

文章编号: 0258-7025(2009)03-0727-05

基于保偏光纤的高精度光纤光栅传感解调方案

张锦龙^{1,2} 王葵如¹ 余重秀¹ 忻向军¹ 林妹妹¹ 赵德新¹

(¹ 北京邮电大学电子工程学院教育部光通信与光波技术重点实验室, 北京 100876)

² 河南大学物理与电子学院, 河南 开封 475001

摘要 提出一种基于线偏振光干涉原理的无源波长解调系统。在普通光纤环境中引入双折射效应。光纤环境的反射(透射)光强是耦合器分光比 K 、温度 t 、保偏光纤长度 L 和两端偏振方向夹角 φ 的函数。在单调区间内反射(透射)光强与 t 存在对应关系。通过测定光强可求得 t 。利用矩阵光学原理建立理论模型,研究了保偏光纤长度、耦合器耦合系数、偏振光入射夹角对光纤环镜(FLM)反射(透射)光强与入射光波长关系影响的特性,设计了基于保偏光纤环境的分辨率可控的干涉型解调仪。用自制光纤光栅作为传感头监测温度变化,数据显示该系统对温度的测量平均精度可达 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$, 准确度 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

关键词 光纤光学; 传感解调; 光纤环镜; LabVIEW

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093603.0727

A High-Precision Demodulation Scheme for Fiber Grating Sensors Based on Polarization-Maintaining Fiber

Zhang Jinlong^{1,2} Wang Kuiru¹ Yu Chongxiu¹ Xin Xiangjun¹ Lin Meimei¹ Zhao Dexin¹

¹ Key Laboratory of Optical Communication and Lightwave Technologies, Ministry of Education, School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunication, Beijing 100876, China
² School of Physics and Electronics, Henan University, Kaifeng, Henan 475001, China

Abstract A passive wavelength demodulation system based on linearly polarized light interference principle is proposed. Leading-in a section of polarization-maintaining fiber to the common fiber loop mirror (FLM) is equivalent to leading-in birefringence effect to the common FLM. As the parameters of polarization-maintaining fiber are determined, the value of effectual refractive index difference is fixed and the reflective (transmission) light intensity of the FLM becomes a function of the coupler's prismatic ratio K , the temperature t , the length of the polarization-maintaining fiber L and the included angle of the polarization directions in the two ends. When the fabric is determined, there exists a corresponding relation between the reflective (transmission) light intensity and t in the monotonic interval. The theoretical model is established according to the matrix optics principle. The impact characteristics to the relation between the reflective (transmission) light intensity of FLM and the incidence light wavelength from the length of polarization-maintaining fiber, the coupling coefficient of coupler and the incidence included angle of the polarization light are researched. Using fiber grating as the sensing head to monitor the variation of temperature, the data show that the system's average measuring precision of the temperature can be up to $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ and the veracity can be up to $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Key words fiber optics; sensor demodulation; fiber loop mirror; LabVIEW

收稿日期: 2008-08-16; **收到修改稿日期**: 2008-10-26

基金项目: 国家自然科学基金(60677003)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NECT-07-0111)和教育部光通信与光波技术重点实验室(北京邮电大学)开放基金资助课题。

