

# 干涉型光纤传感系统偏振切换技术原理及实验研究

刘悦 蒋鹏 马丽娜 唐凯 胡正良

国防科学技术大学海洋科学与工程研究院, 湖南长沙 410073

**摘要** 研究了4路偏振切换技术在光纤干涉仪中的应用,建立了基于4路偏振切换的抗偏振衰落的理论模型,运用了复数运算的方法解决4路信号的合成问题,对偏振诱导信号衰落的抑制效果进行了仿真。偏振衰落实验搭建了基于非平衡的迈克尔孙干涉仪的实验系统,采用相位产生载波技术(PGC)外调制方案解调信号,对4路偏振切换技术抗偏振衰落效果进行了实验测试。结果表明,4路干涉信号合成后,可以消除传输光纤双折射的影响,合成干涉信号的解调结果与单路解调结果一致;合成干涉信号的等效干涉度可以稳定在0.838,验证了偏振切换技术抗偏振衰落的有效性。

**关键词** 光纤光学;偏振衰落;偏振切换;相位产生载波技术调制

**中图分类号** O436 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP52.120606

## Experimental Research on Fiber Optical Sensing System Based on Interferometer with Polarization Switching

Liu Yue Jiang Peng Ma Lina Tang Kai Hu Zhengliang

Academy of Ocean Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

**Abstract** The basic principle of polarization switching to eliminate polarization-induced fading in fiber optic interferometers is studied. A theoretical model is constructed and the complex method of complex is introduced to solve the problem that four signals compose one signal. Theoretical analysis and simulation show that polarization switching can eliminate polarization-induced fading. An experimental system based on non-balanced Michelson interferometer is built. Using phase generation carrier (PGC) modulation technology to demodulate signal, the anti-polarization effect of the four-way polarization switching is tested by experiment. The results show that the birefringent effect of the lead fiber can be eliminated after the signal is composed. After four signals compose one signal in the experiment, its visibility can be a stable level of 0.838. The result keeps with the visibility of Michelson interferometer under ideal condition, which proves the feasibility of polarization switching in elimination of polarization-induced fading.

**Key words** optical fiber; polarization-induced fading; polarization switching; phase generation carrier modulation

**OCIS codes** 060.2370; 060.2420; 140.3510

## 1 引言

干涉型光纤传感器<sup>[1]</sup>利用相干检测的方法进行信号探测,具有灵敏度高和易于复用的特点,被广泛应用于水下目标探测、石油勘探、地震波检测等领域。在普通单模光纤中,传输光的偏振态会受到外界环境的影响而出现偏振诱导信号衰落的现象,从而影响系统的性能。偏振衰落的抑制技术是干涉型传感器走向应用的关键技术之一。

目前,解决抗偏振衰落问题的方法主要有光路全保偏技术<sup>[2]</sup>、偏振分集接收技术<sup>[3-5]</sup>、输入偏振态控制技术<sup>[6]</sup>、扰偏法<sup>[7]</sup>、法拉第旋镜法<sup>[8]</sup>、偏振切换技术<sup>[9]</sup>等。其中,偏振切换技术对光纤干涉仪的结构和光纤类型无特殊要求,且无需增加探测器,因此具有系统成本低、适用范围广等优势。文献[9]介绍了基于2路偏振切换的技术方案,通过选择相干度最高的一路进行信号解调,保证了系统始终不会处于完全偏振衰落状态,但这

收稿日期: 2015-06-24; 收到修改稿日期: 2015-07-11; 网络出版日期: 2015-11-28

作者简介: 刘悦(1991—),男,硕士研究生,主要从事光纤光栅传感方面的研究。E-mail: jihe0112@163.com

导师简介: 胡正良(1975—),男,博士,副教授,主要从事光纤传感方面的研究。

E-mail: zheng\_liang\_hu@163.com(通信联系人)

