

波长解调用偏振无关光纤干涉仪的研究

齐龙舟, 肖浩, 李芳, 刘育梁

(光电系统实验室, 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要:针对光纤激光传感器信号解调过程中,干涉仪输出干涉条纹可见度受输入光偏振态变化以及两臂单模光纤双折射效应的影响,介绍了一种简单的光纤干涉仪消除偏振衰落技术,通过在 Michelson 光纤干涉仪上加两个法拉第旋转镜来提高输出条纹可见度。使用琼斯矩阵法对干涉仪系统进行理论计算,证明法拉第旋转镜旋转角度在理想的 45° 附近时能达到很好的消偏振效果,并通过实验进行了有效地论证。

关键词:光电子学;光纤激光传感器;光纤干涉仪;法拉第旋转镜;偏振控制

中图分类号:TN247

文献标识码:A

Study of Polarization-insensitive Fiber Optic Interferometers for Wavelength Demodulation

QI Long-zhou, XIAO Hao, LI Fang, LIU Yu-liang

(Optoelectronic System Laboratory, Institute of Semiconductors, CAS, Beijing 100083, China)

Abstract: During the wavelength demodulation of fiber laser sensors, random fluctuations in states of polarization of the interferometer beams induce fading of the interferometric fringe visibility, that effects the reliability of the system. To improve the fringe visibility of output signal, a simple and useful way is proposed which called the Faraday rotator mirror method. In theory domain, take the Jones matrix into calculated, seemed that when the degrees of Faraday rotator mirrors around 45° , the results would suit the system, and this had been finely testified by experiments.

Key words: optoelectronics; fiber laser sensor; fiber optic interferometer; faraday rotator mirror; polarization controller

1 引言

光纤激光传感器的信号解调,为了达到高的分辨率,一般都使用干涉式解调方法,光纤干涉仪的研制是一项关键技术^[1]。保偏光纤价格高昂,而且保偏耦合器在有些关键技术上还不是很完善,限制了其应用。普通单模光纤由于双折射效应,干涉仪两臂的偏振态会随机变化,导致输出干涉信号的可见度随之变化,特别是当两臂偏振态正交时,干涉仪的输出干涉信号为零,此即为偏振诱导信号衰落效应^[2]。光纤激光传感器进行干涉式解调时,干涉条纹可见度的波动将直接影响解调结果的稳定性,因

此光纤干涉仪的偏振控制,已成为影响光纤激光传感器性能的一个关键问题。国内外已提出多种消除偏振诱导信号衰落的方法^[3-9],其中利用法拉第旋转镜进行双折射补偿方法,可得到良好的消偏效果^[9];我们在此基础上,用琼斯矩阵法对干涉仪系统进行数值计算,从理论上证实了法拉第旋转镜法的可行性,并进行了相关的实验研究。

基金项目:中国科学院科技创新基金项目(CXJJ-177)课题资助。

作者简介:齐龙舟(1984-),男,硕士生,主要从事光纤激光传感方面研究。E-mail:qilongzh@semi.ac.cn

收稿日期:2007-09-18

2 法拉第旋转镜法消偏振衰落技术的理论分析

法拉第旋转镜法消偏振衰落技术是在普通的 Michelson 光纤干涉仪两臂的反射镜前各加一个法拉第旋转镜,当旋转角度为 45° 时,入射光的偏振态变化正好抵消反射光的偏振变化,使干涉仪输出的条纹可见度稳定为 1^[9]。在干涉仪输入端加一偏振控制器,观察在输入偏振态变化时干涉仪的干涉条纹可见度变化。实验原理图如图 1 所示。

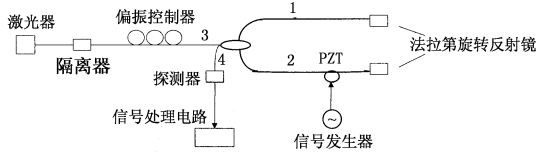


图1 法拉第旋转镜法消偏振诱导信号衰落实验示意图

Fig.1 schematic diagram of Faraday rotator mirrors for overcoming the polarization-induced fading