作者简介: 张锦龙(1977—),男,博士研究生,讲师,主要从事光纤传感和光纤通信等方面的研究。

E-mail: ZJL@henu.edu.cn

导师简介: 余重秀(1946—),女,教授,博士生导师,主要从事光交换、光纤通信和光纤传感技术等方面的研究。

E-mail: cxyu@bupt.edu.cn

1 引 言

作为一种新型的传感器,光纤布拉格光栅(FBG)具有良好的稳定性、可靠性、对电磁波的不敏感性、小尺寸、适于在高温、腐蚀性或危险性环境使用的优点。适用于高楼、道路、桥梁、大坝等基础设施健康状况的传感、测控,因此各种光纤布拉格光栅传感系统得到了快速的发展并转入商用化应用。目前国内外研究的解调方法有很多,其中干涉解调法分辨率最高,但干涉解调方案易受环境影响;还有些解调方法存在成本较高、有可动部件等问题;对于分布式传感环境,适用的网络传输协议有待进一步研究,这些因素限制了无线传感网络的实用化^[1~8]。本文设计一种基于保偏光纤的光纤光栅无线传感网络。建立理论模型,采用矩阵光学的方法分析光纤长度、耦合器系数、偏振光入射角度对光纤环镜(FLM)参数特性的影响;从网络数据分布的角度出发,优化设计了S-MAC协议,更好地解决了空间侦听问题。设计了专用于该解调结构的基于LabVIEW的参数测定软件和系统监控软件。

2 理论分析

基于光纤耦合器的FLM是一种简单且具有宽带特性的反射镜。如图1所示,输入光场 A_i 经宽带耦合器分为相位差 $\pi/2$ 的两束光 A_1, A_2 ,分别沿光纤环相向传输一周后回到耦合器。两束光沿同一路径传输,返回后在耦合器内发生干涉,理想情况下,二者光程相同。根据耦合器传输矩阵知,反向传输的两束光相位差和耦合器耦合系数决定了输出光 A_r, A_t 的功率分配。所研究的均为低功率信号,自相位调制和交叉相位调制引起的相移可忽略;光纤长度很短,光纤的损耗可忽略。对于普通FLM,若

采用3 dB耦合器,即 $\rho=0.5$,则 $T=0$,所有输入光将全部被反射。

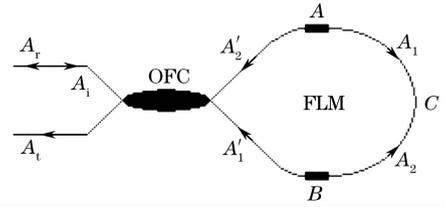


图1 FLM结构示意图

Fig.1 Sketch map of FLM

本系统采用的FLM结构是在普通光纤环镜ACB段用保偏光纤代替单模光纤,即在普通FLM中引入双折射效应。虽然相向传输的两束光走的是同一根光纤,二者的双折射强度相同,但由于两束光进入保偏光纤的偏振方向与保偏光纤快轴(慢轴)夹角不同,使两束光经过保偏光纤时产生的相位延迟也不同。因此,A、B两点相当于旋光器的作用, A_r, A_t 的功率分配将受光纤耦合器的分光比和两束光偏振方向与保偏光纤的夹角影响。利用矩阵光学原理建立描述该光路的传输矩阵^[9~11]:

耦合器返回光场和输出光场满足

$$[A_1^{x(y)}]' = \mathbf{T}_{\text{SMF}} \mathbf{T}_{\text{X1}} \mathbf{T}_{\text{PCF}} \mathbf{T}_{\text{X2}} \mathbf{T}_{\text{SMF}} A_1^{x(y)},$$

$$[A_2^{x(y)}]' = \mathbf{T}_{\text{SMF}} [\mathbf{T}_{\text{X2}}]^T [\mathbf{T}_{\text{PCF}}]^T [\mathbf{T}_{\text{X1}}]^T \mathbf{T}_{\text{SMF}} A_2^{x(y)},$$

其中耦合器传输矩阵

$$\mathbf{T}_{\text{OFC}} = (1-\gamma)^{1/2} \begin{bmatrix} (1-K_{x(y)})^{1/2} & jK_{x(y)}^{1/2} \\ jK_{x(y)}^{1/2} & (1-K_{x(y)})^{1/2} \end{bmatrix},$$

γ 为耦合器损耗系数, K_x, K_y 分别为耦合器快、慢轴分光比。忽略耦合器的损耗,忽略偏振效应对耦合系数的影响,即 $K_x = K_y = K$,则

$$\mathbf{T}_{\text{OFC}} = \begin{bmatrix} (1-K)^{1/2} & jK^{1/2} \\ jK^{1/2} & (1-K)^{1/2} \end{bmatrix}.$$

