

文章编号: 0258-7025(2010)04-1042-05

# 法拉第旋光镜旋转角和工作波长对单模光纤 迈克耳孙干涉仪性能的影响

王建飞 王 潇 罗 洪 孟 洲

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 偏振诱导信号衰落现象的抑制是干涉型光纤传感系统的关键技术之一。针对法拉第旋光镜(FRM)法抑制偏振诱导信号衰落技术进行了具体深入的研究。使用琼斯矩阵法对 FRM 单模光纤迈克耳孙干涉仪进行了理论分析和数值仿真,得出当 FRM 旋转角度偏差不大于  $6^\circ$  时,可视度保持在 0.9 以上;分析了工作波长变化对 FRM 单模光纤迈克耳孙干涉仪干涉性能的影响,当入射光波长处于 FRM 中心波长  $\pm 71$  nm 范围内时,光纤干涉仪可视度达到 0.9 以上。实验结果表明,当入射光波长处于 1495.4~1606.7 nm 范围内时,可得到可视度接近于 1 的稳定信号输出,干涉性能优良。

**关键词** 光通信;法拉第旋光镜;迈克耳孙干涉仪;琼斯矩阵;偏振衰落

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103704.1042

## Influence of Rotation Angle and Working Wavelengths of Faraday Rotation Mirror on Single-Mode Fiber Optics Michelson Interferometer

Wang Jianfei Wang Xiao Luo Hong Meng Zhou

(College of Opto-Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology,  
Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** Elimination of polarization-induced fading is one of the key technologies of interferometric fiber optic sensors. Single-mode fiber optic Michelson interferometer based on Faraday rotation mirror (FRM) is researched. The effect of FRM rotation angle error on the system performance is analyzed and simulated based on Jones matrix. When the FRM rotation angle error is less than  $6^\circ$ , the visibility of interferometer remains above 0.9. The effects of different wavelengths on the interferometer performance are discussed. When the wavelength is close to central wavelength, the interferometer visibility remains above 0.9. Experimental results show that at wavelength of 1495.4~1606.7 nm, the visibility of interferometer is close to 1 and the performance remains good.

**Key words** optical communications; Faraday rotation mirror; Michelson interferometer; Jones matrix; polarization fading

### 1 引 言

偏振诱导信号衰落一直是制约干涉型光纤传感技术发展的瓶颈技术之一。为解决这一难题,国内外学者提出了一系列方案<sup>[1~13]</sup>,主要包括光路全保偏方案、偏振分集接收、输入偏振态控制和法拉第旋光镜(FRM)法等。利用 FRM 进行双折射补偿方法结构简单,可得到良好的消偏振效果,因而被广泛应

用。此方法要求 FRM 的旋转角度为  $45^\circ$ 。由于实际制造误差的存在,同时温度、波长等因素的变化,也会使 FRM 的旋转角度产生波动,FRM 很难保证严格的  $45^\circ$  角要求,造成干涉型光纤传感系统可视度降低,偏振噪声加大,极大地影响了系统的实际性能。

本文利用琼斯矩阵法对光纤干涉系统进行数值

收稿日期:2009-07-07;收到修改稿日期:2009-07-27

基金项目:新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0925)资助项目。

作者简介:王建飞(1984—),男,博士研究生,主要从事光纤矢量水听器方面的研究。E-mail: wjfojoy@126.com

导师简介:孟 洲(1968—),女,教授,博士生导师,主要从事光纤传感、光纤器件方面的研究。

E-mail: zhoumeng6806@163.com

计算,推导出 FRM 旋转角度偏差与干涉仪可视度的关系式,通过 Matlab 仿真分析,给出了干涉仪系统实际应用中能够接受的最大 FRM 旋转角度偏差。最后分析了 FRM 法在波分复用系统中应用的可行性,并进行了相关的实验验证。

## 2 FRM 法消偏振衰落技术理论分析

FRM 法消偏振衰落技术是在普通单模光纤迈克尔孙干涉仪两臂各加一个 FRM,当旋转角度为  $45^\circ$  时,使反射光的偏振态变化正好抵消入射光的偏振态变化,干涉仪的可视度保持为 1<sup>[11]</sup>。结构原理图如图 1 所示。

