

偏振复用相干光纤通信系统中的自适应色散监测

蒋 林 闫连山 易安林 陈智宇 盘 艳 潘 炜 罗 斌

(西南交通大学信息光子与通信研究中心, 四川 成都 610031)

摘要 针对长距离相干光纤通信系统,提出了一种超大色散(CD)监测范围的两级自适应高精度色散估计算法。该算法利用信号功率自相关波形(ACSPW)函数作为粗估计,再使用恒模误差函数(CMA)中心值搜索,得到精确色散值。仿真结果表明,新算法色散估计误差小于 35 ps/nm,比传统 ACSPW 算法精度提高将近 4 倍;在参考误码率为 10^{-2} 时,对比传统 ACSPW 算法,提出的算法功率罚改善 8 dB。

关键词 光通信;相干光纤通信;自适应色散估计;自相关函数;恒模误差函数

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1106006

Adaptive Dispersion Monitoring for Polarization-Multiplexed Coherent Optical Communication Systems

Jiang Lin Yan Lianshan Yi Anlin Chen Zhiyu Pan Yan Pan Wei Luo Bin

(Center for Information Photonics and Communications, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract An adaptive and precise chromatic dispersion (CD) estimation algorithm with a large dispersion monitoring range is proposed based on a two-stage structure for long haul coherent optical communication systems. A coarse estimation of chromatic dispersion is obtained by employing the auto correlation of signal power waveform (ACSPW). Afterwards, a precise CD value can be estimated by using the modified constant modulus (CMA) scheme. Simulation results show that the measured error value is less than 35 ps/nm by using the proposed algorithm, and the accuracy is improved about four-times compared to the conventional ACSPW algorithm. When the reference error rate is 10^{-2} , the power penalty compared to the ACSPW algorithm is improved by 8 dB.

Key words optical communications; coherent optical communication; adaptive chromatic dispersion estimation; auto-correlation function; constant modulus algorithm

OCIS codes 060.1660; 060.4510; 060.2300; 070.2025

1 引 言

在高速、长距离光纤通信系统中,传输信号质量受到系统中的色度色散(CD)、偏振模式色散(PMD)、相位噪声(PN)以及非线性效应等诸多因素的影响。而相干解调得到的信号具有完整的相位信息和幅度信息,因此 CD、PMD、PN 和非线性等失真可以直接通过接收机后端的数字信号处理(DSP)模块进行补偿^[1-2]。

在数字相干接收机中,CD 可以在低复杂度的频域(FD)滤波器中得到补偿,也可以使用时域(TD)有限脉冲响应(FIR)滤波器进行补偿^[3-4]。目前多种色散补偿方案^[5-8]已经提出,主要分为两种:数据辅助色散补偿^[9-11]和自适应色散补偿。针对未来长距离、动态传输链路,自适应 CD 均衡技术能够更好地适应未来通信的发展需求。目前已经有多种技术被提出:1)通过训练序列来估计链路中的

收稿日期: 2014-05-25; 收到修改稿日期: 2014-07-02

基金项目: 国家杰出青年基金(61325023)、国家自然科学基金(61335005)

作者简介: 蒋 林(1990—),男,博士研究生,主要从事相干光通信与数字信号处理方面的研究。

E-mail: jianglin_0309@126.com

导师简介: 闫连山(1971—),男,教授,博士生导师,主要从事光子学与通信、光纤传感与检测等方面的研究。

E-mail: lsyan@home.swjtu.edu.cn

CD 值^[12]; 2) 利用改进的恒模误差函数(M-CMA), 通过盲搜索来计算 CD 值^[13]; 3) 利用延时抽头采样方法也可以获得链路 CD 值^[14]; 4) 利用信号功率自相关波形(ACSPW)算法^[15-18], 以及单载波信号峰均值功率比(PAPR)同样可以估计出 CD 值^[19]。但是以上方案存在一些缺点, 例如, M-CMA 误差搜索算法, 需要进行两次色散值扫描, 很大程度上增加了复杂度, 同时如果链路上的累计色散值超过算法设定值, 算法将会失效; ACSPW 算法估计的色散值精度不高, 同时对短距离、较小累积色散的链路算法失效; 单载波信号峰均值功率比只能使用于单载波系统, 对正交频分复用(OFDM)系统算法失效。