保偏光纤传输矩阵

$$\mathbf{T}_{\text{PCF}} = \begin{bmatrix} \cos(\delta/2) + j\sin(\delta/2)\cos\varphi & j\sin(\delta/2)\sin\varphi \\ j\sin(\delta/2)\sin\varphi & \cos\delta - j\sin(\delta/2)\cos\varphi \end{bmatrix},$$

式中 φ 为偏振光场 A_1, A_2 从保偏光纤A、B两端入射时偏振方向夹角。

δ 为光场经过保偏光纤快慢轴后产生的相位差,满足关系式:

$$\delta = \frac{2\pi \cdot B_m L}{\lambda},$$

式中 $B_m = |n_x - n_y|$ 是保偏光纤模式双折射度, L 为保偏光纤长度, λ 为入射光波长。光纤光栅反射波

长 λ 与温度呈线性关系: $\lambda = \lambda_0 + Ct$,其中 λ_0 为 0°C 时光纤光栅的反射波长, C 为光纤光栅的温度系数, t 为温度。

忽略光纤损耗,将以上各传输矩阵联合求解得^[11]:

反射光强

$$E_r = A_r \cdot A_r^* = \left[4K(1-K) - 2K(1-K)\sin^2\varphi + 2K(1-K)\sin^2\varphi \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot B_m L}{\lambda_0 + Ct}\right) \right] \cdot (A_i A_i^*), \quad (1)$$

透射光强

$$E_t = A_t \cdot A_t^* = \left[(2K-1)^2 + 2K(1-K)\sin^2\varphi - 2K(1-K)\sin^2\varphi \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot B_m L}{\lambda_0 + Ct}\right) \right] \cdot (A_i A_i^*), \quad (2)$$

令

$$Y = \frac{E_r - E_t}{E_r + E_t} = Y_1 + Y_2 \cos\left(\frac{2\pi \cdot B_m L}{\lambda_0 + Ct}\right), \quad (3)$$

$$Y_1 = (8K - 8K^2 - 1) - (4K - 4K^2)\sin^2\varphi, \quad Y_2 = (4K - 4K^2)\sin^2\varphi, \quad (4)$$

由(3)式分析知,在保偏光纤参数确定时,有效折射率差为定值,光纤环境的反射光强(透射光强)是耦合器分光比 K , 温度 t , 保偏光纤长度 L 和两端偏振方向夹角 φ 的函数。当参数 K, L, φ 确定, E_r, E_t 随温度的变化曲线具有由参数 K, L, φ 确定的直流分量。

可见, Y 值的大小只与结构参数 K, L, φ 和温度 t 有关,与光源入射总功率、系统损耗、单模光纤长度无关。当参数 K, L, φ 确定,在单调区间内 Y 与 t 存在对应关系, Y_1 是由参数 K, L, φ 确定的 Y 变化曲线的直流分量, Y_2 为交流分量幅值。

由以上分析可知,采用保偏光纤结构的 FLM, 在单调区间内 Y 与 t 存在对应关系。通过测定 Y 值可求得 t , 因此该结构可应用于光纤光栅传感系统。

3 数值仿真

根据(3)式通过数值计算研究各参数对 Y 和 λ 对应关系特性的影响。

如图 2 所示,图 2(a)是耦合器耦合系数 K 分别为 0、0.25、0.5、0.75、1 时 Y 和 λ 关系图,由图可知当 $K=0.5$ 时 Y 随 λ 变化灵敏度最高,直流分量 $Y_1=0.5$,交流幅值 $Y_2=0.5$; K 接近 0 或 1 时 Y 随 λ 变化灵敏度为 0; K 值越接近 0.5 时 Y_1, Y_2 越大,灵敏度越高。故在传感系统中应选用 K 接近 0.5 的。