根据耦合波理论^[10],假设耦合器是偏振无关的,分光比为 1:1 时, 2×2 光纤耦合器的 Jones 矩阵为:

$$J_T = J_{31} = J_{24} = \frac{\sqrt{2}}{2} t_J \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$J_C = J_{32} = J_{14} = \frac{\sqrt{2}}{2} t_J \begin{pmatrix} j & 0 \\ 0 & j \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中, t_J 为幅度传输损耗系数; 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 Jones 矩阵。

设法拉第旋转镜的旋转角度为 θ ,则光通过它又被反射镜反射回来后的 Jones 矩阵为^[11]:

$$T = t \begin{pmatrix} -\cos 2\theta & -\sin 2\theta \\ -\sin 2\theta & \cos 2\theta \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中, t 为考虑到传输和反射损耗的幅度系数。

光纤干涉仪两臂所用的普通单模光纤的双折射效应可以看作一个椭圆延迟器,可写成^[11]:

$$S_+ = \frac{c_s}{d_s} \begin{pmatrix} a_s & -b_s^* \\ b_s & a_s^* \end{pmatrix} = c_s \begin{pmatrix} \cos^2 \beta e^{j\alpha/2} + \sin^2 \beta e^{-j\alpha/2} & j \sin 2\beta \sin \frac{\alpha}{2} \\ j \sin 2\beta \sin \frac{\alpha}{2} & \cos^2 \beta e^{-j\alpha/2} + \sin^2 \beta e^{j\alpha/2} \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中, c_s 为干涉仪一臂光纤的幅度损耗系数, $d_s^2 = a_s a_s^* + b_s b_s^*$, $*$ 表示复共轭, a_s, b_s 与光纤的双折射特性有关, α, β 分别为延迟器的延迟角和旋转角。激光经过反射镜反射回来,反向的椭圆延迟器可写成: $S_- = R S_+^T R^{-1}$, S_+^T 为 S_+ 的转置矩阵, $R = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ 是反射引起的坐标旋转矩阵,则^[11]:

$$S_- = \frac{c_s}{d_s} \begin{pmatrix} a_s & -b_s \\ b_s^* & a_s^* \end{pmatrix} \quad (5)$$

如图 2 所示, S_{1+}, S_{1-} 分别为臂 1 光纤双折射效应所引起的等效正向和反向传输矩阵; F_{1+}, F_{1-} 为光在传输中的正向和反向相位延迟, $F_{1+} = F_{1-} = \exp(j\phi_1)$; 干涉仪输入端电场强度为 E_{in} , $E_{in} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}$ 。由式(1)~(5)得, Michelson 光纤干涉仪臂 1 输出端的电场强度为:

$$E_1 = J_{14} \cdot F_{1-} \cdot S_{1-} \cdot T_1 \cdot S_{1+} \cdot F_{1+} \cdot J_{31} \cdot E_{in} \quad (6)$$

同理,臂 2 输出端的电场强度为:

$$E_2 = J_{24} \cdot F_{2-} \cdot S_{2-} \cdot T_2 \cdot S_{2+} \cdot F_{2+} \cdot J_{32} \cdot E_{in} \quad (7)$$

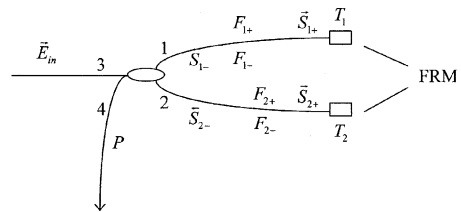


图2 干涉仪传输矩阵示意图

Fig.2 schematic of jones matrix for michelson interferometer

干涉仪两臂输出光学发生干涉,由式(6)~(7),总的干涉光强为:

$$\begin{aligned} P &= (E_1 + E_2) [(E_1 + E_2)^*]^T \\ &= \frac{1}{4} c_s^4 t_J^4 t^2 P_{in} [1 + (\kappa + \sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2) \cos \Delta\phi + \mu \sin \Delta\phi] \\ &= \frac{1}{4} c_s^4 t_J^4 t^2 P_{in} [1 + V \cos(\Delta\phi - \varepsilon)] \end{aligned} \quad (8)$$

因此干涉仪的输出条纹可见度为 V :

$$V = \sqrt{(\kappa + \sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2)^2 + \mu^2}$$

