

文章编号: 0253-2239(2007)07-1161-5

# 一种 40 Gb/s 单信道光纤通信系统中的 动态色度色散补偿\*

李 岩<sup>1</sup> 徐天华<sup>1</sup> 贾大功<sup>1</sup> 井文才<sup>1</sup> 胡 浩<sup>2</sup> 于晋龙<sup>2</sup> 张以谟<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)  
(<sup>2</sup> 天津大学电信学院光纤通信实验室, 天津 300072)

**摘要:** 提出了一种用于 40 Gb/s 单信道光纤通信系统中的动态色度色散(CD)补偿技术。采用  $2 \times 2$  光开关, 色散补偿光纤(DCF)等器件构成可调节色度色散补偿器; 提取中心频率为 12GHz 的窄带功率信号作为反馈信号控制可调节色度色散补偿器, 提取的窄带功率值随系统中的累积色度色散值的增大而减小。实验证明, 整个补偿系统的最长响应时间为 0.7 s; 补偿范围和补偿精度分别为 81.55 ps/nm 和 5.28 ps/nm, 通过增加光开关的数量和缩短每段色散补偿光纤的长度可以进一步提高补偿范围和精度。通过对比补偿前后系统的眼图可以看出: 该系统能有效地补偿 40 Gb/s 光纤通信系统中动态变化的色度色散。

**关键词:** 光纤通信; 动态色散补偿; 色散补偿光纤; 电功率检测

中图分类号: U285.16 文献标识码: A

## Dynamic Dispersion Compensation in a 40 Gb/s Single-Channeled Optical Fiber Communication System

Li Yan<sup>1</sup> Xu Tianhua<sup>1</sup> Jia Dagong<sup>1</sup> Jing Wencai<sup>1</sup> Hu Hao<sup>2</sup> Yu Jinlong<sup>2</sup> Zhang Yimo<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Key Laboratory of Opto-Electronic Science and Technology, Ministry of Education, College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)  
(<sup>2</sup> Laboratory of Fiber Communication, College of Electronics and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

**Abstract:** A dynamic chromatic dispersion (CD) compensating technique for a 40 Gb/s single-channeled optical fiber communication system is demonstrated. The tunable dispersion compensator is composed of  $2 \times 2$  optical switches, dispersion compensating fiber etc. For controlling the tunable dispersion compensator, a feedback signal is obtained by detecting the narrow band electrical power centered at 12 GHz, and the electrical power increases with the decrease of the accumulated chromatic dispersion. In experiment, the maximal response time of the system is 0.7 s. The compensating range and precision reach 81.55 ps/nm and 5.28 ps/nm respectively which can be further improved by adding the number of optical switches and reducing the length of dispersion compensating fiber. Experiments indicated that the dynamic dispersion compensating system can significantly improve the performance of 40 Gb/s optical communication systems according to the eye diagram before and after dispersion compensating.

**Key words:** optical fiber communications; dynamic dispersion compensating; dispersion compensating fiber; electrical power monitoring

## 1 引 言

随着光纤通信系统传输速度的不断提高, 色度

色散(CD)已经成为制约高速光纤通信系统发展的一个重要因素<sup>[1]</sup>, 当系统速率为 40 Gb/s 及以上时,

\* 国家自然科学基金(60577013)、国家 973 计划(2003CB314907)、新世纪优秀人才支持计划和天津大学青年教师基金资助课题。

作者简介: 李 岩(1980—), 女, 山东人, 博士研究生, 主要从事光纤通信和光电检测等方面的研究。

E-mail: thisliyan@163.com

导师简介: 张以谟(1933—), 男, 天津人, 教授, 主要从事应用光学与光学设计、光学信息处理和光互连技术等方面的研究。E-mail: ymzhang@tju.edu.cn

收稿日期: 2006-09-05; 收到修改稿日期: 2007-02-06

系统的色度色散容限值仅为 60 ps/nm 或更小<sup>[2]</sup>, 目前已存在许多固定的色散补偿方案<sup>[3~5]</sup>。但是, 动态网络配置、周围环境温度、元件的老化、光源的频率漂移等都能引起光纤通信系统中冗余色度色散值的变化<sup>[6~8]</sup>。因此, 动态可调节色度色散补偿技术已经成为 40 Gb/s 或更高速的光纤通信系统中的一项关键技术。