图 2(b)是 L 分别为 0.5 m、1 m、1.5 m、2 m 时 Y 和 λ 关系图。由图可知, L 增加则 Y 随 λ 变化灵敏度增加; L 的大小对 Y 直流分量 Y_1 和交流幅值 Y_2 均无影响,此时 $Y_1=0.25, Y_2=0.75$ 。理论上应选取尽量长的保偏光纤以达到更高的检测灵敏度,

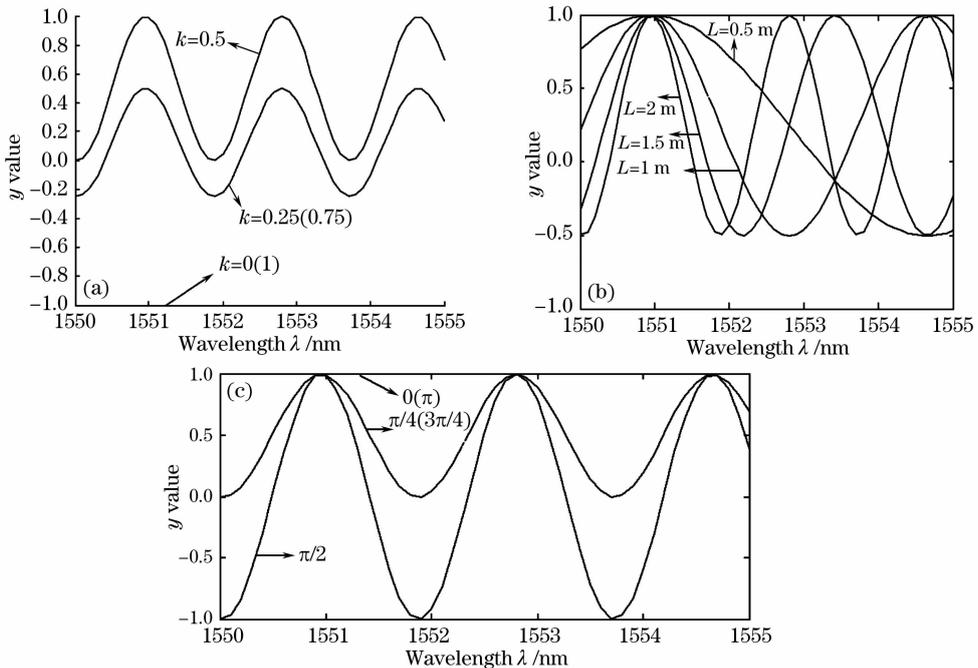


图 2 K, L, φ 变化时反射率 Y 和波长 λ 关系图。(a) K 取不同值时 Y 和 λ 关系; (b) L 取不同值时 Y 和 λ 关系; (c) φ 从 0 到 π 变化 Y 和 λ 关系

Fig. 2 Relation between Y - λ when K, L, φ changed. (a) Relation between Y - λ when k changed; (b) relation between Y - λ when L changed; (c) relation between Y - λ when φ changed

但从图可以看出 Y 随 λ 呈周期性变化, L 越长则周期越短, 传感系统中只能选取其中一段单调区间进行检测, 故应根据所需检测温度范围选取合适的长度 L 。

图 2(c) 是 φ 为 $0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4, \pi$ 时 Y 和 λ 关系图。由图可知当 $\varphi=0, \pi$ 时 Y 始终为 1, 随 λ 变化灵敏度为 0, 这时无无论 λ 如何变化 Y 均不变, 光纤环境退化为普通 FLM; 当 $\varphi=\pi/2$ 时 Y 随 λ 变化灵敏度最高; φ 值越接近 $\pi/2$ 时 Y_1 越小、 Y_2 越大, 灵敏度越高。故在搭建传感系统时应尽量使 φ 接近 $\pi/2$ 。

