

保偏光纤偏振耦合系统的动态色散补偿

张红霞 任亚光 叶雯婷 陈信伟 贾大功 刘铁根 张以谟

(天津大学精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 在白光保偏光纤(PMF)偏振耦合系统中, 光纤双折射色散会引起干涉条纹包络随着光纤长度展宽, 从而导致空间分辨率降低, 光纤测量范围变小。为了减小双折射色散的影响, 提出一种基于频域变换的色散相位补偿方法, 通过干涉主极大包络与耦合点包络的宽度比求得相位补偿因子, 并与非线性色散相位谱相乘, 通过傅里叶逆变换得到色散补偿信号。实验分别对 400 m 和 1000 m PMF 进行了测试, 得到光纤双折射色散系数为 0.0116×10^{-9} ps/(nm·km), 将测试系统对 PMF 1000 m 处耦合点的空间分辨率由 62.85 cm 提高到 6.03 cm, 实现了对长距离 PMF 偏振耦合系统的动态色散补偿。

关键词 相干光学; 色散相位补偿; 保偏光纤; 频域变换; 双折射色散

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0105001

Dynamic Dispersion Compensation for the Polarization Coupling Measurement System of Polarization Maintaining Fiber

Zhang Hongxia Ren Yaguang Ye Wenting Chen Xinwei Jia Dagong
Liu Tiegen Zhang Yimo

(Key Laboratory of Optoelectronics Information Technology, Ministry of Education, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract In the polarization coupling measurement system using white light interferometry (WLI), birefringent dispersion would broaden the envelope of the interference pattern along the polarization maintaining fiber (PMF), which leads to a noticeable decline of the spatial resolution and the available measurement ranges of the system. To reduce the influence of birefringent dispersion, a new method is proposed for compensating the dispersion phase in frequency domain. By multiplying the dispersed spectral phase and the compensating phase, which is extracted by dividing the width of the principal maximum, we can obtain the non-dispersed signals with inverse Fourier transform. In the experiment, 400 m and 1000 m long fiber was tested respectively, and the birefringent dispersion coefficient of the fiber was obtained as 0.0116×10^{-9} ps/(nm·km). The spatial resolution of the coupling point at 1000 m PMF was improved from 62.85 cm to 6.03 cm. This makes the fast and real-time compensation of any dispersion in long distance fiber be possible.

Key words coherence optics; dispersed phase compensation; polarization maintaining fiber; frequency domain transform; birefringent dispersion

OCIS codes 030.1640; 100.5070; 060.2420; 070.2615; 060.2270

1 引言

保偏光纤(PMF)受到外力、磁场、弯曲、扭转等因素的扰动时会发生偏振耦合现象, 通过对 PMF 偏振耦合的测量可实现扰动物理量的传感。白光

PMF 偏振耦合系统由于其高空间分辨率和宽动态范围而被广泛应用于应力、应变、温度、气体和位置传感^[1~3]。但是, PMF 两特征轴的传播常数不同且与波长有关, 当使用宽带光源进行长距离 PMF 传

收稿日期: 2011-08-17; **收到修改稿日期**: 2011-10-14

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327806)、天津市科技支撑重点项目(11ZCKFSF00400)和天津市自然科学基金(09JCYBJC01300)资助课题。

作者简介: 张红霞(1977—), 女, 副教授, 主要从事白光干涉、光纤传感和光学设计等方面的研究。

E-mail: hxzhang@tju.edu.cn

感时,光纤双折射色散导致的干涉条纹包络展宽将严重影响系统的测试精度^[4~6]。故在白光 PMF 偏振耦合系统中,对光纤双折射色散的补偿成为提高系统长距离测试精度的关键技术之一。

目前,对色散的补偿多集中在光纤通信领域,此外,在光学相干层析法测量中也很多见。对色散的补偿多是采用平衡色散介质^[7]、电学相位调制^[8]、数值色散补偿等方法^[9],这些补偿技术主要是在样品臂或是参考臂中引入一定的额外色散值以减小干涉两臂的色散差,对于具有固定色散值的介质可实现简单、准确、快速的色散补偿。白光干涉(WLI) PMF 偏振耦合系统中,耦合点干涉包络随着光纤长度而展宽,从而造成空间分辨率下降,引起耦合点误判,光纤测量范围变小,所以对于长距离 PMF 偏振耦合系统需要进行色散补偿。由于耦合点在 PMF 中的分布位置不同,因此每个耦合点受双折射色散的影响都不一样,所以不能采用固定的色散值进行补偿,需要进行长距离 PMF 任意色散值精确、快速、实时的动态补偿。