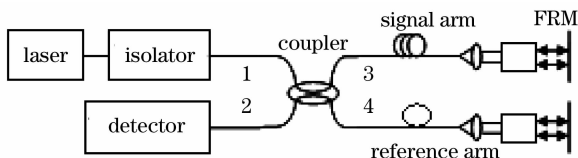


图 1 基于 FRM 的迈克尔孙干涉仪结构原理图

Fig. 1 Scheme of Michelson interferometer based on FRM

根据耦合波理论,分束比为 1:1 的理想  $2 \times 2$  光纤耦合器的琼斯矩阵为<sup>[6]</sup>

$$\mathbf{J}_{13} = \mathbf{J}_{42} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{J}_{14} = \mathbf{J}_{32} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{pmatrix} j & 0 \\ 0 & j \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中  $\mathbf{J}_{mn}$  ( $m, n = 1 \sim 4$ ) 表示光纤耦合器从  $m$  端输入到  $n$  端输出的琼斯矩阵。

设 FRM 的旋转角度为  $\theta$ , 则光通过 FRM 又被反射回来后的琼斯矩阵为<sup>[14]</sup>

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} -\cos 2\theta & -\sin 2\theta \\ -\sin 2\theta & \cos 2\theta \end{bmatrix}. \quad (3)$$

设 FRM 的旋转角度偏差为  $\Delta$ , 则  $\theta = \pi/4 + \Delta$ , 代入(3)式可得

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \sin 2\Delta & -\cos 2\Delta \\ -\cos 2\Delta & -\sin 2\Delta \end{bmatrix}. \quad (4)$$

普通单模光纤的双折射效应可看作一个椭圆延迟器,作为干涉仪一个臂的单模光纤,其琼斯矩阵为<sup>[8]</sup>

$$\vec{\mathbf{R}} = \begin{bmatrix} a & -b^* \\ b & a^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\delta/2) + i \cos 2\alpha \sin(\delta/2) & i \sin 2\alpha \sin(\delta/2) \\ i \sin 2\alpha \sin(\delta/2) & \cos(\delta/2) - i \cos 2\alpha \sin(\delta/2) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中  $*$  为取共轭,  $a, b$  与光纤的双折射特性有关,  $\alpha$  为单模光纤等效快轴与参考坐标系  $x$  轴的夹角,  $\delta$  为单模光纤等效快慢轴之间的相位差。入射光经 FRM 反射回来,该段光纤可看成一段反向椭圆延迟器,其反向传输矩阵为<sup>[14]</sup>

$$\vec{\mathbf{R}} = \begin{bmatrix} a & -b \\ b^* & a^* \end{bmatrix}. \quad (6)$$

由(1)~(6)式得,迈克尔孙光纤干涉仪干涉臂和参考臂输出的光场强度为

$$\mathbf{E}_{\text{outs}} = \begin{bmatrix} E_{\text{outs}_x} \\ E_{\text{outs}_y} \end{bmatrix} = \mathbf{J}_{32} \cdot \vec{\mathbf{R}}_s \cdot \mathbf{T}_s \cdot \vec{\mathbf{R}}_s \cdot \mathbf{J}_{13} \mathbf{E}_{\text{in}}, \quad (7)$$

$$\mathbf{E}_{\text{outr}} = \begin{bmatrix} E_{\text{outr}_x} \\ E_{\text{outr}_y} \end{bmatrix} = \mathbf{J}_{42} \cdot \vec{\mathbf{R}}_r \cdot \mathbf{T}_r \cdot \vec{\mathbf{R}}_r \cdot \mathbf{J}_{14} \mathbf{E}_{\text{in}}, \quad (8)$$

式中下标  $s, r$  分别代表光纤传感系统的信号臂和参考臂。 $\mathbf{E}_{\text{in}}$  为输入端电场强度,  $\mathbf{E}_{\text{outs}}$ ,  $\mathbf{E}_{\text{outr}}$  分别表示信号臂和参考臂的输出电场强度。

