项目: 河北省自然科学基金(F2008000116)资助课题。

作者简介: 曾祥焯(1979—),男,博士研究生,讲师,主要从事光纤通信和数字信号处理等方面的研究。

E-mail: zengxy@hebut.edu.cn

导师简介: 赵启大(1942—),男,教授,博士生导师,主要从事声光信号处理、光纤通信和光纤传感等方面的研究。

E-mail: zhaoqd@nankai.edu.cn

色度色散(CD)和偏振模色散(PMD)的均衡性能。

2 均衡器结构

本文所讨论的色散均衡器适用于偏振复用的光纤通信系统。系统的相关设置如下:系统总传输速率为 112 Gb/s, X、Y 方向偏振复用, 码元调制方式为四进制 QAM, 因此每个偏振方向的传输速率为 56 Gb/s; 接收机端采用偏振解复用零差相干检测, 光电二极管采用平衡检测结构以提高检测灵敏度。经接收机检测得到 I_x, Q_x, I_y, Q_y 四路电信号, 分别为 X、Y 两偏振方向的 I、Q 分量。

接收机检测得到的电信号经过两倍速率的采样, 进入数字信号处理单元进行色散均衡和判决, 恢复出发端码流。

本系统中的偏振复用光纤信道可以用蝶形滤波器来建模, 信道模型如图 1 所示。

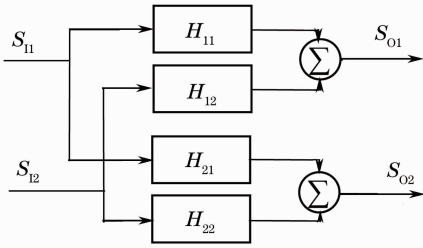


图 1 偏振复用信道模型示意图

Fig. 1 Layout of PolMux channel model

由图 1 可以看出, 偏振复用的光纤信道实际是一个两输入两输出的信道, 并且两个复用信道完全对称。 S_{11}, S_{01} 分别代表某一偏振方向的输入信号和输出信号, S_{12}, S_{02} 代表另一正交偏振方向的输入、输出信号。4 个蝶形排布的滤波器 $H_{11}, H_{21}, H_{12}, H_{22}$ 用来建模信道的传输特性, 其中 H_{11}, H_{22} 分别建模两偏振方向的正向传输特性, H_{21}, H_{12} 建模两偏振方向相互耦合的特性。根据图 1 的信道模型可以写出输出信号与输入信号之间的关系

$$\begin{bmatrix} S_{01} \\ S_{02} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{11} \\ S_{12} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

根据上述的偏振复用信道模型, 可以设计相应的色散均衡器结构, 如图 2 所示。图中上半部分为 X 偏振方向的均衡, 下半部分为 Y 偏振方向的均衡, 两部分完全对称。滤波器 h_{xx}, h_{yx} 组成 X 偏振方向的均衡器, 滤波器 h_{yy}, h_{xy} 组成 Y 偏振方向的均衡器。 u, v, e, d 分别表示输入信号、输出信号、误差信号和判决输出信号, 信号的下标代表偏振方向。 h_{xx}, h_{yy} 为直通滤波器, 用来补偿两偏振方向的正向传输损

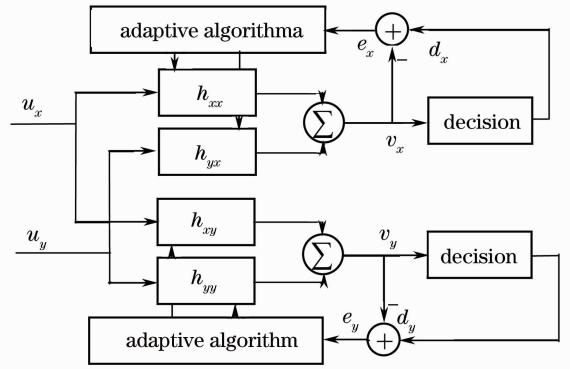


图 2 均衡器结构示意图

Fig. 2 Layout of equalizer structure

伤。 h_{xy}, h_{yx} 为交叉滤波器, 用来补偿两偏振态之间的能量耦合产生的传输损伤。

FIR 滤波器的结构简单且性能稳定, 因此本文采用 FIR 实现图示蝶形结构中的滤波器。图 2 所示蝶形结构的均衡性能和跟踪信道特性变化的能力主要由其中的自适应算法决定, 因此主要讨论在该结构下, 两种自适应算法的实现和性能。