本文基于 ACSPW 以及 M-CMA 算法提出了两级自适应色散估计及补偿方案, 此方案具有灵活性、高精度性、以及超大色散监测范围的优点。该算法将 ACSPW 算法作为第一级, 得到粗 CD 值, 将其值作为下一级 M-CMA 函数的中心值, 最后得到精度较高的色散估计值。仿真结果表明, 新算法色散估计误差小于 35 ps/nm, 同时误码率保持在 10^{-3} ; 相比传统 ACSPW 算法, 色散估计精度得到很大程度的提升, 同时误码率明显下降。

2 工作原理

提出了两级自适应色散估计算法, 该算法结合了 ACSPW 算法和 M-CMA 算法的优点, 弥补了相互的不足, 使本算法总体的计算相对简单, CD 值估计精度有所提升。图 1 是该算法流程图, 第一级使用 ACSPW 算法, 利用(1)式和(2)式得到功率信号自相关结果, 式中 $\text{IFFT}(\cdot)$ 表示快速逆傅里叶变换, $\text{FFT}(\cdot)$ 表示快速傅里叶变换, $\text{conj}(\cdot)$ 表示复共轭, $R(n)$ 为自相关函数。通过监控图 2 中自相关波形峰值点, 利用(3)式换算得到链路累积色散 D_1 ^[15-16]。但是链路累积色散 D_1 存在较大误差, 例如, 比特率为 $f = 28 \text{ G}$, 信号二倍采样 $f_s = 56 \text{ G}$, $T_s = 1/f_s = 17.85 \text{ ps}$, $\tau = n * T_s$, n 为自相关函数的下标, T 为脉冲宽度, 得到的链路累积色散 D_1 的分辨率约为 80 ps/nm 。因此将该算法作为粗色散估计, 得到的链路累积色散 D_1 作为粗 CD 值 δ_{estc} 。

$$E'(n) = [E(n) - E(n+1)]^2, \quad (1)$$

$$R(n) = \text{IFFT}\{\text{conj}[\text{FFT}(E')] \cdot \text{FFT}(E')\}, \quad (2)$$

$$D_1 \approx \frac{\tau T c}{\lambda^2}. \quad (3)$$

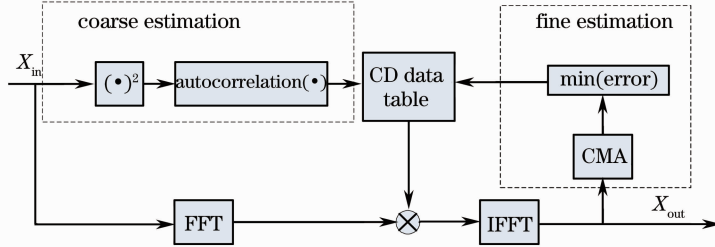


图 1 两级自适应色散估计算法流程图

Fig. 1 Flow schematic of two-stage adaptive CD estimation algorithm

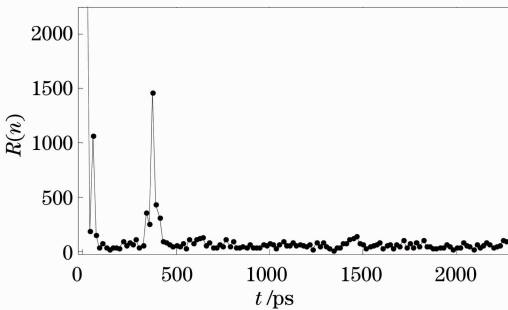


图 2 信号功率自相关波形图

Fig. 2 Autocorrelation of signal power

第二级色散精细估计使用 M-CMA 误差函数, 将 δ_{estc} 作为中心色散值, 利用(4)式和(5)式扫描 $\delta_{\text{estc}} - 200 \text{ ps/nm}$ 到 $\delta_{\text{estc}} + 200 \text{ ps/nm}$, 就可以得到精确的 CD 值 δ_{est} ^[13]。

$$\epsilon = \sum_{n=1}^N [|E(2n-1)|^2 - R_1 | + |E(2n)|^2 - R_2 |], \quad (4)$$

$$R_i = \frac{|E|}{|E|^2}, \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