由(7), (8)式可得干涉仪输出相干总光强为

$$I = I_x + I_y = \sum_{n=x,y} (E_{\text{outs}_n} + E_{\text{outr}_n}) \times (E_{\text{outs}_n}^* + E_{\text{outr}_n}^*). \quad (9)$$

干涉仪的输出条纹可视度  $K$  为

$$K = \frac{|I_{\text{max}}| - |I_{\text{min}}|}{|I_{\text{max}}| + |I_{\text{min}}|}. \quad (10)$$

近似认为两个 FRM 的旋转角度偏差相同,即  $\Delta_s \approx \Delta_r = \Delta$ ; 选择信号臂坐标系为信号臂光纤中等效快慢轴,即  $\alpha_s = 0$ ; 同时,假设入射为水平偏振光,  $\mathbf{E}_{\text{in}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$  (如入射为椭圆偏振光,可将其分解为水平偏振光和垂直偏振光分别进行计算)。

由上述条件,可得到最终干涉信号为

$$I = I_x + I_y = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{c^2 + d^2} \cdot \cos(\beta + \Delta\varphi). \quad (11)$$

由(10), (11)式,干涉仪输出信号可视度可表示为

$$K = \frac{1}{\sqrt{c^2 + d^2}}, \quad (12)$$

(11), (12) 式中,  $\Delta\varphi$  为光通过光纤两臂的相位差,

$$\beta = \arctan(c/d),$$

$$c = \sin^2 2\Delta (\cos \delta_s \cos \delta_r + \cos 2\alpha_r \sin \delta_s \sin \delta_r) + \cos^2 2\Delta,$$

$$d = \sin^2 2\Delta (\cos 2\alpha_r \cos \delta_s \sin \delta_r - \sin \delta_s \cos \delta_r) + \sin 2\alpha_r \sin \delta_r \cos 2\Delta \sin 2\Delta,$$

$\alpha_r, \delta_s$  及  $\delta_r$  为光纤干涉仪两臂双折射特性参数。

### 3 仿真分析

由(12)式可知,光纤干涉系统可视度  $K$  与  $\Delta$ ,  $\alpha_r$ ,  $\delta_s$  和  $\delta_r$  有关,通过仿真逐一给出各参数与可视度  $K$  的关系。

#### 3.1 $\alpha_r$ 值不同时, $K$ 随 $\delta_s, \delta_r$ 的变化

图 2 假定  $\Delta=1^\circ$ , 给出了不同  $\alpha_r$  时,  $K$  随  $\delta_s, \delta_r$

变化的仿真图形。从图 2 可看出,  $\alpha_r$  取值不同,  $K$  会产生很小的波动, 但始终接近于 1。通过改变  $\Delta$  值进行相同的数值仿真, 在  $\Delta$  取值较小时, 仍可得到相同的结果。由此可认为在  $\Delta$  取值较小时,  $\alpha_r$  对  $K$  的影响很小, 可忽略。

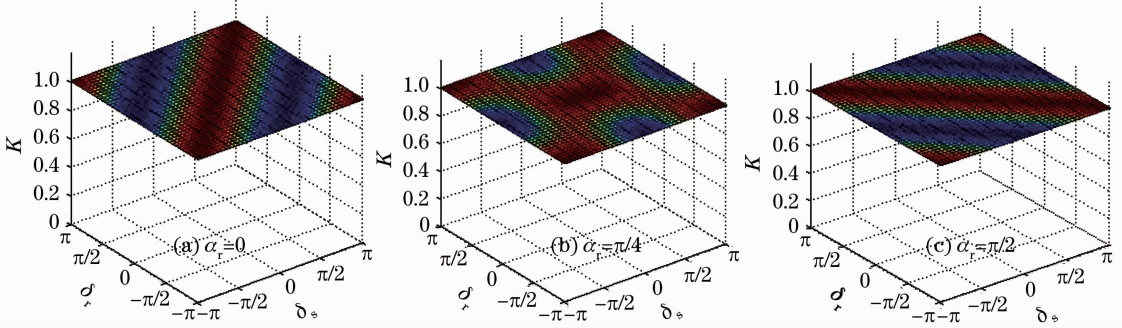


图 2 不同  $\alpha_r$  值时  $K$  随  $\delta_s, \delta_r$  的变化

Fig. 2 Visibility  $K$  versus  $\delta_s, \delta_r$  under different  $\alpha_r$