其中:

$$\kappa = (\cos \alpha_1 \cos \alpha_2 + \sin \alpha_1 \sin \alpha_2 \cos 2\beta_1 \cos 2\beta_2 +$$

$$\sin\alpha_1 \sin\alpha_2 \sin 2\beta_1 \sin 2\beta_2) \cos 2\theta_1 \cos 2\theta_2 \quad (9)$$

$$\mu = 2\operatorname{Re} \{ \{ [\cos 2\theta_1 \cos 2\theta_2 (\sin\alpha_1 \cos\alpha_2 \sin 2\beta_1 - \sin\alpha_2 \cos\alpha_1 \sin 2\beta_2) + (\sin 2\theta_2 \sin\alpha_1 \cos 2\beta_1 \cos 2\theta_1 - \sin 2\theta_1 \sin\alpha_2 \cos 2\beta_2 \cos 2\theta_2)] + j [(\cos 2\beta_1 \sin 2\beta_2 - \cos 2\beta_2 \sin 2\beta_1) \sin\alpha_1 \sin\alpha_2 \cos 2\theta_1 \cos 2\theta_2 + (\sin 2\theta_1 \cos\alpha_2 \cos 2\theta_2 - \sin 2\theta_2 \cos\alpha_1 \cos 2\theta_1)] \} E_x E_y^* \} / P_{in} \quad (10)$$

$$\varepsilon = \arctan \frac{\mu}{(\kappa + \sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2)} \quad (11)$$

$P_{in} = E_{in} \cdot (E_{in}^*)^T$ 为输入光的光强, $(E_{in}^*)^T$ 为 E_{in} 共轭转置矩阵; $\Delta\phi$ 为光通过两臂的相位差, $\Delta\phi = 2(\phi_1 - \phi_2)$; $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$ 分别为光纤干涉仪两臂光纤双折射效应等价椭圆延迟器的延迟角度与偏转角度; θ_1, θ_2 分别为两法拉第旋转镜的旋转角度。

1) 当 $\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ$ 时, 由式(9), (10)得 $\kappa = 0$, $\mu = 0$, 则 $V = \sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2 = \sin 90^\circ \sin 90^\circ = 1$ 。此时干涉仪的输出条纹可见度为恒定值 1, 不受输入光偏振态变化以及光纤双折射的影响, 达到理想的消偏振衰落效果。

2) 当 $\theta_1 = 45^\circ, \theta_2$ 偏离理想的 $45^\circ, \theta_2 = 44^\circ$ 时, 由式(9), (10)得 $\kappa = 0$ 。

$$\mu = 2\operatorname{Re} \{ \cos 2\theta_2 (- \sin\alpha_2 \cos 2\beta_2 + j \cos\alpha_2) E_x E_y^* \} / P_{in} \quad (12)$$

因为 $P_{in} = E_{in} \cdot E_{in}^* = E_x \cdot E_x^* + E_y \cdot E_y^*$, 则 $|2E_x E_y^*| / P_{in} < 1$,

$$\text{因此, } \mu < \cos 2\theta_2 \cdot | - \sin\alpha_2 \cos 2\beta_2 + j \cos\alpha_2 | \cdot |2E_x E_y^*| / P_{in} <$$

$$\cos 2\theta_2 \cdot \sqrt{\sin^2 \alpha_2 + \cos^2 \alpha_2} < \cos 2\theta_2 = 0.035, \text{ 则}$$

$$\text{可见度 } V = \sqrt{(\kappa + \sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2)^2 + \mu^2} = \sqrt{\sin^2 2\theta_2 + \mu^2}。 \text{ 由上式可得:}$$

$$0.999 = \sin 2\theta_2 < V = \sqrt{\sin^2 2\theta_2 + \mu^2} < \sqrt{\sin^2 2\theta_2 + \cos^2 2\theta_2} = 1 \quad (13)$$

3) 当 θ_1, θ_2 都偏离理想的 45° 时, 令 $\theta_1 = 44^\circ, \theta_2 = 46^\circ$ 。此时由式(9), (10)可得 κ, μ 的值都很小, 则输出干涉条纹可见度。

$$V = \sqrt{(\kappa + \sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2)^2 + \mu^2} \geq \sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2 = 0.999; \text{ 又干涉仪输出光强 } P = \frac{1}{4} c_s^4 t_f^2 P_{in} [1 + V \cos(\Delta\phi - \varepsilon)] \geq 0 \text{ 恒成立, 则 } V \leq 1, \text{ 所以此时 } 0.999 \leq V \leq 1。$$