本文提出了一种结构简单, 低成本的动态色度色散补偿技术。该技术通过检测系统中的色度色散值作为反馈信号控制可调节色度色散补偿装置。通过检测光电探测器输出的电信号在 12 GHz 周围的窄带功率的值来实现传输线路中色度色散的实时检测。色度色散补偿装置由 2×2 光开关、色散补偿光纤(DCF)、掺铒光纤放大器等组成。

## 2 动态色度色散补偿技术的原理

原理如图 1 所示。整个系统由可调节色度色散补偿器, 色度色散检测模块和控制模块组成。控制模块根据色度色散检测模块检测到的反馈信号控制可调节色度色散补偿器的色散量, 使得色度色散补

偿器产生相应的负色散, 以补偿传输线路中的冗余色度色散。

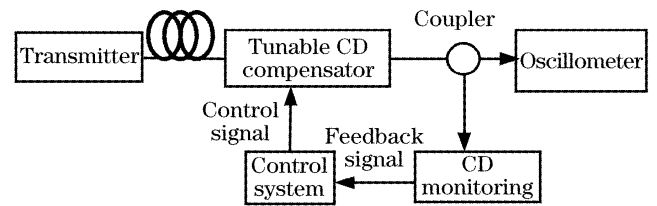


图 1 动态色度色散补偿系统的整体结构图

Fig. 1 Schematic of dynamic dispersion compensating system

可调节色度色散补偿器(TCDC)的结构如图 2 所示。色散补偿光纤通过设计波导结构来使光纤具有很高的负色散 $[-80 \sim -150 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})]$ , 在长距离的光纤传输线路中加入一小段具有很高的负色散系数的色散补偿光纤, 可以抵消普通单模光纤的正色散, 使总色散值为零<sup>[9]</sup>。图 2 中, 采用光开关将不同长度的色散补偿光纤级联起来, 通过改变光开关阵列的状态可以实现不同长度色散补偿光纤的组合, 从而实现色度色散补偿器的可调谐性。为补偿色散补偿光纤和光开关引入的损耗, 在输出端使用了输出功率稳定的掺铒光纤放大器(EDFA)。

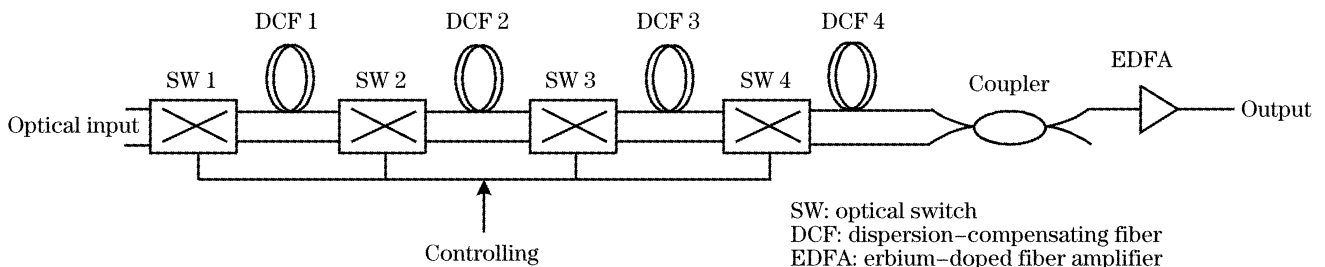


图 2 可调节色度色散补偿模块原理图

Fig. 2 Schematic diagram of tunable dispersion compensating module

补偿模块的补偿范围(FSR)和补偿精度( $\Delta R$ )与光开关的数量  $n$  和每段色散补偿光纤的长度有关。其关系满足下式:

$$\Delta R = L_{\min} \times D, \quad (1)$$

$$FSR = \Delta R \times (2^n - 1), \quad (2)$$

其中  $L_{\min}$  为最短一段色散补偿光纤的长度,  $D$  为色散补偿光纤的色散系数。从(2)式可看出, 增加光开关的数量和每段色散补偿光纤的长度可增加补偿范围, 缩短每段色散补偿光纤的长度可提高补偿精度。