种方法在长期测量时存在信号失帧现象。

本文分析了基于4路偏振切换的偏振诱导信号衰落抑制方案。建立了理论模型,仿真论证了方案对偏振诱导信号衰落的抑制效果,搭建了基于相位产生载波技术(PGC)调制解调的光纤迈克尔孙型干涉传感系统,对4路偏振切换技术抑制偏振衰落进行了实验验证。

## 2 理论模型及仿真

### 2.1 基本原理及理论模型

偏振调制器在工作时有2个工作点,这2个工作点分别对应着输出光的偏振态 **polarization1** 和 **polarization2**。如图1所示(PM: 偏振调制器),对偏振调制器加载一个-10 V到+10 V的锯齿波扫描电压,得到其光强的最大最小值,再得到对应的电压值,这2个电压值即为其2个工作点,2个工作点的差值即为偏振调制器的半波电压。

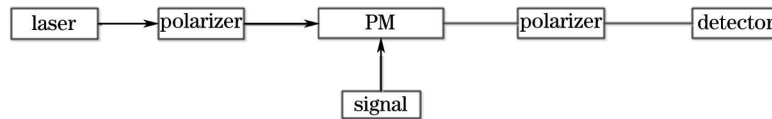


图1 偏振调制器工作点测量原理图

Fig.1 Principle of working point measurement of polarization modulator

基于一个非等臂迈克尔孙干涉仪进行偏振切换技术的研究,其原理如图2(a)所示(D: 探测器)。信号源按照得到的2个工作点对偏振调制器加载方波电压,方波电压的峰峰值为偏振调制器的半波电压,频率为  $f$ 。偏振调制器使连续光偏振态按照 **polarization1** 和 **polarization2** 的方式来回切换(**polarization1** 指的是沿  $x$  轴偏振的线偏振光,**polarization2** 指的是沿  $y$  轴偏振的线偏振光),切换的频率即为加载的方波电压的频率  $f$ 。

系统中迈克尔孙干涉仪的臂差  $l = \frac{c}{8nf}$ ,迈克尔孙干涉仪会产生  $\tau = \frac{1}{4f}$  的时延。干涉仪的长臂与短臂的光偏振态如图2(b)所示,长臂中光的偏振态 SOP1 较短臂中光的偏振态 SOP2 有一个  $\tau$  的延时,那么连续光在输出端干涉后会形成4个偏振通道的干涉信号。通过算法将4个通道的干涉信号合成一路干涉信号,使这一路干涉信号的干涉度稳定下来并较4个偏振通道的干涉度有所提高,从而实现抗偏振衰落。

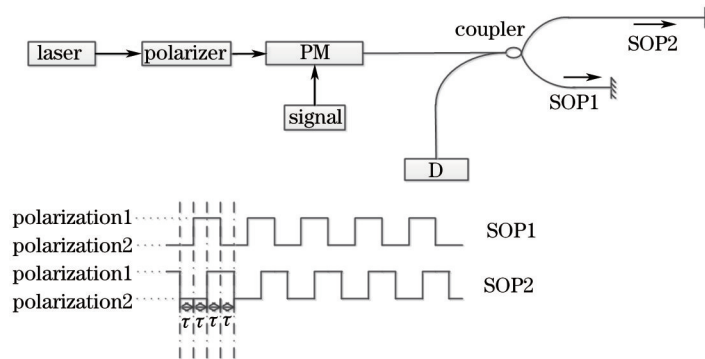


图2 (a) 偏振切换技术的系统原理图; (b) 干涉仪长短臂偏振态的时序结构

Fig.2 (a) Principles of polarization switching; (b) polarization in Michelson interferometer

偏振调制器使光偏振态沿在 **polarization1** 和 **polarization2** 中来回切换,其光场可以表示为:

$$E_x = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$E_y = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