4) 当 Michelson 干涉仪没有法拉第旋转镜时, $\theta_1 = \theta_2 = 0^\circ$ 。

由式(9), (10)得:

$$\kappa = (\cos\alpha_1 \cos\alpha_2 + \sin\alpha_1 \sin\alpha_2 \cos 2\beta_1 \cos 2\beta_2 + \sin\alpha_1 \sin\alpha_2 \sin 2\beta_1 \sin 2\beta_2) \quad (14)$$

$$\mu = 2\operatorname{Re} \{ \{ (\sin\alpha_1 \cos\alpha_2 \sin 2\beta_1 - \sin\alpha_2 \cos\alpha_1 \sin 2\beta_2) + j (\cos 2\beta_1 \sin 2\beta_2 - \cos 2\beta_2 \sin 2\beta_1) \sin\alpha_1 \sin\alpha_2 \} E_x E_y^* \} / P_{in} \quad (15)$$

输出干涉条纹可见度:

$$V = \sqrt{(\kappa + \sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2)^2 + \mu^2} = \sqrt{\kappa^2 + \mu^2} \quad (16)$$

其中, $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 表征干涉仪两臂单模光纤双折射效应引起的近似椭圆延迟器的旋转和延迟角度; E_x, E_y 影响输入光波的光强和偏振特性。则由式(14)~(16)三式可得: Michelson 干涉仪在没有法拉第旋转镜时, 输出干涉条纹可见度 $0 \leq V = \sqrt{\kappa^2 + \mu^2} \leq 1$, 受光纤自身双折射效应、输入光的偏振态和光强特性以及环境的变化影响, 动态变化。

由以上分析可得: 当两法拉第旋转镜旋转角度 $\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ$ 时, 干涉条纹可见度 $V = 1$, 即此时干涉仪干涉条纹可见度恒定为 1, 且不受两臂光纤双折射效应以及输入光波偏振态的影响; 现有法拉第制作工艺的水平能保证旋转角偏差在 $\pm 1^\circ$ 以内, 当两法拉第旋转镜的旋转角都不是理想的 45° , 分别偏差 $\pm 1^\circ$ 时, 输出的干涉条纹可见度 $0.999 \leq V \leq 1$, 仍能达到很高的消偏振衰落效果; 当 Michelson 两臂不使用法拉第旋转镜时, 干涉仪输出条纹可见度, 受光纤自身双折射特性及输入光偏振态和强度的影响, 且随外界环境而变化。

3 实验结果及分析

本实验中, 激光器输出的光, 经过光隔离器和偏振控制器, 进入 Michelson 光纤干涉仪。干涉仪两臂的光, 通过法拉第旋转镜, 被反射后, 在输入端输出并被光电探测器检测, 输出电信号经处理电路得到干涉条纹可见度。干涉仪的臂长为 10m, 两臂的臂长差为 10cm, 法拉第旋转镜旋转角度为 $45^\circ \pm 1^\circ$, 激光器的波长为 1535nm, 线宽小于 1MHz, 干涉仪一臂连接有压电陶瓷管 (PZT) 线圈, 作相位调制器用, 调制频率为 500Hz, PZT 上缠有 3m 普通单模光纤。

实验结果如图 3、4 所示。图 3 表示在没有使用

偏振控制器,输入激光偏振态不受扰动时,干涉仪的干涉条纹可见度图像。上面一条直线是干涉仪在两臂有法拉第旋转镜时的干涉条纹可见度图像,由图可知 $V \geq 0.975$ 并且很稳定;下面的曲线是去掉法拉第旋转镜后,干涉仪的干涉条纹可见度, $V < 0.4$ 并上下波动很大。图4表示偏振控制器正常工作,偏转角度变化为 $10^\circ/10\text{s}$ 时,干涉仪的干涉条纹可见度变化。有法拉第旋转镜时,可见度几乎没有变化, $V \approx 0.98$;去掉法拉第旋转镜后,干涉仪干涉条纹可见度随外界偏振控制器状态在 $0.3 \sim 0.7$ 之间大幅变化。