3 自适应算法

图 3 所示是自适应算法与 M 个抽头的 FIR 滤波器结合的模式。图中信号的含义与图 2 中类似, 只是略去了代表偏振方向的下标。各信号括号中的 n 表示该信号第 n 时刻的值, 因为自适应算法是迭代计算的, 信号的值会根据时刻的变化而更新。图中的抽头系数 $[\omega_0(n), \omega_1(n), \omega_2(n), \dots, \omega_{M-2}(n), \omega_{M-1}(n)]^T$ 组成抽头权向量 $w(n)$, 输入信号序列 $[u(n), u(n-1), u(n-2), \dots, u(n-M+2), u(n-M+1)]^T$ 组成输入向量 $u(n)$ 。自适应算法根据当前误差信号 $e(n)$ 产生下一时刻的抽头权向量。

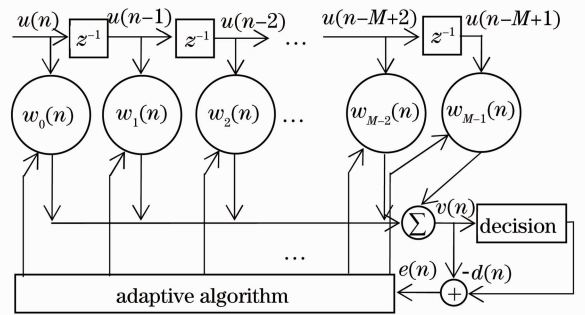


图 3 自适应算法模型示意图

Fig. 3 Layout of adaptive algorithm model

3.1 最小均方算法

LMS 算法是随机梯度算法的一种, 属于线性自适应滤波算法^[15]。从它的名称可知该算法的自适

应目标是令均方误差最小化。LMS 算法运算简单，不需要复杂的相关和矩阵求逆运算，因此成为其他自适应算法的参照标准。

LMS 算法的基本关系式如下：

滤波器输出

$$v(n) = \mathbf{w}^H(n)\mathbf{u}(n), \quad (2)$$

误差信号

$$e(n) = d(n) - v(n), \quad (3)$$

抽头权向量的自适应

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu \mathbf{u}(n) e^*(n). \quad (4)$$

(2)式为滤波器的输出，表达了滤波器的输出信号与输入信号的线性关系。(3)式表明误差信号是由判决器的输出与输入的差值得到。此处需要说明，当LMS算法稳定工作的时候，判决器输出信号的误码率应该很低，可以认为判决器的输出信号就是期望信号。(4)式是抽头权向量的更新公式，体现了LMS算法的自适应过程，其中的参数 μ 为更新步长，决定了每次抽头系数调整的最大步长，本文中的取值为0.0001。以上各式中， $(\cdot)^H$ 表示矩阵的厄米转置， $(\cdot)^*$ 表示复共轭。由于每个偏振方向都包含I、Q两个信号分量，所以图2、图3和上述公式中的信号均为复数信号。

3.2 递归最小二乘算法

RLS算法利用最小二乘方法解决线性滤波问题^[15]，它的自适应目标是误差信号的加权平方和最小化。RLS算法由于对输入数据进行了白化处理，收敛速度和自适应性能都有所改善。当然数据的处理增加了算法的计算复杂度。

RLS算法的计算关系式如下：

初始化

$$\mathbf{w}(0) = 0, \quad (5)$$

$$\mathbf{P}(0) = \delta^{-1} \mathbf{I}, \quad (6)$$

增益向量

$$\mathbf{g}(n) = \mathbf{P}(n-1)\mathbf{u}(n), \quad (7)$$

$$\mathbf{k}(n) = \frac{\mathbf{g}(n)}{\lambda + \mathbf{u}^H(n)\mathbf{g}(n)}, \quad (8)$$

输入数据相关矩阵的逆

$$\mathbf{P}(n) = \frac{\mathbf{P}(n-1) - \mathbf{k}(n)\mathbf{u}^H(n)\mathbf{P}(n-1)}{\lambda}, \quad (9)$$