本文从理论上分析了偏振耦合测试系统双折射色散的产生机理,提出了一种基于傅里叶变换的色散相位补偿方法,并对 400 m 和 1000 m 光纤进行了测试与色散补偿。结果表明,该方法可大大减小光纤双折射色散给测量带来的影响,使 PMF 在进行长距离传感时仍具有较高的测试精度。

2 色散补偿原理

在白光 PMF 偏振耦合系统中,PMF 在受到外界扰动时会发生偏振耦合,沿光纤某一偏振特征轴传播的激发模的部分光会串扰至另一个正交的特征轴上形成耦合模,在光纤出射端,检偏器将两束垂直的偏振光投影到同一偏振方向,然后由迈克耳孙干涉仪平衡 PMF 偏振模色散引起的激发模与耦合模间的光程差,使之发生干涉,系统原理如图 1 所示。其中 SLD 为超级发光二极管,SM 为步进电机,

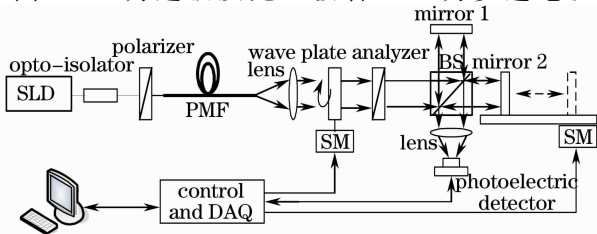


图 1 WLI 偏振耦合测试

Fig. 1 Measurement of polarization coupling using white light interferometry

DAQ 为数据采集,BS 为分束器。

设一束线偏光沿 PMF 快轴 x 轴入射,当光纤的某点受到扰动时,将一部分光耦合到光纤的慢轴 y 轴形成耦合模,在光纤的出射端经 45° 方向放置的检偏器,由迈克耳孙干涉仪补偿光程差后发生干涉。设两光波场分别为 $E_x(t)$ 和 $E_y(t)$,用傅里叶变换形式可表示为

$$E_x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} E(\omega) \exp\{i[\omega t + \beta_x(\omega)L]\} d\omega, \quad (1)$$

$$E_y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} E(\omega) \exp\{i[\omega t + \beta_y(\omega)L]\} d\omega, \quad (2)$$

式中 ω 为光波频率, $\beta_x(\omega)$, $\beta_y(\omega)$ 为光纤快慢轴的传播常数。当迈克耳孙干涉仪两臂的光程差为零时,激发模与激发模干涉,耦合模与耦合模干涉,形成不存在色散的干涉主极大,由于耦合模与耦合模干涉值很小,可忽略不计,故探测器探测的干涉光强为^[10]

$$I_{\text{main}}(\tau) \propto \langle E_x(t) \cdot E_x^*(t + \tau) \rangle = \left\langle \int_{-\infty}^{+\infty} E(\omega') \exp(i\omega't) d\omega' \int_{-\infty}^{+\infty} E(\omega) \exp[-i[\omega(t + \tau)]] d\omega \right\rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} |E(\omega)|^2 \exp(-i\omega\tau) d\omega = F_T\{S(\omega)\}, \quad (3)$$

式中 $S(\omega)$ 为光源的光谱分布, τ 为共轭函数的时间延迟, F_T 表示傅里叶变换。采用低相干的白光光源时,PMF 中快慢轴的传输常数差 $\Delta\beta(\omega)$ 是与波长有关的,将其展开成泰勒级数形式:

$$\Delta\beta(\omega) = \frac{\omega_0}{c} \Delta n_b + \frac{(\omega - \omega_0)}{c} \Delta N_b + \pi c \frac{(\omega - \omega_0)^2}{\omega_0^2} \Delta D + \dots, \quad (4)$$

式中 ω_0 为中心频率, Δn_b 为相位双折射, ΔN_b 为群双折射, $\Delta D = -\frac{\omega^2}{2\pi c} \cdot \frac{d\Delta\beta}{d\omega^2}$ 为光纤双折射色散系数。