式中 ϵ 表示 CMA 算法的误差代价函数; R_1 表示奇数序列复数信号的二阶半径常数, R_2 表示偶数序列复数信号的二阶半径常数。

采用重叠保留频域均衡(OFDE)进行色散补偿。色散补偿频域响应函数可表示为

$$H_{\text{CD}} = \exp\left(-jD \frac{\lambda^2 \omega^2 l}{2\pi c}\right), \quad (6)$$

式中 D 为色散因子, λ 为光纤中心波长, c 为光速, $\omega = 2\pi f$ 为调制信号角频率, l 为光纤长度^[20-21]。

3 实验和仿真验证

为了验证该算法的可行性,在 OPTSIM 仿真软件中,搭建了 112 Gb/s 的偏分复用非归零四相相移键控(PDM-NRZ-QPSK)系统,如图 3 所示。波长为 1550 nm 的连续(CW)光通过偏振分束器(BPS)分为两个相互垂直的偏振态,并且通过两个 IQ 调制器将速率为 28 Gb/s 的一段(如 $2^{15}-1$)伪随机序

列(PRBS)分别调制到两个偏振态上。然后通过偏振耦合器(BPC)将两个偏振态耦合到光纤中,得到 112 Gb/s PDM-QPSK 的信号。信号经过单模光纤(SMF)和掺铒光纤放大器(EDFA)传输后进入接收端,此时光信号通过 BPS 分为两束正交的偏振光,两束偏振光与本地振荡光(LO)分出的两束正交的偏振光,一起分别送入两个 90° 光混频器中进行