滤波器输出

$$v(n) = \mathbf{w}^H(n-1)\mathbf{u}(n), \quad (10)$$

误差信号

$$e(n) = d(n) - v(n), \quad (11)$$

抽头权向量的自适应

$$\mathbf{w}(n) = \mathbf{w}(n-1) + \mathbf{k}(n) e^*(n). \quad (12)$$

(5),(6)式分别是抽头系数和相关矩阵逆的初始化赋值，其中的参数 δ 为正则化参数，本文中的取值为10。(7),(8)式为增益向量 $\mathbf{k}(n)$ 的计算公式，其中 $\mathbf{g}(n)$ 为中间变量。增益向量表示抽头系数每次迭代时对误差信号的增益，这一点可以从(12)式看出。(8)式中的参数 λ 为遗忘因子，表示了对旧数据的遗忘程度，取值在(0,1]之间，取值越小代表遗忘越快速。本文中 λ 的取值为0.999999，接近于无限记忆。(10)~(12)式与(2)~(4)式类似。

4 仿真结果

在本文所搭建的仿真系统中，采用了一根可设定参数的光纤模型来模拟实际传输中的残留色度色散和偏振模色散。仿真中所采用的色散系数和偏振模色散系数分别为 $16 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 和 $10 \text{ ps} \cdot \text{km}^{1/2}$ ，125 km的光纤即可模拟出2000 ps/nm的残留色度色散和112 ps的偏振模色散引起的差分群时延(DGD)。基于仿真效率的需求，偏振模色散系数并没有采用实际单模光纤的 $0.1 \text{ ps} \cdot \text{km}^{1/2}$ 。经仿真实验，两种参数的相同平均DGD仿真结果无明显差异。

在仿真实验中，发现残留色度色散对均衡性能的影响比较大，因此依据光信噪比(OSNR)为16 dB时2000 ps/nm色度色散的影响仿真了在不同的滤波器抽头个数下两种自适应算法的均衡性能，以此作为选取滤波器抽头个数的依据。不同抽头个数下的误符号率(SER)性能如图4所示。

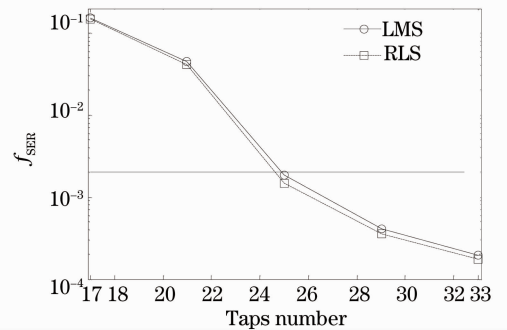


图4 不同抽头数的误符号率性能

Fig. 4 SER performance with different taps

图4中，纵坐标为误符号率，横坐标为滤波器的抽头数目，抽头数以偶数个码元增长。图中的两条曲线为分别采用LMS算法和RLS算法得到的误符号率，实横线为误符号率为 2×10^{-3} 的上限，它代表系统采用前向纠错码(FEC)时需要传输系统达到的

最高误码率上限 1×10^{-3} , 当传输系统的误符号率低于这一上限时, FEC 就可以将系统的整体误码率降到约 1×10^{-12} 的近似无差错传输状态。

从图 4 的两条曲线可以看出, 滤波器抽头数的增加可以极大地提高均衡性能。对于 2000 ps/nm 的残留色散, 25 抽头比 21 抽头约有一个数量级以上的性能提升, 而抽头数多于 25 个则性能提升不是特别明显, 而且 25 抽头刚好能够达到 FEC 限制的误码率上限, 因此本文选择 25 抽头的 FIR 滤波器作为研究两种自适应算法性能的基础。

从两种算法的 SER 曲线的比较可以看到, RLS 算法的误符号率性能比 LMS 算法稍好, 定量的分析将在后面的 OSNR 性能的仿真结果中给出。

确定了 FIR 滤波器抽头数为 25 后, 通过仿真实验研究了 LMS 算法和 RLS 算法与均衡结构结合后对系统残留色度色散和偏振模色散容限的提升, 以及对两种色散同时补偿的能力。

图 5 中展示了两种算法在不同色散条件下的 OSNR 性能, 其中图 5(a) 为只存在残留 CD 时的性能, 图 5(b) 为只存在 PMD 时的性能, 图 5(c) 为残留 CD 和 PMD 同时存在时的性能。图中的纵坐标为系统误符号率达到 2×10^{-3} 所需要的光信噪比 OSNR, 横坐标分别为残留 CD, PMD 引起的 DGD 和仿真所用的光纤长度。由于前面提到的光纤色散参数, 光纤长度其实代表了相应的残留 CD 和 PMD。