由于在连续光谱光源情况下, $\Delta\beta(\omega)$ 泰勒展开式第三项后的高阶色散项相对于二阶色散项而言小得多,可忽略不计,故 $\Delta\Phi(\omega)$ 可记为

$$\Delta\Phi(\omega) \approx \left[\frac{\omega_0}{c} \Delta n_b + \frac{(\omega - \omega_0)}{c} \Delta N_b + \pi c \frac{(\omega - \omega_0)^2}{\omega_0^2} \Delta D \right] L, \quad (5)$$

式中 L 是耦合点距光纤出射端距离。此时探测器探测的干涉光强为

$$\begin{aligned}
 I_{\text{coupling}}(\tau) &\propto \langle E_x(t) \cdot E_y^*(t+\tau) \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} E(\omega') \exp\{i[\omega't + \Phi_x(\omega')]\} d\omega' \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} E^*(\omega) \times \\
 &\exp\{-i[\omega(t+\tau) + \Phi_y(\omega)]\} d\omega = \int_{-\infty}^{+\infty} d\omega \int_{-\infty}^{+\infty} \langle E(\omega') \cdot E^*(\omega) \rangle \exp\{-i[(\omega - \omega')t + \omega\tau]\} \times \\
 &\exp\{i[\Phi_x(\omega') - \Phi_y(\omega)]\} d\omega' = \int_{-\infty}^{+\infty} |E(\omega)|^2 \exp[i\Delta\Phi(\omega)] \exp(-i\omega\tau) d\omega = F_T\{S(\omega) \exp[i\Delta\Phi(\omega)]\}. \quad (6)
 \end{aligned}$$

由(3),(6)式可知存在双折射色散时的干涉信号等于不存在双折射色散时光源的光谱分布乘以色散相位因子 $\exp[i\Delta\Phi(\omega)]$ 的傅里叶变换。故可对色散信号 $I_{\text{Coupling}}(\tau)$ 做如下处理即可得到色散补偿后的信号

$$\begin{aligned}
 I_{\text{comp}}(\tau) &= F_T\{F_T^{-1}[I_{\text{coupling}}(\tau)] \exp[i\Delta\Phi_{\text{comp}}(\omega)]\} = \\
 &F_T\{\{S(\omega) \exp[i\Delta\Phi(\omega)]\} \exp[i\Delta\Phi_{\text{comp}}(\omega)]\} = F_T\{S(\omega)\}, \quad (7)
 \end{aligned}$$

式中 $\exp[i\Delta\Phi_{\text{comp}}(\omega)]$ 为色散补偿相位因子， $\Delta\Phi_{\text{comp}}(\omega) = -\Delta\Phi(\omega)$ 。

在白光 PMF 偏振耦合系统中，当迈克耳孙干涉仪平衡了激发模与耦合模间的光程差，使之发生干涉时，由于两模间存在双折射色散，干涉包络 $1/e$ 处宽度将以 $k = \sqrt{1 + (2\pi c \cdot \Delta D \cdot (\Delta\lambda/\lambda_0)^2 L)^2}$ 速率展宽^[11]，其中 λ_0 是光源的中心波长， $\Delta\lambda$ 是光源谱宽。因此，通过包络拟合分别得到耦合点和干涉主极大 $1/e$ 处包络宽度，并求得二者之比 k ，由 $k = \sqrt{1 + (2\pi c \cdot \Delta D \cdot (\Delta\lambda/\lambda_0)^2 L)^2}$ 即可得到 PMF 的双折射色散系数 $\Delta D = \frac{\sqrt{k^2 - 1}}{2\pi c (\Delta\lambda/\lambda_0)^2 L}$ ，回代入(7)式即可对白光 PMF 偏振耦合系统进行色散补偿，具体补偿算法如图 2 所示。