限于实验室条件, 实验中的动态色度色散补偿模块采用 4 个光开关和 4 段色散补偿光纤级联, 色散补偿光纤的色散系数为  $-87.779 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ , 每段色散补偿光纤的长度及其产生的负色散值和损耗如表 1 所示。经计算可知, 实验中动态色度色散

补偿模块的补偿范围和补偿精度分别达到 81.55 ps/nm 和 5.28 ps/nm。

表 1 各段色散补偿光纤的长度及其引入的色散和损耗

Table 1 Length of dispersion compensating fiber and induced dispersion and loss

Number	Length / m	Dispersion / (ps/nm)	Loss / dB
DCF1	60.2	-5.28	-1.05
DCF2	120.5	-10.58	-1.20
DCF3	247	-21.68	1.70
DCF4	501.3	-44.01	1.75

色度色散检测模块的原理是: 通过检测传输光信号某一频率(12 GHz)周围窄带范围内的电功率值实现线路中色度色散的即时检测。色度色散导致了光脉冲在时域上的展宽, 光电探测器件将光信号转换成电信号, 转换后的电信号在时域上与线路中的光信号

形状相同,电脉冲频谱的幅度随着光脉冲包络的展宽而变窄,因而给定频率范围内的电功率值将随色度色散变化而改变,可以作为反馈控制信息<sup>[10]</sup>。

3)式描述了输入脉冲为高斯型时被测电功率与色度色散之间的关系:

$$P = \int_{\omega_e - \Delta\omega/2}^{\omega_e + \Delta\omega/2} \frac{\pi T_0^2 R^2}{4 T_1} \exp\left[-\frac{1}{T_0^4} \left(T_0^4 + \frac{\lambda^4 d^2}{4\pi^2 c^2}\right) \omega^2\right] d\omega, \quad (3)$$

其中  $\omega_e$  为被测频段的中心频率,  $\Delta\omega$  为带宽,  $R$  为光电探测器的响应度,  $T_0$  为高斯脉冲的初始脉宽,  $T_1$  为二元随机码的码元周期,  $d$  为累积色度色散值,  $c$  为光速。从式中可以看出,被测电功率随色度色散值的增大而降低。选择中心频率 12 GHz, 带宽 100 MHz 的频段作为被测频段。图 3 给出了该频段范围内电功率随色度色散变化的关系曲线,从图中看出,此时 20 dB 测量范围为 168 ps/nm。平均测量灵敏度 8.4 ps/(nm · dB), 该结果能够满足

40 Gb/s 光纤通信系统的动态色度色散补偿要求。

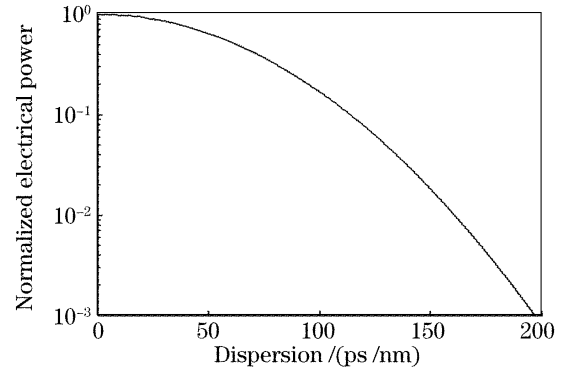


图 3 中心频率 12 GHz, 带宽 100 MHz 频段范围电功率值随色度色散变化关系曲线

Fig. 3 Dispersion versus normalized electrical power at frequency band of 11.9~12.1 GHz