由仿真结果知, Y_1, Y_2 的大小只与结构参数 K, L, φ 有关。 Y_1 代表 Y 随 λ 变化的直流分量, 越小越好, Y_2 反映了 Y 随 λ 变化灵敏度, 越大越好。与理论分析结果一致。

4 传感器结构

由以上分析可知, 采用保偏光纤结构的 FLM, 在单调区间内 Y 与 t 存在对应关系。通过测定 Y 值可求得 t , 因此该结构可应用于光纤光栅传感系统。系统结构如图 3 所示。

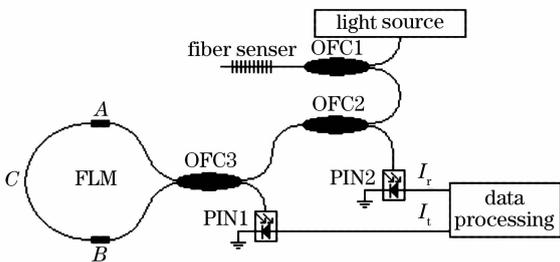


图 3 无线传感网络子节点结构原理图

Fig. 3 Principle figure of wireless sensor network node structure

由(3)式、(4)式得

$$t = \frac{2\pi \cdot B_m \cdot L}{C} - \frac{\lambda_0}{C}, \quad (5)$$

$$\arccos \left[\frac{E_r - E_i - Y_1 E_r - Y_1 E_i}{(E_r + E_i) Y_2} \right]$$

参数测定软件测出 Y_1, Y_2 后, 输入解调系统监控软件, 监控软件再将接收到的数据按(5)式处理即可求得温度 t 并实时显示温度曲线。

光路部分由宽带光源发出的宽光谱经光纤光栅反射后被耦合器分成两束光沿 FLM 相向传输一周后返回并干涉, 反射光由耦合器输出, 透射光由另一耦合器输出。依据(1)式、(2)式分析知, 两光强与光波长存在对应关系。

电路部分控制核心采用 8 位的 51 内核单片机。由 PIN 管将光强转化为电流, 再由 $I-U$ 转换电路转

化为电压信号并放大, 接着由单片机控制 A/D 转换电路采集电压信息, 最后由单片机接收来自控制中心的指令并将数据发送给控制中心进行处理。单片机运行程序要实现调整 $I-U$ 转换电路放大参数、控制 A/D 电路进行转换并采集数据进行预处理、接收来自控制中心的指令、按照指令发送数据等功能。

5 测试结果

可调谐激光器在 1550~1560 nm 范围内多次扫描, 参数测定软件采集数据并计算 Y_1, Y_2 值。图 4 所示为参数测定软件采集到的几组 $Y-\lambda$ 数据图。

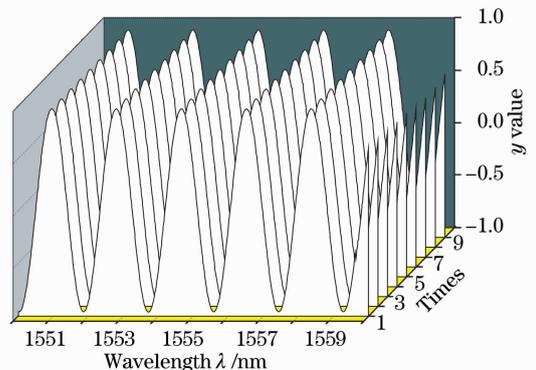


图 4 $Y-\lambda$ 数据图

Fig. 4 Data between $Y-\lambda$

依据以上数据可求得 Y_1, Y_2 的值。

采用该装置对热水降温过程实时采集, 数据显示该系统对温度的测量平均精度可达 $0.03\text{ }^\circ\text{C}$ (相当于 $0.3\text{ }\mu\text{m}$), 准确度 $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$ (相当于 $1\text{ }\mu\text{m}$)。由于普通光栅反射谱带宽 (约 0.1 nm) 比激光器宽, 且温度升高引起的光栅反射谱展宽均导致精度降低, 因此实际测量精度和准确度低于用激光器模拟温度变化时测量结果。