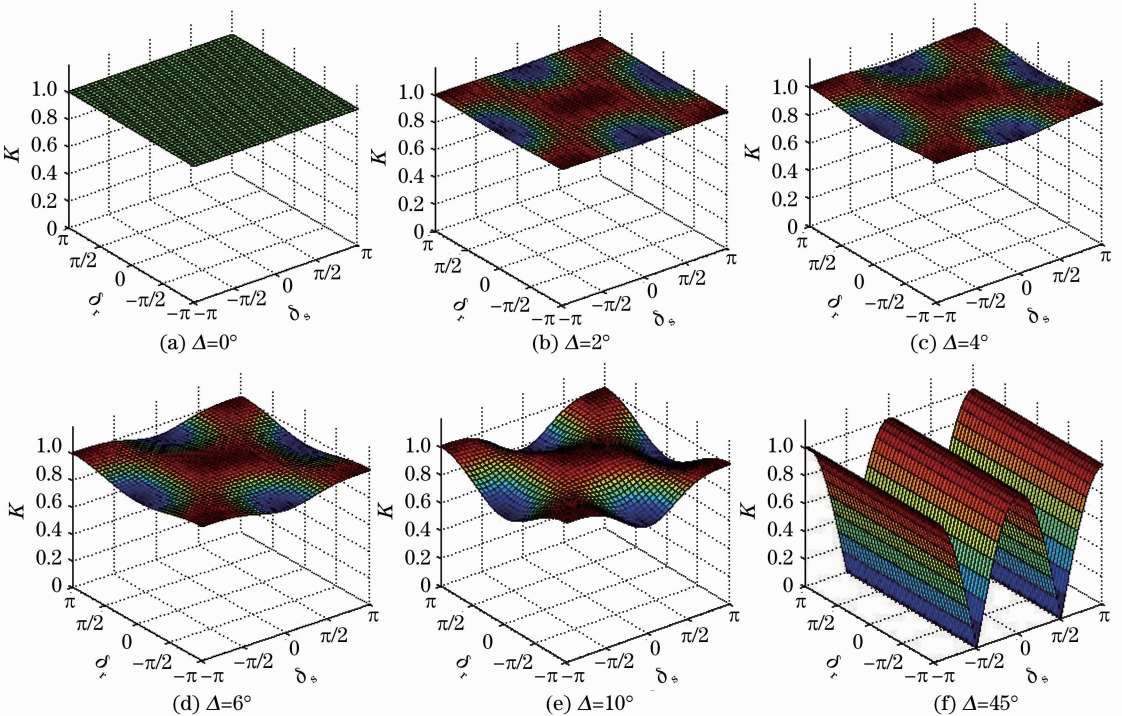


图 3 不同  $\Delta$  值时  $K$  随  $\delta_s, \delta_r$  的变化

Fig. 3 Visibility  $K$  versus  $\delta_s, \delta_r$  under different  $\Delta$

#### 3.2 $\Delta$ 值不同时, $K$ 随 $\delta_s, \delta_r$ 的变化

图 3 固定  $\alpha_r$  值, 给出了当  $\Delta$  变化时,  $K$  随  $\delta_s, \delta_r$  变化的仿真图形。由图 3 可看出,  $\Delta$  值变化对于  $K$  值的影响很大。当  $\Delta=0^\circ$  时, 系统可视度始终为 1, 为理想情况;  $\Delta=6^\circ$  时, 系统可视度下降为 0.9; 当  $\Delta=10^\circ$  时, 系统可视度已降至 0.75; 当系统无 FRM 时, 即  $\Delta=45^\circ$  时,  $K$  取值由于光纤双折射效应而在 0~1 之

间随机波动。

由图 2, 3 还可看出,  $K$  值随着  $\delta_s, \delta_r$  的变化会发生一定的波动, 而且, 随着  $\Delta$  值的增大波动越来越大 (图 3 中,  $\Delta=10^\circ$  时, 波动已达到了 25%)。但是, 当  $\Delta$  变化较小 ( $|\Delta| < 6^\circ$  以内) 时, 波动会很小。所以在  $\Delta$  变化较小时,  $\delta_s, \delta_r$  的影响也可忽略。