被调制的连续光经过一段传输光纤进入迈克尔孙干涉仪,一般来说,一段低双折射的双折射光纤的双折射效应可以看为一个椭圆延迟器,它的琼斯矩阵可以写为<sup>[9]</sup>:

$$R = K_1 \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \exp(-i\gamma) \\ \sin \alpha \exp(i\gamma) & \cos \alpha \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中  $K_1$  为光场的损耗系数,仅与传输光纤的损耗有关,  $\alpha$  为光通过这段光纤后与光纤慢轴的夹角,  $\gamma$  为光通

过这段光纤后产生的相位差,  $\alpha$  和  $\gamma$  依赖于光纤的双折射特性。经过传输光纤的传输, 其光场可以写为:

$$A_1 = RE_x = K_1 \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \exp(i\gamma) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$B_1 = RE_y = K_1 \begin{bmatrix} -\sin \alpha \exp(-i\gamma) \\ \cos \alpha \end{bmatrix}. \quad (5)$$

迈克尔孙干涉仪的琼斯矩阵可以写为:  $J = K_4 \exp(i\phi) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(i\theta) \end{bmatrix}$ , 其中  $K_4$  为干涉仪的损耗系数, 与干涉仪光纤的损耗系数、反射率、臂差有关。迈克尔孙干涉仪的臂差为几米到几十米, 与几十千米的传输光纤相比, 其损耗可以忽略。 $\phi$  是干涉仪上加载的信号,  $\phi = \varphi_c + \varphi_s$ ,  $\varphi_c = C \cos \omega_0 t$  为 PGC 调制信号,  $\varphi_s$  为系统加载的传感信号。 $\theta$  为干涉仪双折射效应产生的相位差。那么光场  $A_1$  和  $B_1$  经过干涉仪后(假设短臂的端面反射镜的反射率为  $t_1$ , 长臂的端面反射镜的反射率为  $t_2$ )变为:

$$A_2 = JA_1 = K_2 \exp(i\phi) \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \exp[i(\gamma + \theta)] \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$B_2 = JB_1 = K_2 \exp(i\phi) \begin{bmatrix} -\sin \alpha \exp(-i\gamma) \\ \cos \alpha \exp(i\theta) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中  $K_2 = K_1 t_2$ ,  $K_3 = t_1 K_1$ , 那么得到的 4 路干涉信号为:

$$S_1 = (K_2^2 + K_3^2) \left[ 1 + \frac{2K_2 K_3 m}{K_2^2 + K_3^2} \cos(\phi + \theta + \varphi_0) \right] = (K_2^2 + K_3^2) [1 + k_1 \cos(\phi + \theta + \varphi_0)], \quad (8)$$

$$S_2 = (K_2^2 + K_3^2) \left[ 1 + \frac{2K_2 K_3 n}{K_2^2 + K_3^2} \cos\left(\phi - \gamma + \frac{\theta}{2} + \frac{\pi}{2}\right) \right] = (K_2^2 + K_3^2) \left[ 1 + k_2 \cos\left(\phi - \gamma + \frac{\theta}{2} + \frac{\pi}{2}\right) \right], \quad (9)$$

$$S_3 = (K_2^2 + K_3^2) \left[ 1 + \frac{2K_2 K_3 m}{K_2^2 + K_3^2} \cos(\phi - \varphi_0) \right] = (K_2^2 + K_3^2) [1 + k_1 \cos(\phi - \varphi_0)], \quad (10)$$

$$S_4 = (K_2^2 + K_3^2) \left[ 1 + \frac{2K_2 K_3 n}{K_2^2 + K_3^2} \cos\left(\phi + \gamma + \frac{\theta}{2} + \frac{\pi}{2}\right) \right] = (K_2^2 + K_3^2) \left[ 1 + k_2 \cos\left(\phi + \gamma + \frac{\theta}{2} + \frac{\pi}{2}\right) \right], \quad (11)$$