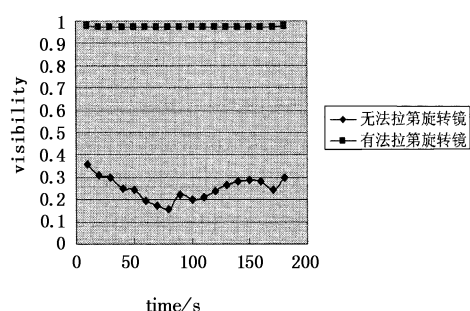


图3 偏振控制器状态不变时干涉仪的干涉条纹可见度

Fig. 3 experiment results of interferometer visibility without polarization controller

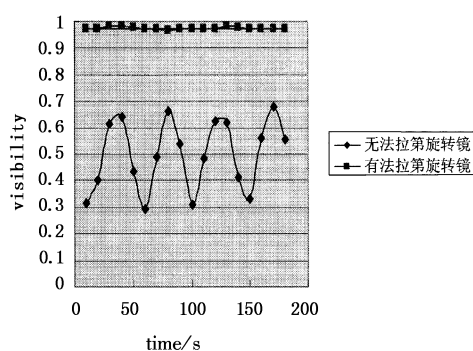


图4 偏振控制器状态改变时干涉仪干涉条纹可见度

Fig. 4 experiment results of interferometer visibility when states of polarization controller changed

上述实验结果表明:在 Michelson 光纤干涉仪两臂加法拉第旋转镜的方法,可以消除普通单模光纤双折射效应的影响,使两臂光信号的偏振态保持一致,得到接近于1并且稳定的干涉条纹可见度信号输出,并且能够消除输入偏振态变化的干扰,与我们的理论分析完全一致。

4 结论

经过理论分析和计算,并通过多次实验,证实了在 Michelson 光纤干涉仪两臂加法拉第旋转镜消除

偏振诱导信号衰落方法的可行性。这种方法结构简单,可行性强,消除偏振衰落效果好,可在实验室以及实用中进行广泛应用。

参考文献:

- [1] K P Koo, A D Kersey. Fiber laser sensor with ultrahigh strain resolution using interferometric interrogation[J]. Electronics Letters, 1995, 31(14): 1180 - 1182.
- [2] David W Stown, Douglas R Moore, Richard G Priest. Polarization fading in fiber interferometric sensors[J]. IEEE Journal of Quantum electronics, 1982, 18(10): 1644 - 1646.
- [3] Wu Yanrong, Guo lixia, Xue Wenrui, et al. Photonic crystal fiber with single polarization[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(4): 593 - 597. (in Chinese)
- [4] Song Mouping, Zhuang Baiyun. Polarization induced fading elimination technique in Brillouin optical time-domain analysis sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(4): 711 - 714. (in Chinese)
- [5] A D Kersey, M J Marrone, A D Dandridge. Polarization diversity detection for fiber interferometers using active feedback control of output polarization-mode selection[J]. Optics Letters, 1990, 15(22): 1315 - 1317.
- [6] A D Kersey, M J Marrone. Input-polarization scanning technique for overcoming polarization-induced Signal fading in interferometric fiber sensors[J]. Electronics Letters, 1988, 24(15): 931 - 933.
- [7] A D Kersey, A Dandridge, A B Tveten. Elimination of polarization induced Signal fading in interferometric fiber sensors using input polarization control[C]//OFS'1988(2): 44 - 47.
- [8] Keith H Wanser, Nabil H Safar. Remote polarization control for fiber-optic interferometers[J]. Optics Letters, 1987, 12(3): 217 - 219.
- [9] A D Kersey, M J Marrone, M A Davis. Polarization-insensitive fiber optic Michelson interferometer[J]. Electronics Letters, 1991, 27(6): 518 - 520.
- [10] Li Zhineng, Shen Liang, Ye Xianfeng. Study of polarization-insensitive fiber optical Michelson interferometric sensors[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2002, 36(1): 44 - 46. (in Chinese)
- [11] Amnon Yariv. Operator algebra for propagation problems involving phase conjugation and nonreciprocal elements. Applied Optics, 1987, 26(21): 4538 - 4540.