图 4 给出了  $\Delta$  变化较小时,  $K$  随  $\Delta$  的变化情

况。由图 4 可知,在  $\Delta = \pm 6^\circ$  时,系统可视度  $K$  降低至 0.9。一般情况下认为  $K$  大于 0.9 时系统干涉性能优良,可正常工作。所以可认为  $\Delta = \pm 6^\circ$  是系统实际工作时能够接受的 FRM 最大旋转角度偏差。

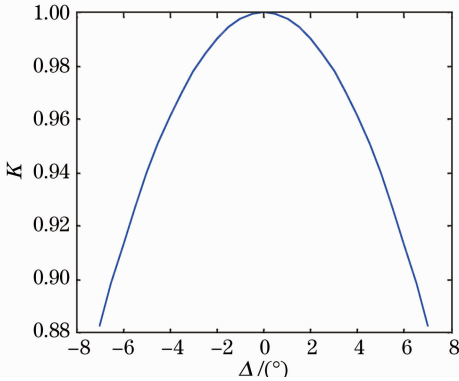


图 4  $K$  随  $\Delta$  的变化曲线

Fig. 4 Visibility  $K$  versus  $\Delta$

由仿真分析可得:当 FRM 旋转角度偏差  $\Delta = 0^\circ$  时,光纤干涉系统的可视度不受两臂光纤双折射及输入偏振态的影响,恒为 1。当  $\Delta \neq 0^\circ$  时,系统可视度随着  $|\Delta|$  的增大而降低,在  $\Delta$  变化较小的情况下,光纤双折射对系统可视度的影响可忽略,此时  $\Delta$  是影响系统干涉性能的最主要因素。当  $\Delta$  变化较大 ( $|\Delta| > 6^\circ$ ) 时,光纤双折射对系统干涉度影响加大,系统干涉性能急剧下降。

#### 4 波长变化对系统干涉性能的影响

波分复用技术被广泛应用于大型干涉型光纤传感阵列。由于旋光材料的旋光色散现象,波长变化会影响 FRM 旋转角度,进而影响系统的干涉性能。

假设 FRM 的旋转角度偏差  $\Delta$  由制造误差  $\Delta_0$  和旋光色散造成的误差  $\tilde{\Delta}$  组成,即

$$\Delta = \Delta_0 + \tilde{\Delta}, \tag{13}$$

旋光材料的旋光系数  $\rho$  与光波的波长  $\lambda$  的经验公式为<sup>[15]</sup>

$$\rho = \pm (A + B/\lambda^2), \tag{14}$$

式中右端括号前的正负号由右旋或左旋确定,  $A$  和  $B$  为大于零的物质常数。

设法拉第旋光镜的中心工作波长为  $\lambda_0$ , 实际工作波长为  $\lambda$ , 旋光材料的厚度为  $d$ , 则

$$\begin{aligned} \tilde{\Delta} &= \theta_0 - \theta = \rho_0 d - \rho d = \pm B \cdot d \left( \frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda^2} \right) \approx \\ &\pm 2B \cdot d \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0^3} = M \cdot \Delta\lambda, \end{aligned} \tag{15}$$

式中  $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ ,  $M = \pm 2B \cdot d \frac{1}{\lambda_0^3}$ 。

通常使用的 FRM, 其性能参数为: 中心波长 1550 nm,  $M = 0.07 (^\circ)/\text{nm}$ ,  $\Delta_0 = \pm 1^\circ$ 。

当  $|\Delta| \leq 6^\circ$  时, 系统的干涉性能保持良好, 代入 (15) 式

$$|\Delta\lambda| = |\tilde{\Delta}| / M = |\Delta - \Delta_0| / M \approx 71 \text{ nm}.$$

结果表明, 在中心波长 1550 nm 附近  $\pm 71 \text{ nm}$  范围内, 干涉型光纤传感系统的干涉性能保持良好, 满足光纤通信 C 波段 1535~1565 nm 波分复用带宽要求。