式中  $n = 2 \cos \alpha \sin \alpha \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$ ,  $k_1 = \frac{2K_2 K_3 m}{K_2^2 + K_3^2}$ ,  $k_2 = \frac{2K_2 K_3 n}{K_2^2 + K_3^2}$ ,  $m$  和  $\varphi_0$  的关系为:

$$\begin{cases} m \sin \varphi_0 = -\sin \theta \cos^2 \alpha \\ m \cos \varphi_0 = \cos^2 \alpha \cos \theta + \sin^2 \alpha \end{cases}, \quad (12)$$

计算得到  $m^2 + n^2 = 1$ , 4 路信号的干涉度为:

$$V_1 = V_3 = \frac{2K_2 K_3}{K_2^2 + K_3^2} m = \frac{2t_1 t_2}{t_1^2 + t_2^2} m, \quad (13)$$

$$V_2 = V_4 = \frac{2K_2 K_3}{K_2^2 + K_3^2} n = \frac{2t_1 t_2}{t_1^2 + t_2^2} n. \quad (14)$$

在 4 路信号中, 其中  $\phi = \varphi_c + \varphi_s$ ,  $\varphi_c = C \cos \omega_0 t$ , 对 4 路信号分别乘以  $\cos \omega_0 t$  和  $\cos 2\omega_0 t$ , 再分别做低通滤波, 滤掉所有的含  $\omega_0$  及其倍频项, 可以得到:

$$-k_1 J_1(C) \sin(\varphi_s + \theta + \varphi_0), \quad (15)$$

$$-k_1 J_2(C) \cos(\varphi_s + \theta + \varphi_0). \quad (16)$$

可以构造复数  $k_1 \exp[i(\varphi_s + \theta + \varphi_0)]$ 。同理可以构造出  $k_2 \exp\left[i\left(\varphi_s - \gamma + \frac{\theta}{2} + \frac{\pi}{2}\right)\right]$ 、 $k_1 \exp[i(\varphi_s - \varphi_0)]$ 、 $k_2 \exp\left[i\left(\varphi_s + \gamma + \frac{\theta}{2} + \frac{\pi}{2}\right)\right]$ , 对这 4 组信号交叉相乘相减可以得到:

$$(k_1^2 + k_2^2) \exp[i(2\varphi_s + \theta)]. \quad (17)$$

从(17)式即可将信号  $\varphi_s$  解调出来, 在这里可以看到只有干涉仪本身的双折射效应对信号有影响, 传输光纤的双折射效应对信号是没有影响的。在这里认为合成信号的等效干涉度为  $k_1^2 + k_2^2$ 。

## 2.2 数值仿真

假设2个反射镜的反射率  $t_1 = t_2 = 90\%$ , 其中  $\alpha$ 、 $\gamma$  和  $\theta$  分别在  $[0, 2\pi]$  之间随机变化, 可以得到这4路信号的干涉度的变化。图3(a)中仿真了由于双折射因子  $\alpha$ 、 $\gamma$  和  $\theta$  的变化导致的4路信号干涉度的变化, 从中可以看出1、3与2、4干涉信号的干涉度是完全相反的, 它们是不可能同时向一个方向变化的。从(13)式和(14)式可以看出, 4路信号中1、3路信号的干涉度与2、4路信号的干涉度受双折射效应因子的影响是相反的, 这与仿真实验的结果是一致的。V5表示合成信号的等效干涉度, 可以看出其是一个稳定的值1。根据迈克尔孙干涉仪两臂反射镜的反射率, 忽略干涉仪两臂的损耗, 可以计算得到  $k_1^2 + k_2^2 = \left( \frac{2K_2 K_3}{K_2^2 + K_3^2} \right)^2 = 1$ 。这个结果与仿真实验得到的结果也是一致的。从图3(b)中可以看出4路信号中干涉度的最大值在0.65以上, 但是不稳定, 即总是有一路信号的干涉度是受偏振衰落影响较小的。