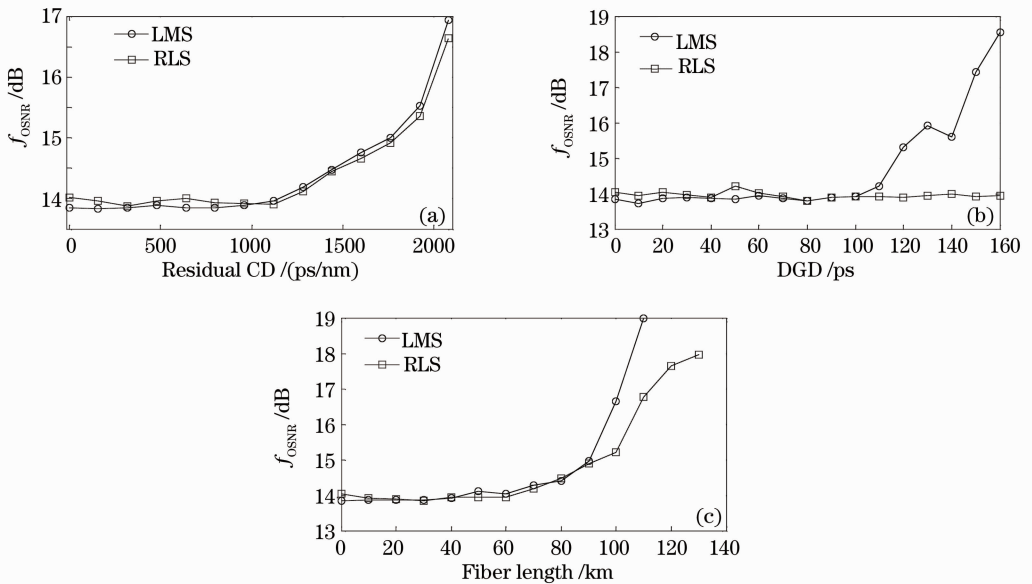


图 5 不同色散条件下的光信噪比性能。(a) CD 条件下的光信噪比性能; (b) PMD 条件下的光信噪比性能; (c) CD, PMD 同时存在时的光信噪比性能

Fig. 5 OSNR performance with different dispersion conditions. (a) OSNR performance with CD; (b) OSNR performance with PMD; (c) OSNR performance with CD and PMD

从图 5(a) 中两条曲线的趋势可以看出, 光纤长度小于 70 km, 即残留 CD 小于 1120 ps/nm 时, OSNR 性能基本没有降低。当光纤长度超过 70 km 后, 达到同样的 SER 所需的 OSNR 逐渐增大, 性能劣化。当光纤长度超过 130 km, 即残留 CD 大于 2080 ps/nm 时, OSNR 性能已经劣化了 3 dB 以上, 表明残留 CD 已经超出了 25 抽头均衡器的补偿极限。

图 5(a) 中 LMS 算法的曲线比较平滑, 残留 CD 值比较小时, 要求的 OSNR 较低, 而残留 CD 值增大时 OSNR 上升较快。残留 CD 值达到 2080 ps/nm 时, OSNR 的代价为 3.08 dB。RLS 算法的曲线起

伏稍大, 尤其残留 CD 值较小时约有 0.15 dB 的起伏, 但残留 CD 值增大时, OSNR 上升较慢, 残留 CD 值达到 2080 ps/nm 时, OSNR 的代价为 2.62 dB, 相对于 LMS 算法有 0.29 dB 的性能优势。

从图 5(b) 的两条曲线可以看出, 当 PMD 引起的 DGD 小于 100 ps 时, OSNR 性能没有明显劣化, LMS 算法的曲线比较稳定, RLS 算法的曲线起伏稍大。当 DGD 大于 100 ps 后, LMS 算法的 OSNR 性能迅速劣化, 而 RLS 算法的性能无明显劣化。DGD 达到 150 ps 时, LMS 算法的 OSNR 代价已超过 3 dB, RLS 算法基本无 OSNR 代价。总体来说蝶形结构 25 抽头的 FIR 均衡器对 PMD 的补偿效果是

非常明显的,100 ps 以内的 PMD 产生的 OSNR 代价不会超过 0.6 dB。由两条曲线对比可以看出,LMS 算法在 PMD 不太大的情况下补偿效果比 RLS 算法稍好,而 RLS 算法在 PMD 较大时能够大幅提升系统性能。