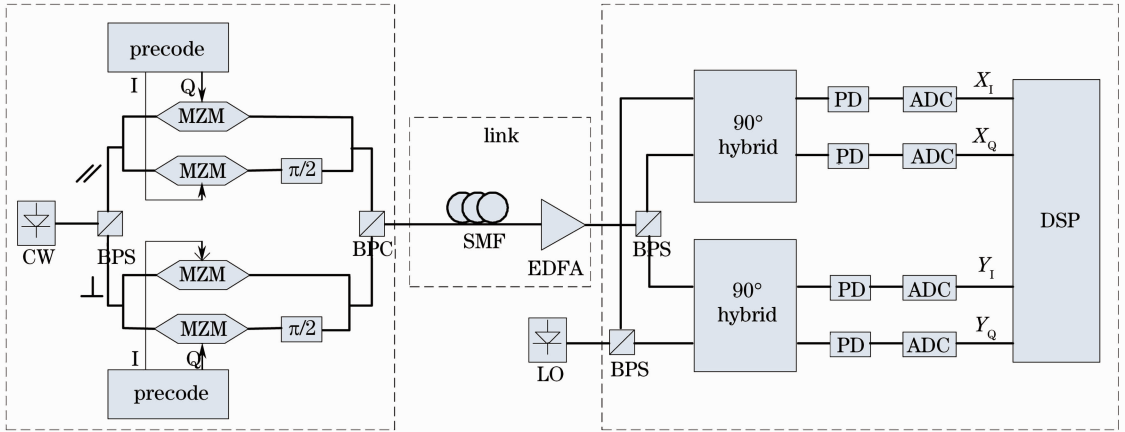


图 3 高阶信号偏振复用系统仿真模型图

Fig. 3 Simulation model of PDM system for signals with higher-order modulation

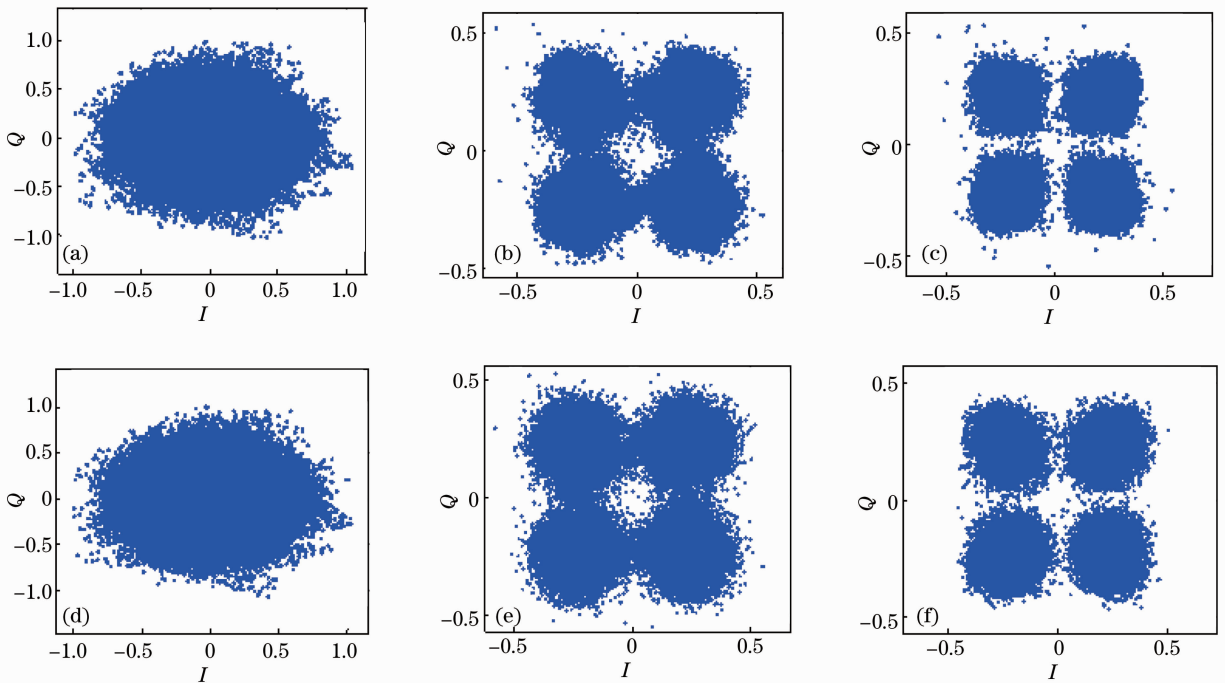


图 4 两种算法补偿前后星座图。(a) X 偏振原始信号; (b) X 偏振经过 ACSPW 算法补偿后; (c) X 偏振经过新算法补偿后; (d) Y 偏振原始信号; (e) Y 偏振经过 ACSPW 算法补偿后; (f) Y 偏振经过新算法补偿后

Fig. 4 Constellations of signals before and after compensation using two algorithms. (a) Original signal of X polarization; (b) compensated signal of X polarization using the ACSPW algorithm; (c) compensated signal of X polarization using the new algorithm; (d) original signal of Y polarization; (e) compensated signal of Y polarization using the ACSPW algorithm; (f) compensated signal of Y polarization using the new algorithm

相干检测,经过平衡光电探测器(PD)得到电信号,电信号通过模数转换器(ADC)进行二倍采样,最后送入DSP模块中,使用提出的两级自适应色散补偿算法对整个链路的累积CD值进行估计和补偿。这里光纤的色散因子、损耗以及非线性系数分别为 $16 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 、 $0.2 \text{ dB}/\text{km}$ 和 $1.267 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 。

图4为接收功率在 -0.985 dBm 条件下,ACSPW算法与新算法补偿前后的星座图。从图4(a)和(d)可以看出原始信号经过 1000 km 单模光纤后,由于色散的作用使得解调后的信号完全失真。而分别通过ACSPW算法以及本文算法处理后,可以发现色散可以有效地进行补偿。对比(b)、(c)以及(e)、(f)可以看出,新算法补偿的星座图更好,说明色散估计得更加准确,在后端使用非线性补偿等算法可以更好地得到QPSK信号。

图5为新算法与ACSPW算法在 $200\sim 3000 \text{ km}$ 单模光纤传输时,接收功率为 -0.985 dBm 条件下,测试得到的色散值估计精度对比图。图5(a)为不同