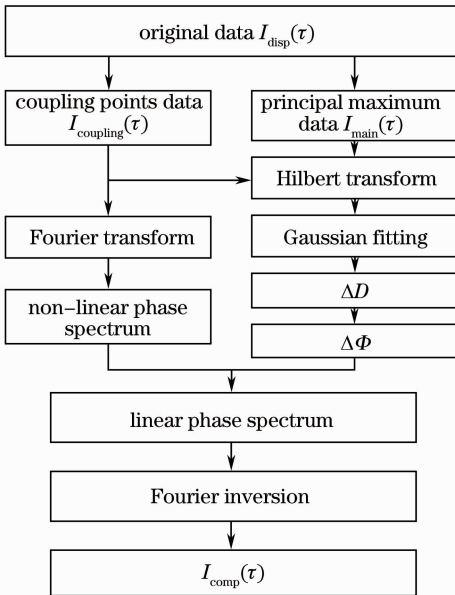


图 2 色散补偿算法流程图

Fig. 2 Flow chart of dispersive compensation algorithm

通过对偏振耦合系统原始干涉信号 $I_{\text{disp}}(\tau)$ 加窗截断得到干涉主极大 $I_{\text{main}}(\tau)$ 和耦合点数据 $I_{\text{coupling}}(\tau)$ ，对其希尔伯特变换和高斯拟合，得到干涉包络，并由二者干涉包络在 $1/e$ 处宽度的比值得到 PMF 的双折射色散系数 ΔD ，求得色散补偿所需的相位因子，然后将其与带有色散信息的谱函数相乘，消去引起干涉包络展宽的非线性相位项，最后再进行傅里叶逆变换即可得到补偿后的干涉信号 $I_{\text{comp}}(\tau)$ 。

3 实验与分析

实验采用中心波长为 1315 nm，谱宽为 30.08 nm 的高斯型 SLD 光源，光谱分布为 $S(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\Delta\omega} \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2 \cdot \Delta\omega^2}\right]$ ，记干涉包络在 $1/e$ 处的宽度为相干长度^[12]，

$$L_c = \frac{\sqrt{2} \lambda^2}{\pi \Delta\lambda}. \quad (8)$$

则系统对耦合点的空间分辨率为

$$L_b = \frac{L_c \cdot L_B}{\lambda_0}, \quad (9)$$

式中 L_B 为光纤拍长。对拍长为 2.6 mm 的 400 m 熊猫 PMF 进行了多次测量，采用如图 2 所示的算法对采集的数据进行处理。用窗函数分别截取了干涉主极大数据 I_{main} 与 400 m 处耦合点的干涉数据 I_{coupling} ，并通过包络拟合得到其相干长度，分别用 L_{cM} 和 L_{cC} 表示。实验测量结果如表 1 所示。

由多次测量结果可以得到光纤的双折射色散系数 $\Delta D = 0.0116 \times 10^{-9}$ ps/(nm·km)，将其代入色散相位补偿因子中即可对任意位置处耦合点的色散进行补偿。

表 1 400 m PMF 测试数据
Table 1 Measuring data of 400 m PMF

| $L_{cc}/\mu\text{m}$ | $L_{cm}/\mu\text{m}$ | k | $\Delta D / (10^{-9} \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1})$ | $\overline{\Delta D}$ |
|----------------------|----------------------|-------|---|-----------------------|
| 1 | 119.20 | 25.68 | 4.64 | 0.0115 |
| 2 | 118.51 | 25.63 | 4.63 | 0.0114 |
| 3 | 122.01 | 25.80 | 4.73 | 0.0117 |
| 4 | 122.69 | 26.10 | 4.70 | 0.0116 |
| 5 | 122.00 | 25.80 | 4.73 | 0.0117 |
| 6 | 126.21 | 26.33 | 4.79 | 0.0118 |

图 3 为 400 m PMF 色散补偿的仿真和实验数据

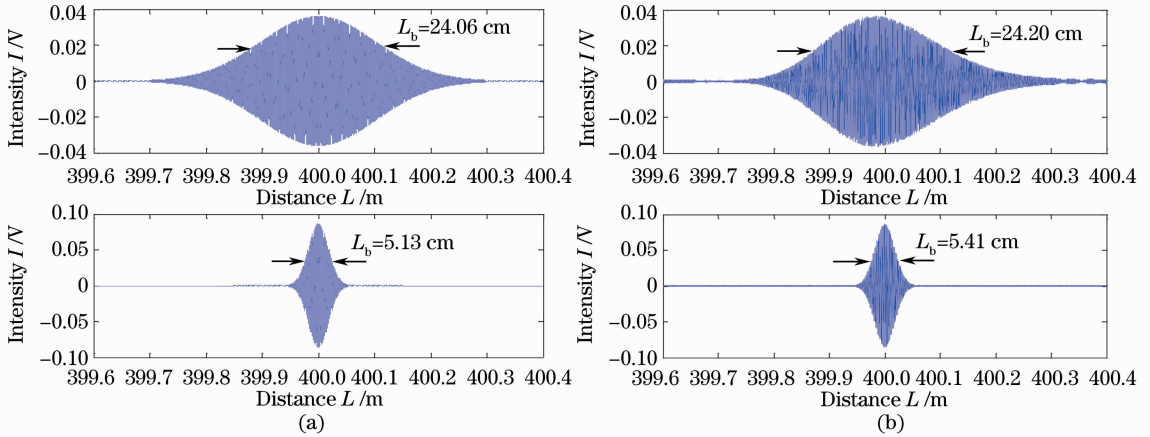


图 3 400 m PMF 数据。(a)未补偿和补偿后的 Matlab 模拟结果;(b)未补偿和补偿后的实验结果

Fig.3 Data of 400 m PMF. (a) Without and with compensation relusts simulated by Matlab; (b) without and with compensation experimental relusts