#### 5 系统性能实验研究

实验系统结构如图 5 所示。光源输出的光经过 9:1 耦合器 C1, 90% 的光进入下一级系统, 另外 10% 的光进入光谱仪 (OSA), 用于检测入射光波长。进入后一级系统的光通过耦合器 C2 后均分进入干涉仪两臂, 分别由 FRM1 和 FRM2 反射回 C2 后相干, 干涉信号通过探测器检测。

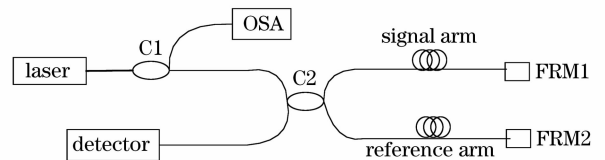


图 5 FRM 法消偏振诱导信号衰落实验示意图

Fig. 5 Schematic diagram of FRM for overcoming the polarization-induced fading

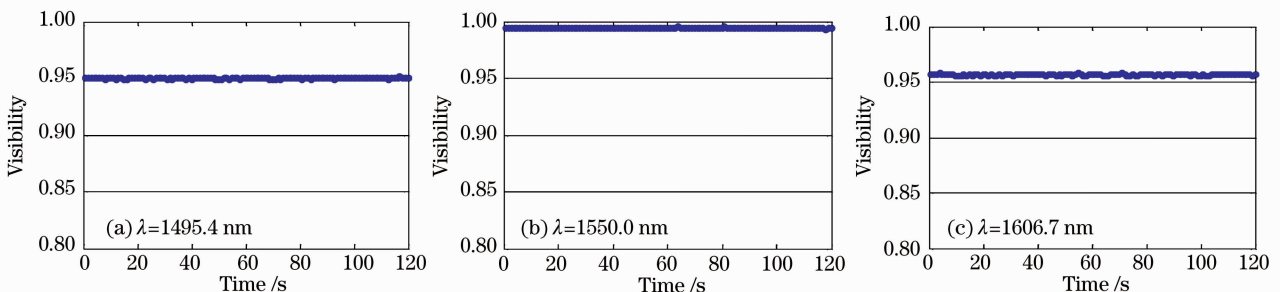


图 6 不同波长情况下系统的可视度

Fig. 6 Visibility under different wavelengths

为验证波长变化对系统干涉性能的影响,实验中可使用可调谐光纤激光器作为光源,波长范围为1495.4~1606.7 nm。每隔5 nm进行一次测量,共测试23个波长,实验结果如图6,7所示。

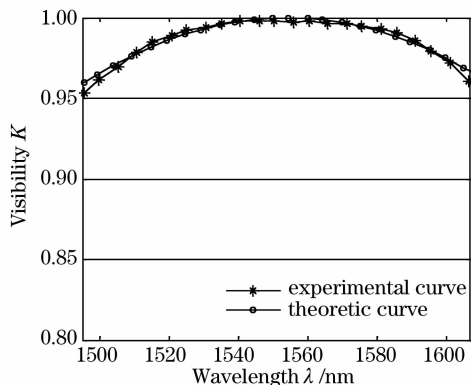


图7 可视度随波长变化曲线

Fig. 7 Visibility versus wavelength

图6给出了波长分别为1495.4, 1550和1606.7 nm时系统的可视度值。可以看出,在中心波长(1550 nm)时,系统可得到可视度接近于1的稳定信号输出。当系统偏离中心波长时,可视度降低,但在±50 nm的范围内,系统仍可以得到可视度大于0.95的稳定信号输出。与理论推导的结果相吻合。

图7给出了波长在1495.4~1606.7 nm范围内,系统可视度实验值与理论值的对比。可以看出,在此波长范围内,系统可视度大于0.95,且理论值与实验值相吻合,有效验证了理论分析结果的正确性。

## 6 结 论

经过理论计算,仿真分析,得出当FRM旋转角度偏差不大于 $6^\circ$ 时,干涉仪可视度保持在0.9以上。同时,当入射光波长处于FRM中心波长±71 nm范围内时,系统干涉性能仍保持良好。通过多次实验,检验了FRM法优良的消偏振衰落性能,得出了系统干涉度随波长变化的曲线图,验证了其应用于波分复用系统的可行性以及理论推导的正确性。FRM法结构简单,可行性强,消偏振衰落效果好,且适用于波分复用光纤系统,可在实验室及实际中广泛应用。