6 结 论

建立了传感系统结构的理论模型, 分析了系统结构参数对光纤环境特性的影响, 设计了基于保偏型 FLM 的光纤光栅传感解调系统和基于 LabVIEW 的参数测定软件、解调系统监控软件, 并对系统进行了实验验证, 理论分析与数值仿真结果和实验相吻合。该解调方案采用全光纤结构, 易于实现小型化, 有较好的偏振独立性和稳定性。参数测定软件和解调系统监控软件的设计降低了对搭建光路系统的设备要求, 使得该系统更易于脱离实验室进入应用领域, 对光纤光栅传感器的应用具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 Sang Xinzhu, Yu Chongxiu, Yan Binbin *et al.*. Chemical sensor based on a fiber Bragg grating[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, **14**(5): 771~774
桑新柱, 余重秀, 颜玢玢等. 基于光纤布拉格光栅的化学传感器[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(5): 771~774
- 2 Rao Yunjiang, Luo Xiaodong, Ran Zengling. A 100 km fiber Bragg grating sensor system based on swept laser and optical amplification[J]. *Chinese J. Laser*, 2007, **34**(5): 680~683
饶云江, 罗小东, 冉曾令. 基于扫描激光器和光放大的 100 km 光纤布拉格光栅传感系统[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5): 680~683
- 3 Tang Qingtao, Rao Yunjiang, Zhu Tao *et al.*. High-resolution signal demodulation method for fiber optic Fabry Péro t multiplexing system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1353~1357
唐庆涛, 饶云江, 朱涛等. 光纤法-珀传感系统高分辨率复用信号解调方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10): 1353~1357
- 4 Yu Youlong, Tan Huayao. Active spatial wavelength-division multiplexed fiber Bragg grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(2): 131~134
余有龙, 谭华耀. 有源波、空分复用光纤光栅传感网络[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(2): 131~134
- 5 Jinlong Zhang, Chongxiu Yu, Kuiru Wang *et al.*. Demodulation system for phase-locked fiber grating sensors based on XPM[C]. *SPIE*, 2007, **6781**: 6781-2L
- 6 Yu Youlong, Tan Huayao, Chung Yongkang. A fiber Bragg grating sensor system with interferometric demodulation technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(8): 987~989
余永龙, 谭华耀, 鍾永康. 基于干涉解调技术的光纤光栅传感系统[J]. *光学学报*, 2001, **21**(8): 987~989
- 7 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
- 8 Zhuang Qiren, Gong Dongmei, Zeng Yongxi. Influence of chirp effect s on FBG wavelength-matched demodulation precision and it's elimination [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, **13**(3): 364~370
庄其仁, 龚冬梅, 曾永西. 啁啾效应对 Bragg 波长匹配解调精度的影响与消除[J]. *光学精密工程*, 2005, **13**(3): 364~370
- 9 Zhang Jinlong, Yu Chongxiu, Wang Kuiru *et al.*. The displacement sensor with temperature compensation based on chirp fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 779~781
张锦龙, 余重秀, 王葵如等. 基于啁啾光纤光栅的温度自补偿位移传感器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 779~781
- 10 Qiao Xueguang, Jia Zhenan, Fu Haiwei *et al.*. Theory and experiment about in-fiber Bragg grating temperature sensing[J]. *Acta Physics Sinica*, 2004, **53**(2): 494~497
乔学光, 贾振安, 傅海威等. 光纤光栅温度传感理论与实验[J]. *物理学报*, 2004, **53**(2): 494~497
- 11 Seung-hwan Chung, Jungho Kim, Bong-Ahn Yu *et al.*. A fiber Bragg grating sensor demodulation technique using a polarization maintaining fiber loop mirror[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, (13): 1343~1345