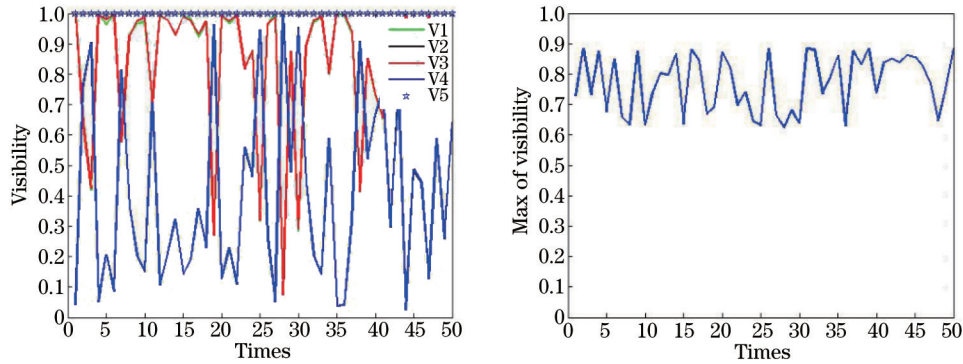


图3 (a) 4路信号与合成信号的干涉度; (b) 4路信号中干涉度的最大值

Fig.3 (a) Visibility of signals; (b) max visibility in four signals

可以看出, 合成为一路信号后其干涉度可以稳定在一个较好的水平, 而其干涉度与传输光纤和干涉仪的双折射效应无关, 仅与光纤的损耗和干涉仪两臂的反射镜的反射率有关系。在仿真实验中, 设信号的峰值为  $0.7 \text{ rad}$ , 频率为  $1 \text{ kHz}$ , PGC调制频率为  $50 \text{ kHz}$ ,  $C$ 值取  $2.4$ 。合成为一路信号后, 解调得到的信号与原始信号如图4所示。

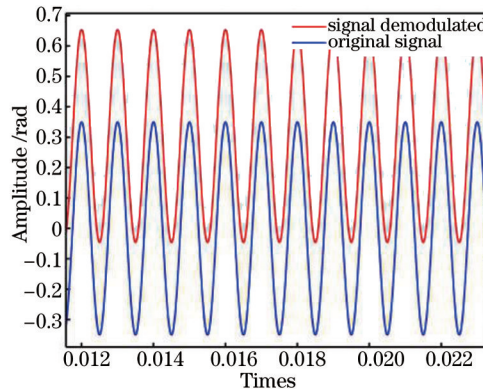


图4 原始信号和解调得到的信号

Fig.4 Original signal and demodulated signal

从图4中可以看出, 解调得到的信号在相位和峰峰值上与原始信号一致, 只是有一个直流偏置上的差异, 结合上面的公式知道这是由于干涉仪的双折射因子  $\theta$  的原因, 这个双折射因子可以通过滤波滤掉, 并不影响解调得到的信号与原始信号的一致性。

## 3 实验及结果

为验证偏振切换技术的基本原理以及其抗偏振衰落的效果, 在实验室搭建了偏振切换实验系统, 如图5所示。该系统采用的是窄线宽激光器, 起偏器将输入光沿保偏光纤的慢轴方向起偏。光源发出激光后经过起偏器起偏, 信号源对偏振调制器加载  $400 \text{ kHz}$  的方波, 其峰峰值为偏振调制器(PM)的半波电压, 使得经过



偏振调制器的光的偏振态按照偏振态  $x, y$  来回切换, 频率也为 400 kHz。迈克尔孙干涉仪耦合器为 3 dB 耦合器, 其臂差为 64 m, 短臂反射镜的反射率为 36.4%, 长臂反射镜的反射率为 52.3%。干涉仪输出光被探测器接收, 信号源与采集卡同步, 系统中起偏器与 PM 之间的光纤为保偏光纤, 其他部分都是单模光纤。