图 4 为 1000 m 熊猫 PMF 的实验数据。从图 4(a)中可知,未补偿的 1000 m 处耦合点干涉包络已严重展宽,相干长度为 316.60 μm ,对其进行色

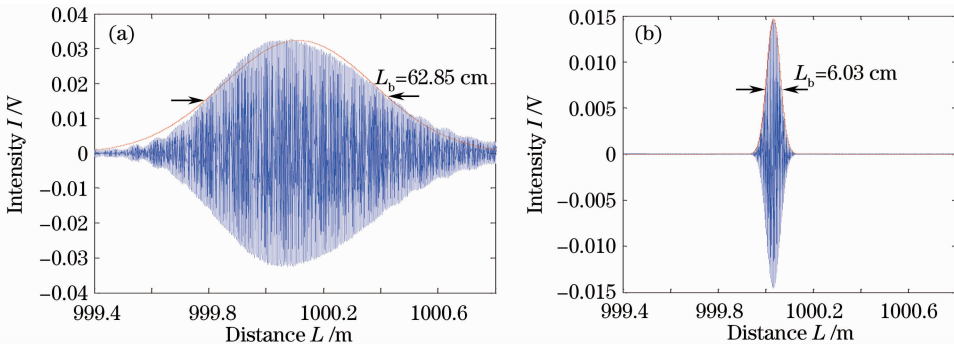


图 4 1000 m 处耦合点测试数据。(a)未补偿;(b)补偿后

Fig.4 Measuring data of coupling point at 1000 m. (a) Without compensation; (b) with compensation

随着光纤长度的增加,干涉包络展宽越来越严重,系统分辨率越来越差,当长光纤中存在两个近距离耦合点时,由于双折射色散导致的包络展宽效应将使两个耦合点的干涉包络叠加,以至于分辨不开而对耦合点造成误判。图 5 是对 400 m PMF 中两近距离耦合点的实验数据。实验中,在距光纤末端

据。图 3(a)为由 Matlab 模拟的 $\Delta D = 0.0116 \times 10^{-9} \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 和 $\Delta D = 0$ 时,PMF 400 m 处耦合点的干涉图,空间分辨率分别为 24.06 cm 和 5.13 cm。在图 3(b)中,上图为实验采集的 400 m 处耦合点数据,色散补偿前干涉包络较宽,并且由于色散引入的相移,干涉包络中心位置发生微移^[13],空间分辨率为 24.20 cm,色散补偿后,干涉包络明显变窄,中心位置又回到 400 m 处,如图 3(b)中的下图所示,系统的空间分辨率提高到 5.41 cm,与理论分辨率的绝对误差为 0.28 cm。

散补偿,补偿后为 30.40 μm ,如图 4(b)所示,干涉包络明显变窄。色散补偿后,系统对 1000 m 处耦合点的空间分辨率由 62.85 cm 提高到 6.03 cm。

10 cm 处施加一外力,400 m 处耦合点理论空间分辨率为 24.13 cm 可知,此力致耦合点将与 400 m 末端耦合点的干涉包络交叠而难以区分此处耦合点的个数,如图 5(a)所示。而对其进行色散补偿后,两耦合点干涉包络分开[见图 5(b)],可以清楚地判别在光纤末端存在两个距离为 10 cm 的耦合点。

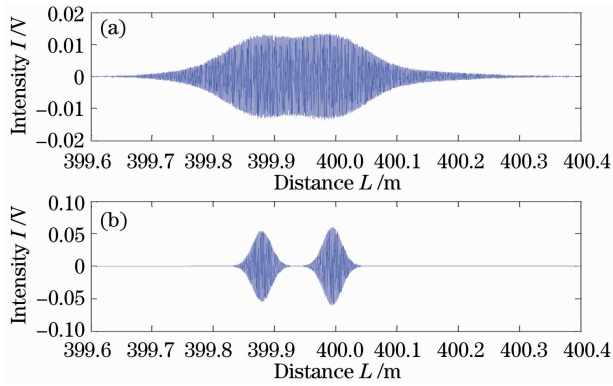


图 5 400 m 处两个近距离耦合点。(a)未补偿；
(b)补偿后

Fig. 5 Two close coupling points at 400 m. (a) Without compensation; (b) with compensation