### 3 实验和结果

图 4 给出了动态色度色散补偿系统的整体实验装置图。

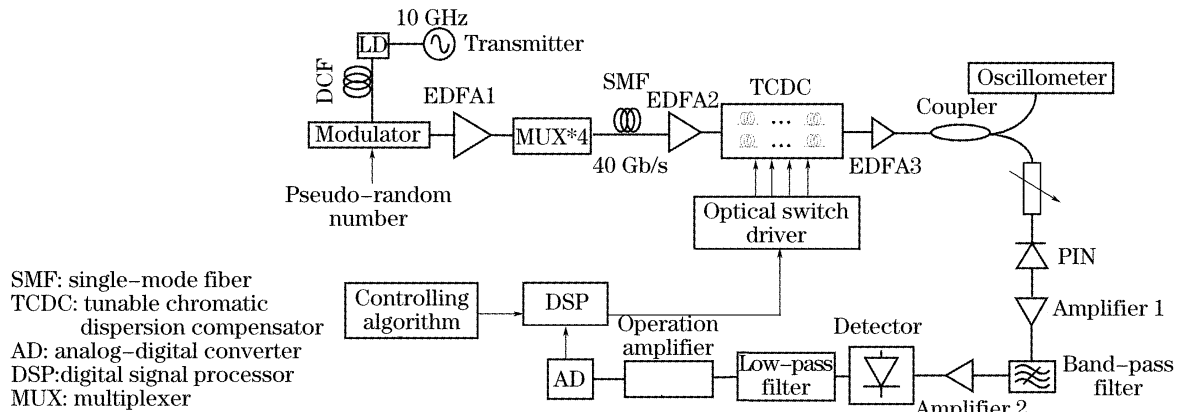


图 4 动态色度色散补偿系统的整体实验装置图

Fig. 4 Experimental setup of the dynamic dispersion compensating system

如图 4 所示,增益开关半导体激光器经 10 GHz 正弦波调制得到 10 GHz 的光脉冲序列,输出脉冲的半高全宽(FWHM)小于 12 ps,光脉冲序列经铌酸锂调制器调制产生 10 Gb/s 的归零(RZ)码伪随机序列,再经  $4 \times 10$  Gb/s 的时分复用得到 40 Gb/s 的归零码伪随机序列。普通单模光纤(SMF)用于模拟实际线路产生色度色散,通过改变单模光纤长度改变色度色散值,实验中使用的单模光纤色散系数为 17 ps/(nm · km)。

可调节色度色散补偿器接在光纤链路后,实验中用到的色散补偿光纤具有  $-87.779$  ps/(nm · km) 的负色散系数。为保证输入光电探测器的光脉冲信号具有相同的平均功率,在色度色散补偿器后接可调节衰减器和功率稳定掺铒光纤放大器(EDFA),使得色度色散检测系统与传输链路的光功率无关。

电功率检测电路由 PIN 型光电二极管,微波功率放大器,微波带通滤波器和微波功率检波器组成。PIN 型光电二极管带宽为 20 GHz, 响应度为 0.7 A/W。两个功率放大器的中心频率为 12 GHz, 带宽为 200 MHz, 增益为 30 dB。带通滤波器的中心频率为 12 GHz, 带宽为 100 MHz。功率检波器用于将功率转换成电压,其电压灵敏度为 0.8 mV/ $\mu$ W。检波器输出的低频电压信号先经过运算放大电路放大,再经模/数(A/D)转换后送入数字信号处理器(DSP)进行处理,其中的控制算法根据采集的电压信号来调整光开关的状态,使得检测到的电压值大于某个阈值,从而使得线路中色度色散值被完全补偿。

系统中使用的光开关响应时间为 10 ms。实验中,在最坏的情况下,搜索算法需要连续改变 15 次光开关的状态,数字信号处理的时钟周期为

100 MHz,所以程序运行时间在微秒量级。因此,理论上,整个系统的响应时间应该为 0.15 s。实际上,在实验中测得系统改变光开关状态一次需耗时 49 ms,这其中除了光开关的开关时间和程序运行时间还包括初次光开关状态初始化的时间,模/数转换时间,等待系统状态达到稳定的时间等。因此,实际上系统最慢的响应时间为 0.7 s。

为检验补偿系统的补偿性能,手动改变单模光纤的长度引入色散,使眼图恶化,然后等待补偿系统完

成补偿,恢复恶化的眼图。图 5(a)给出了系统连续多次补偿的反馈电压变化情况;图 5(b)给出图 5(a)中的部分细节。当系统受到色散影响时,反馈电压降低,在接下来的一段时间内,搜索控制算法启动,并在一定时间内将反馈电压提升到一个高于阈值电压的值。从图中可以看出,当反馈电压降低时,经过几次搜索过程,补偿算法能够迅速将其补偿到高于阈值电压的位置。且在整个搜索过程中线路信号并无出现明显的瞬间恶化的情况。