光纤长度下两种算法估计的色散值与实际值对比图,可以观测到新算法与实际值很接近,说明算法的估计精度比较高;图5(b)是新算法与ACSPW算法色散估计误差值对比图,可以发现ACSPW算法估计的误差值呈现的是锯齿状的量化误差值。这个现象可以通过(3)式解释,例如,比特率为 $f=28 \text{ G}$,信号二倍采样 $f_s=56 \text{ G}$, $T_s=1/f_s=17.85 \text{ ps}$, $\tau=n*T_s$,则 τ 的分辨率为 17.85 ps ,此时利用(3)式换算得到累积色散的分辨率约为 $80 \text{ ps}/\text{nm}$,造成色散估计值与实际值呈现锯齿型误差。由此看出此算法的色散估计精度不高,最大误差值为 $129 \text{ ps}/\text{nm}$ 。然而所提出的新算法误差值范围为 $-8 \text{ ps}/\text{nm}$ 到 $+35 \text{ ps}/\text{nm}$,较大程度上减小了误差,使色散估计值更为精确。为了更为清楚地说明补偿算法的性能,还测量了传输 1000 km 后的误码率(BER),如图6所示。在参考误码率为 10^{-2} 时,对比传统ACSPW,新算法的功率罚改善 8 dB ,这表明信号质量得到了极大的提高。

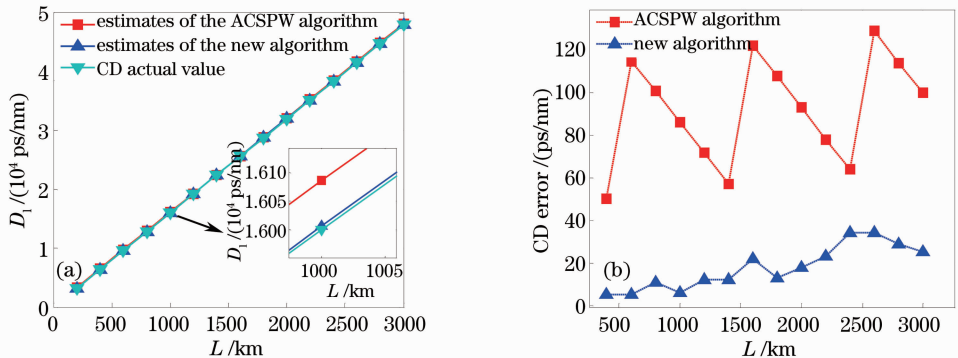


图5 PDM-NRZ-QPSK系统不同光纤长度下色散监测结果。(a)两种算法估计的色散值与实际值对比曲线;
(b)两种算法色散估计误差值对比曲线

Fig. 5 Results of CD monitoring for PDM-NRZ-QPSK system with different fiber lengths. (a) Comparison of estimated CD results using two algorithms with the real CD values; (b) comparison curves of the CD estimation errors for two algorithms

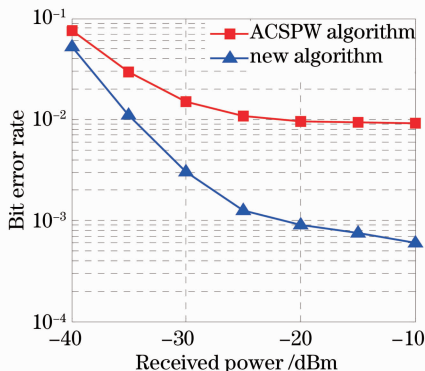


图6 两种算法误码率曲线

Fig. 6 BER curves using two algorithms

4 结 论

提出了两级自适应色散估计算法,可以很好地监测传输链路的累积色散值,仿真结果表明,新算法色散估计的误差在 $-8\sim +35 \text{ ps}/\text{nm}$,而ACSPW算法误差最大值达到 $129 \text{ ps}/\text{nm}$,在参考误码率为 10^{-2} 时,对比传统ACSPW算法,本文算法的功率罚改善 8 dB ,说明该算法色散估计的精度相比于ACSPW算法具有很大提升,与M-CMA误差搜索算法精度一样,但是复杂度比M-CMA误差搜索算法小。该方法具有算法简单、高精度、超大色散监测范围等优点,适用于长距离、动态的、链路色散未补偿的相干光纤通信系统。