图 5(c)中两条曲线的趋势与图 5(a)中类似,光纤长度小于 90 km 时(1440 ps/nm 残留 CD+94.9 ps DGD),两种算法的均衡效果相当。光纤长度超过 90 km 后,RLS 算法的均衡效果明显好于 LMS 算法,110 km 时(1760 ps/nm 残留 CD+104.9 ps DGD)有 2.23 dB 的性能优势。此时 LMS 算法的 OSNR 代价为 5.14 dB,RLS 算法的 OSNR 代价为 2.74 dB。光纤长度超过 110 km 后,LMS 算法已不能在 OSNR 的仿真范围内达到所要求的 2×10^{-3} SER,表明残留 CD+PMD 的组合已经超出了 LMS 算法更新的 25 抽头均衡器的补偿极限。

通过比较图 5 中的 3 幅图可以发现,残留色散和偏振模色散同时存在所导致的 OSNR 代价比它们单独存在时 OSNR 代价的代数和要大,这表明两种色散机制会产生相互影响,并产生更大的系统性能劣化。

5 结 论

本文设计了 25 抽头的蝶形复数 FIR 均衡器结构,并在此结构的基础上实现了 LMS 和 RLS 自适应算法。仿真实验表明,RLS 算法的均衡效果优于 LMS 算法。它能以 2.74 dB 的 OSNR 代价同时补偿 1760 ps/nm 的残留 CD 和 104.9 ps PMD 引起的 DGD,与同等条件下的 LMS 算法相比有 2.23 dB 的性能提升。

参 考 文 献

- 1 IEEE Computer Society. IEEE Std 802.3ba-2010. IEEE Standard for Information Technology [S]. New York: IEEE LAN/MAN Standards Committee, 2010
- 2 M. Joindot, S. Gosselin. Optical fiber transport systems and networks; fundamentals and prospects [J]. *C. R. Physique*, 2008, **9**(9-10): 914~934
- 3 Ezra Ip, Alan Pak Tao Lau, D. J. F. Barros *et al.*. Coherent detection in optical fiber systems [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(2): 753~791
- 4 Chongjin Xie. Nonlinear polarization effects and mitigation in polarization-division-multiplexed coherent transmission systems [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(9): 844~851
- 5 Yong Feng, He Wen, Hanyi Zhang *et al.*. 40-Gb/s PolMux-QPSK transmission using low-voltage modulation and single-ended digital coherent detection [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(10): 976~978
- 6 G. Charlet. Coherent detection associated with digital signal processing for fiber optics communication [J]. *C. R. Physique*, 2008, **9**(9-10): 1012~1030
- 7 Lin Mi, Zhang Jinnan, Yuan Xueguang *et al.*. A novel electric equalization in 40 Gb/s Pol-Mux RZ-DQPSK transmission [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(s1): 100201
林 密, 张锦南, 袁学光等. 40 Gb/s 偏分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): 100201
- 8 Feng Yong, Wen He, Zhang Hanyi. Digital optical coherent detection of polarization-multiplexed differential phase shift keying signal and analysis of adaptive digital polarization demultiplexing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1268~1273
冯 勇, 闻 和, 张汉一. 偏振复用差分相移键控信号的数字相干解调与偏振解复用算法研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1268~1273
- 9 Y. Han, G. F. Li. Coherent optical communication using polarization multiple-input-multiple-output [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(19): 7527~7534
- 10 Jia Ye, Lianshan Yan, Anlin Yi *et al.*. An all-optical polarization monitoring scheme for polarization division multiplexed transmission [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(10): 979~982
- 11 D. Fritzsche, T. Duthel, C. G. Schaffer. Performance analysis of dispersion compensating optical FIR filters designed using a quasi-analytic synthesis approach [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(9): 2429~2432
- 12 R. Christian, W. Matthias, P. Stephan *et al.*. Equalization of first and second order PMD in 100 Gbit/s PolMux transmission using optical butterfly FIR filters [C]. Conference on Optical Fiber Communication, 2010, OTnJ3
- 13 Wang Tiecheng, Yao Xiaotian, Wan Musen *et al.*. Effect of the polarization dependent loss on the orthogonality of channels in polarization division multiplexing system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 879~883
王铁城, 姚晓天, 万木森等. 偏振相关损耗对偏振复用系统信道正交性的影响 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 879~883
- 14 T. H. Xu, G. Jacobsen, S. Popov *et al.*. Normalized LMS digital filter for chromatic dispersion equalization in 112-Gbit/s PDM-QPSK coherent optical transmission system [J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(6): 963~967
- 15 Simon Haykin. Adaptive Filter Theory (4th ed.) [M]. London: Prentice Hall, 2001

栏目编辑: 谢 婧