

光纤干涉仪消光比调谐方法

缪凯 刘波 林炜 郭澎 王炜男

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

摘要 简要介绍了目前超长距离光纤干涉传感系统的发展现状,并在理论上分析了光纤传感系统中的偏振态对消光比的影响以及能够影响光波偏振态的各种因素。将基于光弹效应的挤压型偏振控制器应用于该系统的消光比调谐,给予光纤干涉臂径向应力,动态调谐系统光波偏振态,实现了长距离光纤传感系统的消光比在一点上的调谐。提出了长距离光纤传感系统灵敏度的新调谐方法,消光比动态调谐范围为 0.21~11.03 dB。

关键词 光纤传感;长距离;偏振控制器;消光比

中图分类号 TP212.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.040603

Tuning of Extinction Ratio of Optical Interferometer

Miao Kai Liu Bo Lin Wei Guo Peng Wang Weinan

(College of Information Technical Science, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract The outline of the current ultra-long distance optical fiber interferometric sensing system development status, the theoretical analysis of the impact of polarization on the optical fiber sensing system, and a variety of factors which can affect the polarization are given. The squeeze-type polarization controller based on photoelastic effect is used to tune the extinction ratio of the system by providing radial stress to fiber interferometer arm, to tune system polarization state dynamically, which makes it possible to moderate the extinction ratio of a long-distance optical fiber sensing system at one point. A novel tuning method to tune the sensitivity of long-distance fiber optic sensing system is proposed, and the range of dynamic extinction ratio of tuning is 0.21~11.03 dB.

Key words fiber sensor; long-distance; polarization controller; extinction ratio

OCIS codes 060.2370; 060.0060; 060.2310

1 引言

由于各个领域对于探测技术精度要求的不断提高,对传感器的灵敏度的要求也越来越高,光纤传感技术为提高传感器的灵敏度和精度提供了可能。由于光纤本身既是传光器件又是传感器件,可以感知外界的振动应变等信息,通过光波在耦合点的干涉来传感外界信息。光纤传感器采用光的波长作为传感参量,故有着极高的灵敏度。近年来,分布式光纤振动传感器的研究国内外研究报道较多^[1~6],即将长距离光纤传感器应用于大范围的安全预警和实时监测中的微振动检测。而长距离光纤传感器的一个缺点在于其灵敏度对于信号的消光比十分敏感,当消光比不能达到理想的程度时,传感器的灵敏度将大大下降。在实际铺设的长距离光纤传感器中,消光比往往不能达到一个理想的程度,而且此参数在时域上也很不稳定。这一点严重制约了长距离光纤传感器的应用。而光波偏振态直接决定了消光比的大小。本文讨论了一种基于光弹效应给予光纤径向应力改变光波偏振态进而动态调谐长距离光纤干涉仪消光比的方法,实现了对于长距离光纤干涉仪消光比在一点的调谐,保证了光纤传感器更高灵敏度的实现。

2 基本理论

在长距离干涉型光纤传感系统中,光的偏振态将直接影响系统的消光比。以马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪

收稿日期: 2010-08-23; **收到修改稿日期**: 2010-11-02

基金项目: 国家大学生创新实验计划(091005514)资助课题。

作者简介: 缪凯(1986-),男,本科,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: delpiero_2008@126.com。

导师简介: 刘波(1975-),男,博士,副研究员,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: liubo@mail.nankai.edu.cn

(通信联系人)

为例,在输入耦合器上输入光的偏振态用 C_i 表示,当信号臂和参考臂的光到达输出耦合器时,它们的偏振态分别以 C_s 和 C_r 表示,则信号光和参考光的光场可分别表示为^[7]

$$E_r = E_0 \sqrt{\alpha_r \kappa_1 \kappa_2} \cos[\omega_0 t + \phi_r + \phi'(t)], \quad (1)$$

$$E_s = E_0 \sqrt{\alpha_s (1 - \kappa_1)(1 - \kappa_2)} \cos[\omega_0(t + \tau) + \phi_s + \phi'(t + \tau)], \quad (2)$$

式中 E_0 表示输入光的振幅, α_s 和 α_r 分别表示信号臂和参考臂的光损失系数, κ_1 和 κ_2 分别为两个耦合器的耦合比, $\phi'(t)$ 为相位随机因子, τ 为两个臂的传输时间延迟差。将 E_s 分解为两个垂直的分量, $E_{s//} = E_s \cos \eta$ 和 $E_{s\perp} = E_s \sin \eta$, 其中 $E_{s//}$ 与 E_r 平行。则输出光强可表示为^[7]

$$I = I_0 [\alpha_r \kappa_1 \kappa_2 + \alpha_s (1 - \kappa_1)(1 - \kappa_2) + 2 \cos \eta \sqrt{\alpha_r \alpha_s \kappa_1 \kappa_2 (1 - \kappa_1)(1 - \kappa_2)} \gamma(\tau) \cos(\phi_r - \phi_{s//})], \quad (3)$$