参 考 文 献

- 1 M Kushnerov, F N Hauske, K Piyawanno, *et al.*. DSP for coherent single-carrier receivers [J]. *J Lightwave Technol*, 2009, 27(16): 3614–3622.
- 2 S J Savory. Digital coherent optical receivers: algorithms and subsystems [J]. *J Sel Top Quantum Electron*, 2010, 16(5): 1164–1179.
- 3 S J Savory. Digital filters for coherent optical receivers [J]. *Opt Express*, 2008, 16(2): 804–817.
- 4 S J Savory, G Gavioli, R I Killey, *et al.*. Electronic compensation of chromatic dispersion using a digital coherent receiver [J]. *Opt Express*, 2007, 15(5): 2120–2126.
- 5 Zeng Xiangye, Liu Jianfei, Zhao Qida. Study on dispersion equalizer and algorithm for polarization multiplexed fiber optics communication systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0206003.
曾祥烨, 刘剑飞, 赵启大. 偏振复用光纤通信系统色散均衡器及算法的研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0206003.
- 6 Xu Tingting, Sun Meizhi, Yang Qingwei, *et al.*. Double-line-density grisms for dispersion compensation of ultra-short laser pulses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0532002.
徐婷婷, 孙美智, 杨庆伟, 等. 基于双密度棱栅的新型超短脉冲色散补偿装置[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0532002.
- 7 Zhang Hongxia, Ren Yaguang, Ye Wenting, *et al.*. Dynamic dispersion compensation for the polarization coupling measurement system of polarization maintaining fiber [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(1): 0105001.
张红霞, 任亚光, 叶雯婷, 等. 保偏光纤偏振耦合系统的动态色散补偿[J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 0105001.
- 8 Xingyao Gu, Hongwei Chen, Minghua Chen, *et al.*. 160 km all-optical OFDM transmission system with inline chromatic dispersion compensation [J]. *Chin Opt Lett*, 2012, 10(2): 020601.
- 9 C C Do, A V Tran, C Zhu, *et al.*. Data-aided chromatic dispersion estimation for polarization multiplexed optical systems [J]. *Photonics Journal*, 2012, 4(5): 2037–2049.
- 10 X Zhou, Z Yan, X Chen, *et al.*. Simple and robust chromatic dispersion estimation for RGI-CO-OFDM systems [J]. *Photon Technol Lett, IEEE*, 2013, 25(13): 1222–1225.
- 11 A V Tran, C Zhu, C C Do, *et al.*. 840-Gb/s optical coherent pol-mux single carrier system with frequency domain equalization and training sequences [J]. *Photon Technol Lett*, 2012, 24(11): 885–887.
- 12 K Ishihara, T Kobayashi, R Kudo, *et al.*. Coherent optical transmission with frequency-domain equalization [C]. *IEEE European Conference on Optical Communication*, 2008, 2: 9–12.
- 13 M Kushnerov, F N Hauske, K Piyawanno, *et al.*. Adaptive chromatic dispersion equalization for non-dispersion managed coherent systems [C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2009, OMT; OMT1.
- 14 D Wang, C Lu, A P T Lau, *et al.*. Adaptive chromatic dispersion compensation for coherent communication systems using delay-tap sampling technique [J]. *Photon Technol Lett*, 2011, 23(14): 1016–1018.
- 15 Q Sui, A P T Lau, C Lu. Fast and robust blind chromatic dispersion estimation using auto-correlation of signal power waveform for digital coherent systems [J]. *J Lightwave Technol*, 2013, 31(2): 306–312.
- 16 S Qi, A P T Lau, C Lu. Fast and robust chromatic dispersion estimation using auto-correlation of signal power waveform for DSP based-coherent systems [C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2012, OW4G; OW4G. 3.
- 17 F C Pereira, V N Rozenal, M Camera, *et al.*. Experimental analysis of the power auto-correlation-based chromatic dispersion estimation method [J]. *Photonics Journal*, 2013, 5(4): 7901608.
- 18 Zhao Donghe, Xi Lixia, Yang Song, *et al.*. Chromatic dispersion monitoring based on auto-correlation function of signal power waveform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1206004.
赵东鹤, 席丽霞, 杨松, 等. 基于信号功率波形自相关函数的色散监测[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1206004.
- 19 C Xie. Chromatic dispersion estimation for single-carrier coherent optical communications [J]. *Photon Technol Lett*, 2013, 25(10): 992–995.
- 20 F N Hauske, C Xie, Z P Zhang, *et al.*. Frequency domain chromatic dispersion estimation [C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2010, JThA; JThA11.
- 21 G P Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. Salt Lake City: Academic Press, 2000.

栏目编辑: 王晓琰