4 结 论

从理论上分析了 PMF 偏振耦合测试系统的色散产生机理,随着光纤长度的增加,双折射色散导致的干涉包络展宽变得严重,以致于不能准确分辨耦合点以及耦合点的个数。从频域出发,通过对色散数据补偿色散相位因子,实现了长距离 PMF 任意位置耦合点的色散补偿,使偏振耦合测试系统在 1000 m 处的空间分辨率由 62.85 cm 提高到 6.03 cm,并能准确分辨光纤中存在的近距离耦合点。

参 考 文 献

- 1 Denis Donlagic, Miran Lesic. All-fiber quasi-distributed polarimetric temperature sensor [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(22): 10245~10254
- 2 Gabriela Statkiewicz, Tadeusz Martynkien, Waclaw Urbanczyk. Measurements of modal birefringence and polarimetric sensitivity of the birefringent holey fiber to hydrostatic pressure and strain [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **241**(4~6): 339~348
- 3 Serge Caron, Claude Pare, Patrick Paradis *et al.*. Distributed fiber optics polarimetric chemical sensor [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2006, **17**(5): 1075~1081

- 4 A. F. Fercher, C. K. Hitzenberger, M. Sticker *et al.*. A new dispersion compensation technique for partial coherence interferometry (PCI) and optical coherence tomography[J]. *Opt. Express*, 2001, **9**(12): 12~19
- 5 N. Shibata, A. Nakazono, Y. Inoue. Interference between two orthogonally polarized modes traversing a highly birefringent air-silica microstructure fiber[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(3): 1244~1252
- 6 Meng Zhuo, Liang Yu, Yao Xiaotian *et al.*. In-line measurement and compensation for dispersion in OCT system [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2011, **22**(2): 256~260
- 孟卓, 梁雨, 姚晓天等. 光学相干层析系统色散的在线测量及补偿[J]. *光电子·激光*, 2011, **22**(2): 256~260
- 7 Gui Lü, Huang Zhaoxiang, Li Liangchuan. A study on electronic dispersion compensation technology for 2.5 Gb/s optical communication system[J]. *Optical Communication Technology*, 2007, **31**(6): 33~35
- 归律, 黄照相, 李良川. 2.5 Gb/s 光纤通信系统的电色散补偿技术研究[J]. *光通信技术*, 2007, **31**(6): 33~35
- 8 Li Yan, Xu Tianhua, Jia Dagong *et al.*. Dynamic dispersion compensation in a 40 Gb/s single channeled optical fiber communication system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1161~1165
- 李岩, 徐天华, 贾大功等. 一种 40 Gb/s 单信道光纤通信系统中的动态色度色散补偿[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1161~1165
- 9 Chen Xinwei, Zhang Hongxia, Jia Dagong *et al.*. Numerical dispersion compensation for polarization-mode coupling distributed fiber sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3159~3163
- 陈信伟, 张红霞, 贾大功等. 偏振模耦合分布式光纤传感器的数值色散补偿[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3159~3163
- 10 A. F. Fercher, C. K. Hitzenberger, M. Sticker *et al.*. Numerical dispersion compensation for partial coherence interferometry and optical coherence tomography [J]. *Opt. Express*, 2001, **9**(12): 610~615
- 11 Chen Xinwei, Zhang Hongxia, Jia Dagong *et al.*. Implementation of distributed polarization maintaining fiber polarization coupling pressure sensing system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1467~1472
- 陈信伟, 张红霞, 贾大功等. 分布式保偏光纤偏振耦合应力传感系统的实现[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1467~1472
- 12 Zhou Xiaojun, Gong Junjie, Liu Yongzhi *et al.*. Analysis of white light interference distributed optical fiber sensor by polarized modes coupling[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 605~608
- 周晓军, 龚俊杰, 刘永智等. 白光干涉偏振模耦合分布式光纤传感器分析[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5): 605~608
- 13 Pavel Pavlicek, Jan Soubusta. Measurement of the influence of dispersion on white-light interferometry[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(4): 766~770

栏目编辑:李文喆