式中 $\phi_{s//}$ 为 $E_{s//}$ 的相位, $\gamma(\tau)$ 为自相干系数。

信号消光比可表示为

$$V = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}). \quad (4)$$

代入光强表达式得

$$V = \frac{2 \cos \eta \sqrt{\alpha_r \alpha_s \kappa_1 \kappa_2 (1 - \kappa_1)(1 - \kappa_2)} \gamma(\tau)}{\alpha_r \kappa_1 \kappa_2 + \alpha_s (1 - \kappa_1)(1 - \kappa_2)}, \quad V_0 = \frac{2 \sqrt{\alpha_r \alpha_s \kappa_1 \kappa_2 (1 - \kappa_1)(1 - \kappa_2)}}{\alpha_r \kappa_1 \kappa_2 + \alpha_s (1 - \kappa_1)(1 - \kappa_2)}, \quad (5)$$

式中 $\gamma(t) \approx 1$, V_0 为消光比可达到的最大值。则当两臂传输延时远小于光源相干时间时消光比可表示为

$$V = V_0 \cos \eta, \quad (6)$$

式中角 η 取决于 C_s 和 C_r 在邦加球上的夹角。由(6)式可以看到信号消光比与光波的偏振态有着直接的关系,若要达到良好的消光比调谐,通过改变光波偏振态即可实现。而基于应力双折射现象对光纤施加径向应力可以改变光纤内光的偏振态。当光纤中的光沿 z 方向传输 δz 时,其偏振态的变化为 C 点绕 $O\Omega$ 轴的旋转角度 $\delta\theta$ 为^[8]

$$\delta\theta = \sqrt{(k_{11} - k_{12})^2 + 4k_{12}k_{21}} \delta z = |\Omega| \delta z, \quad (7)$$

式中

$$|\Omega| = \sqrt{(k_{11} - k_{12})^2 + 4k_{12}k_{21}}, \quad (8)$$

$O\Omega$ 轴为由径向应力方向确定的邦加球上的一个方向,其大小为单位长度光纤双折射引起的相位差,其方向用邦加球方位角表示^[8]

$$2\zeta = \arg k_{12}, \quad (9)$$

$$2\chi = \arctan[(k_{11} - k_{12}) / \sqrt{k_{12}k_{21}}], \quad (10)$$

式中 k_{ij} 为耦合系数。对于本文采用的应力双折射有^[9]

$$|\Omega| = \frac{4n^3}{\pi} \frac{(1 + \sigma)}{Y} (P_{12} - P_{11}) \frac{f}{2A}, \quad (11)$$

式中 A 为光纤半径, $2A = 250 \mu\text{m}$, 折射率 $n = 1.47$, SiO_2 的杨氏模量 $Y = 6.5 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, SiO_2 的泊松比 $\sigma = 0.16$, 弹光系数 $P_{12} = 0.27$, $P_{11} = 0.12$, f 为作用在单位长度上的径向外力。由此可得总的双折射改变量为

$$\int \frac{4n^3}{\pi} \frac{(1 + \sigma)}{Y} (P_{12} - P_{11}) \frac{f}{2A} dx = \frac{4n^3}{\pi} \frac{(1 + \sigma)}{Y} (P_{12} - P_{11}) \frac{F}{2A}, \quad (12)$$

式中 F 为作用在光纤侧面的总外力。当 $\frac{4n^3}{\pi} \frac{(1 + \sigma)}{Y} (P_{12} - P_{11}) \frac{F}{2A} k_0 = 2\pi$ 时,即可使光波偏振态沿某一轴在邦加球上转动一周。因此当构造两个不同方向的径向外力时,可使偏振态沿两个互相垂直轴在邦加球上转动,即可实现对偏振态的调谐,从而可以到达 $\eta = 0$ 的状态,即获得最大的消光比。

3 实验结果

根据分析原理,构造了一个基于悬臂梁的偏振控制器如图 1 所示^[10]。底座上设置玻璃衬底,在梁下表面固定平面施压体。将光纤排布于两个平行的施压体和衬底之间,调整施压体和衬底之间的距离,使无外力时恰好无径向应力作用于光纤上。将两个施力点之间的光纤扭转了 90° 。