## 参 考 文 献

- Zhang Xiaoguang, Fang Guangqing, Zhao Xinyuan *et al.*. Experimental research of polarization stabilization in optical fiber communication systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4):888~891  
张晓光,方光青,赵鑫媛等. 光纤中偏振稳定控制的实验研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4):888~891
- Kang Chong, Zhang Min, Chen Hongjuan *et al.*. Pressure optical fiber vector hydrophone made of thin-walled cylindrical

- shell [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8):1214~1219  
康崇,张敏,陈洪娟等. 薄壁圆柱壳体压差式光纤矢量水听器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(8):1214~1219
- Song Muping, Zhuang Baiyun. Polarization-induced fading elimination technique in Brillouin optical time-domain analysis sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4):711~715  
宋牟平,庄白云. 布里渊光时域分析传感器的消偏振衰落技术[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4):711~715
- Luo Hong, Xiong Shuidong, Hu Yongming *et al.*. Research on three-component all polarization-maintaining fiber optic accelerometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10):1382~1386  
罗洪,熊水东,胡永明等. 三分量全保偏光纤加速度传感器的研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(10):1382~1386
- Xiao Hao, Li Fang, Wang Yongjie *et al.*. High-resolution fiber laser sensor system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1):87~91  
肖浩,李芳,王永杰等. 高分辨率光纤激光传感系统[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1):87~91
- Qi Longzhou, Xiao Hao, Li Fang *et al.*. Study of polarization-insensitive fiber optic interferometers for wavelength demodulation [J]. *Laser and Infrared*, 2008, **38**(3):259~262  
齐龙舟,肖浩,李芳等. 波长解调用偏振无关光纤干涉仪的研究[J]. *激光与红外*, 2008, **38**(3):259~262
- Mu Shuhui. Dynamic compensation technique for polarization fading in interferometric optical fiber sensors [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2008, **25**(3):375~378  
穆妹慧. 干涉型光纤传感器偏振衰落动态补偿技术[J]. *量子电子学报*, 2008, **25**(3):375~378
- Qian Kai, Xu Changchun, Ge Qiang *et al.*. Interferometric fiber-optical sensor based on partial polarization maintaining apparatus [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2008, **25**(1):114~118  
钱楷,徐长春,葛强等. 基于部分保偏器件的干涉型光纤传感器[J]. *量子电子学报*, 2008, **25**(1):114~118
- Chen Desheng, Xiao Ling, Cui Jie *et al.*. Analysis of  $3 \times 3$  coupler demodulation method for optical fiber interferometer and polarization fading [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2007, **18**(5):523~525  
陈德胜,肖灵,崔杰等. 光纤干涉信号的 $3 \times 3$ 耦合器解调及偏振衰落分析[J]. *光电子·激光*, 2007, **18**(5):523~525
- A. D. Kersey, M. J. Marrone, A. D. Dandridge. Experimental investigation of polarization-induced fading in interferometric fibre sensor arrays [J]. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(7):562~563
- Y. S. Boger, M. Tur. Polarisation-induced visibility limits in interferometric fibre-optic sensor arrays [J]. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(8):622~623
- A. D. Kersey, M. J. Marrone, A. D. Dandridge. Optimization and stabilization of visibility in interferometric fiber-optic sensors using input polarization control [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(10):1599~1609
- N. J. Frigo, A. Dandridge, A. B. Tveten. Technique for elimination of polarization fading in fibre interferometers [J]. *Electron. Lett.*, 1984, **20**(8):319~320
- Ni Ming. Investigation of the key technologies of fiber optical hydrophone [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2003. 47~48  
倪明. 光纤水听器关键技术研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2003. 47~48
- Xie Jinghui, Zhao Dazun, Yan Jixiang. Tutorial of Physical Optics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2005. 335~336  
谢敬辉,赵达尊,阎吉祥. 物理光学教程[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2005. 335~336