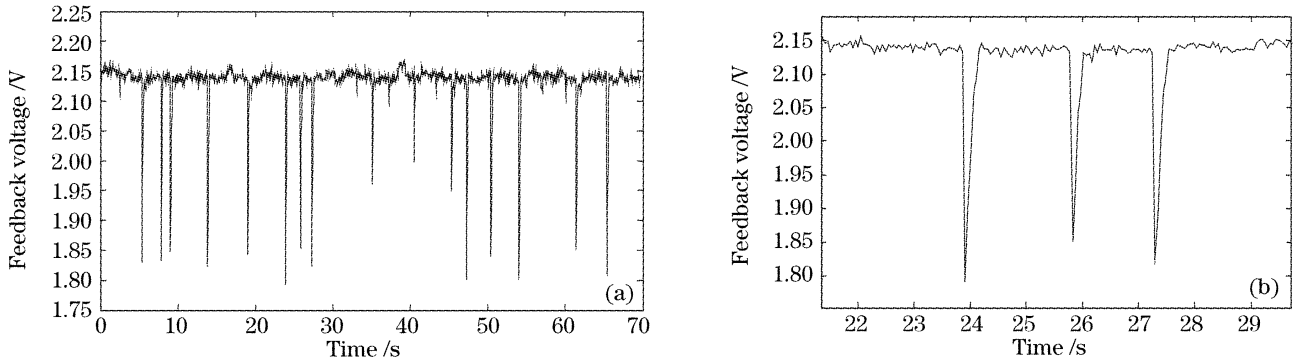


图 5 反馈电压的变化情况  
Fig. 5 Variation of feedback voltage

图 6 和图 7 给出了系统的补偿效果。图 6 给出系统在不同的初始色散影响条件下,补偿前和补偿后电功率值的变化情况,圆圈表示色度色散影响下的电功率值,星号表示补偿后的电功率值。从图 6 可看出,补偿后电功率值有明显提高。图 7 给出了补偿前后系统的眼图变化情况。图 7(a)为无色散影响的初始眼图,图 7(b)~图 7(d)分别为受 20.4 ps/nm,30.6 ps/nm 和 44.2 ps/nm 色散影响的眼图形状,图 7(e)~图 7(g)分别为相应的补偿后的眼图形状。从图中明显可以看出,采用色度色散补偿系统,能够将严重恶化的光脉冲恢复原貌,补偿效果明显。

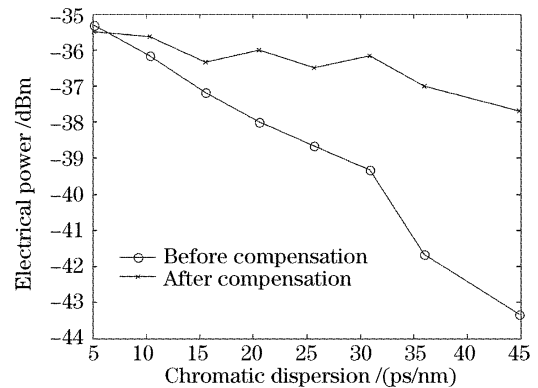


图 6 色度色散补偿前后电功率值的变化情况  
Fig. 6 Electrical power before and after chromatic dispersion compensating