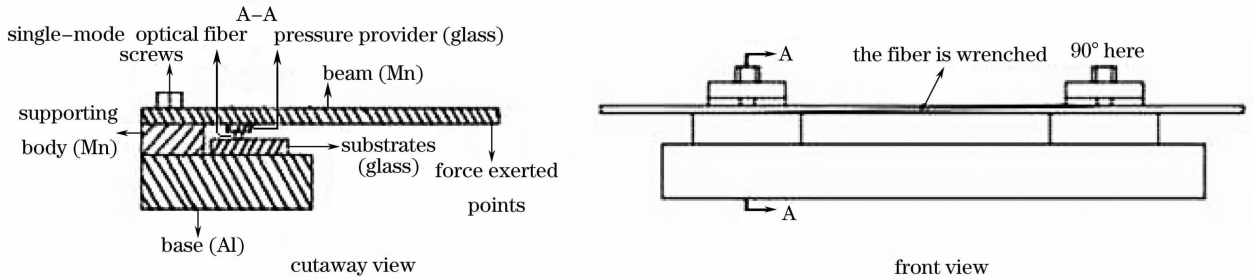


图1 偏振控制器

Fig. 1 Polarization controller

根据弹性力学的相关知识,悬臂梁外力与其提供给光纤的径向应力具有关系:

$$F' = \frac{1}{2} \left(3 \frac{l}{x_0} - 1 \right), \quad (13)$$

式中 $l=8.5$ cm,为臂梁的总长; $x_0=1.5$ cm,为施压体到支撑体的距离。由此计算得,当固定一端施加的径向应力,另一端在 $0\sim 460$ g 变化时,可以使其绕某一轴沿邦加球遍历一周。当两端施加的径向应力在 $0\sim 460$ g 连续变化时,可能遍历整个邦加球。

由于在本特性实验中马赫-曾德尔干涉仪和迈克耳孙干涉仪有着相同的性质,故可采用迈克耳孙干涉仪进行研究。两干涉臂分别长 5 m,以萨尼亚克(Sagnac)环作为反射镜,如图 2 所示。分别在 Sagnac 环上和干涉臂上进行偏振调谐实验。

图 2 为 Sagnac 环的偏振调谐实验中,固定左端位点施予的径向应力为 100 g 时,消光比随另一端径向应力的改变的曲线图。其绕某一轴沿邦加球遍历了一周,得到了比较好的正弦线型及消光比在 $0.25\sim 4.10$ dB 之间调谐,并在径向应力为 460 g 及 480 g 时达到极大值 4.10 dB。同时改变左右两端位点施予的径向应力在 $0\sim 680$ g 的范围内改变,得到消光比随两位点施予的径向应力的三维曲面图,如图 3 所示。偏振态遍历了整个邦加球或邦加球上一个带状区域。消光比在 $0.20\sim 4.65$ dB 之间得到调谐,且在左端施予的应力为 320 g,右端为 350 g 时,得到消光比最大值为 4.65 dB。

由上述实验结果可知,在实验中固定某一应力而动态调整另一应力,可得到消光比的周期性变化,应力致其变化的周期为 640 g,这可能是由于 Sagnac 光纤环境自身的干涉造成的。而两臂应力同时动态调整时实现了一个最佳的信号消光比调谐,达到了预期的目的。

图 4 则为干涉臂的偏振调谐实验中,固定左端位点给予应力为 200 g,消光比随另一端给予应力的变化曲线图。偏振绕某一轴邦加球转动一周,得到了消光比在 $0.47\sim 11.03$ dB 之间的调节,并在右端施加的应力为 60 g 及 80 g 时调谐到最大值,即 11.03 dB。同时改变左右两个位点给予的径向应力在 $0\sim 500$ g 及 $0\sim 400$ g 的范围内改变,得到消光比随两位点施予的径向应力的三维曲面图,如图 5 所示。消光比在 $0.21\sim 11.03$ dB 之间

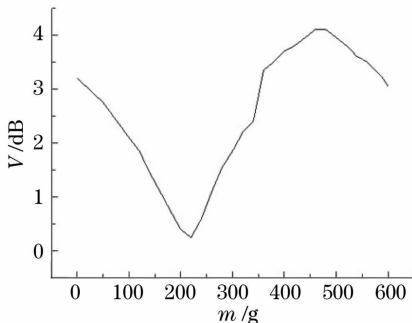


图2 Sagnac 环上消光比随右端径向应力的改变曲线图
(左端径向应力为 100 g)

Fig. 2 Curve of extinction ratio on the Sagnac ring changing with the right radial stress (left radial stress 100 g)