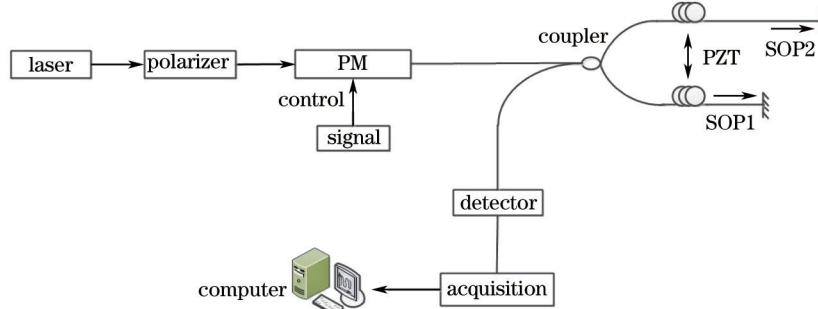


图5 连续光的偏振切换的光纤迈克尔孙干涉仪实验系统

Fig.5 Polarization switching experimental system based on Michelson interferometer

信号检测采用外调制相位载波(PGC)调制解调技术, 干涉仪一臂用频率为 50 kHz, 幅值为 550 mV 的正弦信号驱动压电陶瓷进行调制; 在干涉仪另一个臂用频率为 1 kHz, 幅值为 3V 的正弦信号驱动压电陶瓷来加载传感信号。

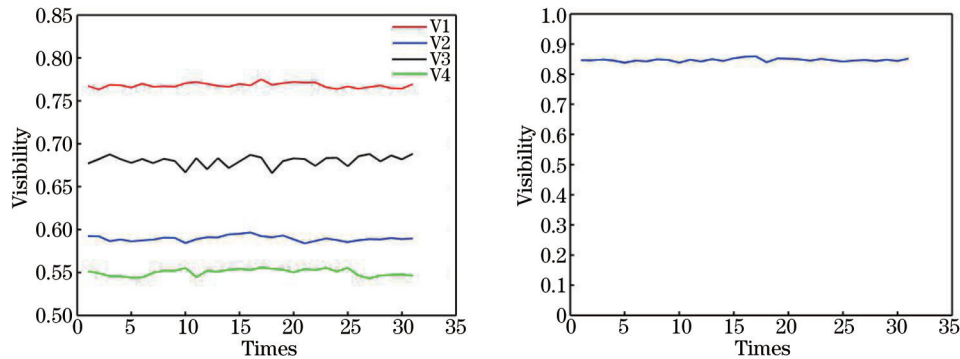


图6 各路输出的干涉度。(a) 4路信号的干涉度; (b) 合成后信号的干涉度

Fig.6 Visibility of every passage. (a) Visibility of four passages; (b) visibility after composed

实验对 4 路信号的干涉度变化与合成信号的干涉度变化进行了研究。图 6(a)和(b)分别显示了 4 路信号的干涉度和合成为一路后的信号的干涉度。从图 6 中可以看出第 1、3 路信号的干涉度较高, 2、4 路信号的干涉度较低。实验中由于采集数据的时间很短, 所以 4 个偏振通道的干涉度并不会大幅度地变化。合成为一路信号后可以看出信号的干涉度较 4 路信号相比, 干涉度有所提高, 稳定在 0.838~0.860 之间。实验系统中的短臂的端面反射镜和长臂的端面反射镜的反射率分别为 36.4% 和 52.3%, 理论上计算得到合成信号的干涉度为 0.8793, 实验所得到的干涉度与理论计算的结果一致。