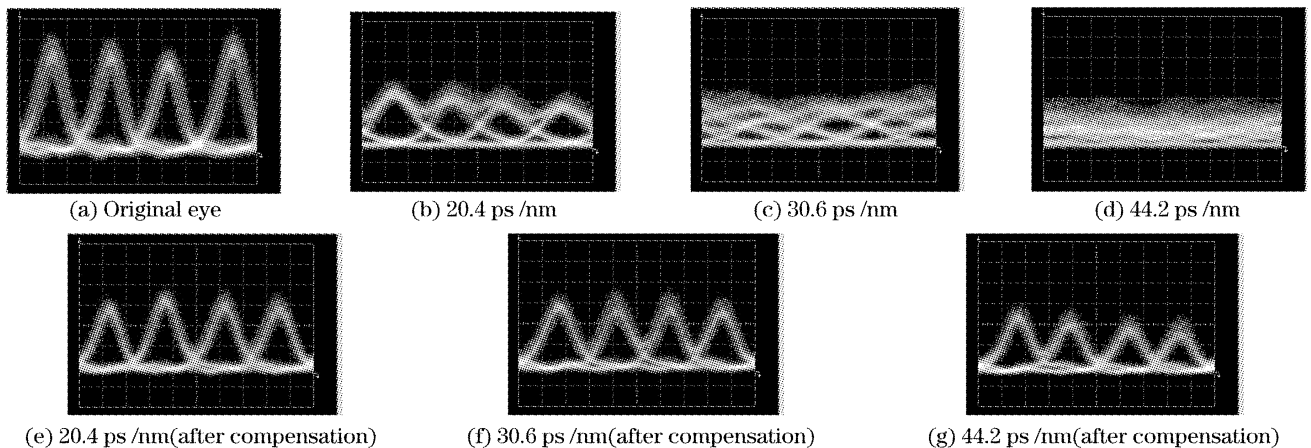


图 7 眼图补偿效果

Fig. 7 Eye diagrams before and after dispersion compensating

## 4 结 论

完成了补偿系统实验。系统的补偿范围和补偿精度分别为 81.55 ps/nm 和 5.28 ps/nm。记录了反馈电压随时间变化情况,结果证明,当反馈电压降低时,补偿系统能在短时间内(小于 0.7 s)将其补偿到高于一定的阈值。通过比较补偿前后电功率和眼图的变化情况可以看出:该动态色度色散补偿系统能够有效地提高 40 Gb/s 光纤通信系统的性能。

### 参 考 文 献

- 1 Xiangfei Chen, Ximing Xu, Mingyuan Zhou *et al.*. Tunable dispersion compensation in a 10 Gb/s optical transmission system by employing a novel tunable dispersion compensator[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(1): 188~190
- 2 Qian Yu, Zhongqi Pan, Lian-Shan Yan *et al.*. Chromatic dispersion monitoring technique using sideband optical filtering and clock phase-shift detection[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(12): 2267~2271
- 3 Pei Li, Jian Shuisheng, Yan Fengping *et al.*. The dispersion compensation of optical fiber Bragg grating on the long-distance G. 652 fiber transmission system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 220~224 (in Chinese)
- 裴 丽,简水生,延凤平等. 普通单模光纤传输系统的光纤光栅色散补偿研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 220~224
- 4 Bu Yang, Wang Xiangzhao. Compensation for dispersion by higher-order dispersion management in fiber communication system with midway optical phase conjugation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11): 1525~1529 (in Chinese)
- 步 扬,王向朝. 基于高阶色散管理和相位共轭技术的色散补偿[J]. *光学学报*, 2004, **24**(11): 1525~1529
- 5 Ning Tigang, Jian Wei, Pei Li *et al.*. Study on dispersion compensation of 40 Gb/s optical time division multiplexing transmission over G. 652 fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1091~1094 (in Chinese)
- 宁提纲,简 伟,裴 丽等. 40 Gb/s 光时分复用传输光纤光栅补偿色散研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1091~1094
- 6 A. E. Willner. Tunability and monitoring of chromatic dispersion and PMD in optical networks[C]. *LEOS*, 2002, **1**(10~14): 201~202
- 7 Willner A. E.. Monitoring issues of chromatic and polarization-mode dispersion in optical networks[C]. *LEOS*, 2002, **TuJ1**: 27~28
- 8 N. Litchinitser, Y. Li, M. Sumetsky *et al.*. Tunable dispersion compensation devices: group delay ripple and system performance [C]. *OFC 2003*, **TuD2**: 163~164
- 9 Ashish M. Vengsarkar. Dispersion compensating fibers[C]. *OFC 1997*, **ThA2**: 233~234
- 10 Yan Li, Jin Zhang, Jinlong Yu *et al.*. Theoretical analysis and experimental verification of a cost-effective chromatic dispersion monitoring method in a 40-Gb/s optical fiber communication system[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(10): 573~576