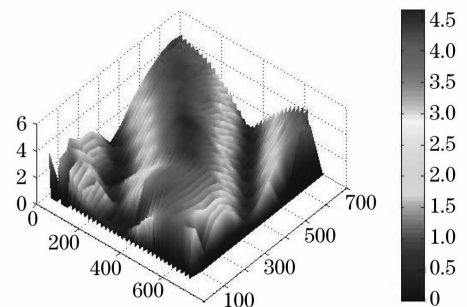


图3 Sagnac 环上消光比随两点施予的径向应力的三维曲面图

Fig. 3 Extinction ratio of Sagnac ring changes with the two radial stress

得到调谐,且在左端施予的应力为 60 g 及 80 g,右端为 200 g 时,得到消光比调谐的最大值为 11.03 dB。

实验结果分析可知,在干涉臂偏振调谐实验中也得到了消光比的周期性变化,应力致其变化的周期为 450 g,与理论分析符合较好。两臂应力同时动态调整实现了一个最佳的信号消光比调谐,达到了预期的目的。然而,在固定一端应力,消光比随另一端应力变化的曲线上的有一个未预期的次极大,分析可能是通过扭转应变没有使两个位点的径向应力实现正交。

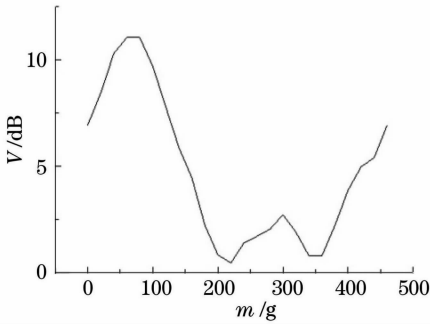


图 4 干涉臂上消光比随右端径向应力的改变曲线图
(左端径向应力为 200 g)

Fig. 4 Curve of extinction ratio on the interferometric beam changing with the right radial stress (left radial stress 200 g)

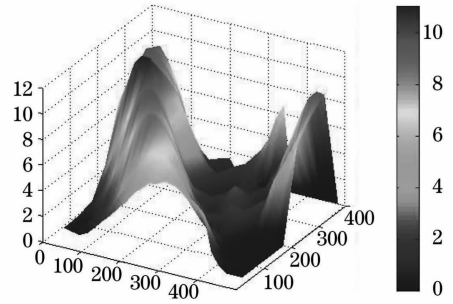


图 5 干涉臂上消光比随两位点施予的径向应力的
三维曲面图

Fig. 5 Extinction ratio of interferometric beam changes with the two radial stress

4 结 论

分析了基于迈克耳孙干涉仪的分布式光纤传感系统,组建了基于悬臂梁的消光比调谐系统,实现消光比在较大范围内的调谐。实验证明,固定一个位点施加的径向应力,消光比随另一位点的应力呈周期性变化,与实验理论分析基本一致,并实现消光比在 0.20~4.65 dB(Sagnac 环)与 0.21~11.03 dB(干涉臂)的调谐。基于正交径向应力的消光比调谐系统为光纤中偏振的调谐提供了新的方法。

参 考 文 献

- Li Jianzhong, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. Distributed fiber-optic intrusion sensor system based on POTDR[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(11): 2789~2794
李建中,饶云江,冉曾令等. POTDR 分布式光纤传感及其在安防监测中的应用[J]. *光子学报*, 2009, **38**(11): 2789~2794
- N. J. Frigo, A. Dandridge, A. B. Davis *et al.*. Technique for elimination of polarization fading in fibre interferometers[J]. *Electron. Lett.*, 1984, **20**(8): 319~320=3 A. D. Kersey, M. J. Marrone, M. A. Davis *et al.*. Polarization-insensitive fibre optic Michelson interferometer[J]. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(6): 518~520
- Rachid Gafsi, Mahmoud A. El-Sherif. Analysis of induced-birefringence effects on fiber Bragg gratings[J]. *Optical Fiber Technology*, 2000, **6**: 299~323
- Fan Yanping, Chen Mingxing, Wu Jiandong *et al.*. A novel distributed fiber-optic Sagnac sensor for eliminating dead zone [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(7): 140~143
范彦平,陈明星,巫建东等. 一种抑制传感死区的 Sagnac 分布式传感器[J]. *光电工程*, 2009, **36**(7): 140~143
- Song Muping, Li Zhicheng, Qiu Chao. A 50 km distributed optical fiber sensor based on Brillouin optical time-domain analyzer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1426~1429
宋牟平,励志成,裘超. 50 km 长距离布里渊光时域分析分布式光纤传感器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1426~1429
- A. D. Kersey, M. J. Marrone, A. Dandridge *et al.*. Optimization and stabilization of visibility in interferometer fiber-optic sensors using input-polarization control[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(10): 1599~1609
- Liao Yanbiao. Polarization Optics[M]. Beijing: Science Press, 2003. 167
廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 167
- Luo Jianhua. Study on a Active Fiber Grating Sensing Technology[D]. Tianjin: Nankai University, 2005. 51~60
罗建华. 光纤光栅有源传感技术的研究[D]. 天津: 南开大学, 2005. 51~60
- Haruhito Shimizu, Shuntaro Yamazaki, Takashi Ono *et al.*. Highly practical fiber squeezer polarization controller[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(10): 1217~1224