从 4 个偏振通道和合成后的信号分别解调出传感信号如图 6 所示。从图 7 中可以看出 4 个偏振通道解

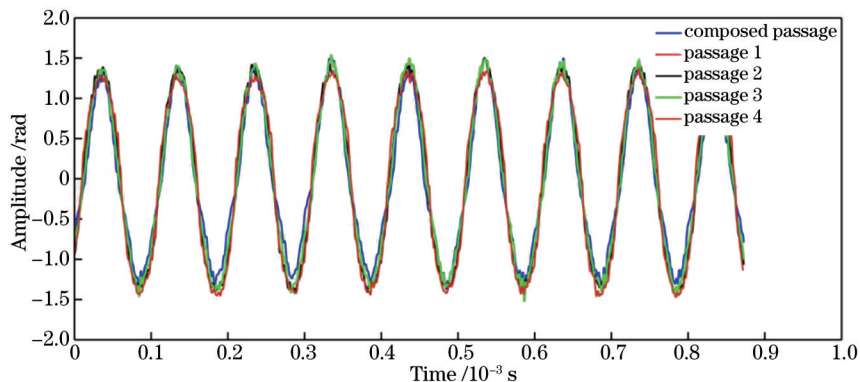


图7 各个通道解调得到的信号

Fig.7 Signal demodulated from every passages

调得到的信号与经过复数算法合成后得到的信号是一致的,与加载的信号是吻合的。

## 4 结 论

研究了偏振切换技术在光纤传感系统中抗偏振衰落问题的基本原理,建立了理论模型,运用了复数运算的方法解决4路信号的合成问题。在建立的理论模型的基础上,计算机仿真实验表明,偏振切换技术可以很好地实现抗偏振衰落。在迈克尔孙干涉仪两臂的反射镜的反射率都为90%时,其合成信号的干涉度可以达1,2个反射镜的反射率越是接近时,抗偏振衰落的效果越好。建立了基于非等臂迈克尔孙干涉仪的实验系统,采用PGC外调制方案解调信号,对偏振切换技术抗偏振衰落效果进行了实验验证。实验结果表明,在干涉仪的端面反射镜的反射率为36.4%和52.3%时,引入指数合成4路信号的方法合成信号后,其等效干涉度稳定在0.838~0.860之间,解调得到的信号与4路偏振通道解调得到的信号是一致的,从实验上验证了偏振切换技术是可行的。可以认为偏振切换技术具有解决光纤光栅传感系统中偏振衰落问题的潜力。

## 参 考 文 献

- 1 Liao Yanbiao. Optic Fiber[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.  
廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- 2 Meng Zhou, Hu Yongming, Xiong Shuidong, *et al.*. All polarization maintaining fiber hydrophone array[J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(5): 415-417.  
孟 洲, 胡永明, 熊水东, 等. 全保偏光纤水听器阵列[J]. 中国激光, 2002, 29(5): 415-417.
- 3 N J Frigo, A Dandridge, A B Tveten. Technique for elimination of polarization fading in interferometers[J]. Electron Lett, 1984, 20(8): 319-320.
- 4 A D Kersey, M J Marrone, A Dandridge, *et al.*. Optimization and stabilization of visibility in interferometric fiber optic sensors using input-polarization control[J]. Journal of Lightwave Technology, 1988, 6(10): 1599-1609.
- 5 A D Kersey, M J Marrone, A Dandridge. Observation of input-polarization-induced phase noise in interferometric fiber optic sensor[J]. Optics Letters, 1988, 13(10): 847-849.
- 6 A D Kersey, M J Marrone, M A Davis. Polarization insensitive fiber optic michelson interferometer [J]. Electron Lett, 1991, 27(6): 518-520.
- 7 O H Waagaard, E Ronnekleiv. Method and apparatus for providing polarization-insensitive signal processing for interferometric sensors[P]. US Patent 7359061 B2 [2005-3-3].
- 8 Ni Ming, Cao Chunyan, Hu Zhengliang, *et al.*. Polarization diversity technology and its application in fiber sensors[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0706005.  
倪 明, 曹春燕, 胡正良, 等. 偏振分集技术及其在光纤传感器中的应用[J]. 光学学报, 2011, 31(7): 0706005.
- 9 Wang Xiao, Zhang Xueliang, Hu Zhengliang, *et al.*. Experimental research on interferometric fiber-optical sensing system with polarization diversity receiver[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6): 1566-1570.  
王 潇, 张学亮, 胡正良, 等. 干涉型光纤传感系统偏振分集接收实验研究[J]. 光学学报, 2010, 30(6): 1566-1570.

栏目编辑: 刘丰瑞