

# 光纤线双折射对光栅磁场传感器性能影响的理论分析

彭 晖 苏 洋 李玉权

(解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)

**摘要** 给出了基于偏振效应的光纤光栅磁场传感器的方法。为了降低传感器中线双折射对传感系统输出的影响, 提高测量系统的稳定性, 利用琼斯矩阵对线双折射及入射起偏角对系统输出特性的影响进行了理论推导及仿真, 研究了系统对线双折射变化的敏感度大小与起偏角的关系, 确定了最佳起偏角。以最佳起偏角入射, 可以将系统对线双折射变化的敏感度降到最低, 提高系统的稳定性和可靠性, 为光纤光栅磁场传感器的实用化设计提供了参考。

**关键词** 光栅传感器; 电磁测; 线双折射; 起偏角; 琼斯矩阵

中图分类号 TP212.13 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200835s2.0196

## Research of the Effect of the Linear Birefringence on the Performance of FBG Sensor For Measuring Magnetic Field

Peng Hui Su Yang Li Yuquan

(*Institute of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology,*  
*Nanjing, Jiangsu 210007, China*)

**Abstract** The methods of electromagnetic sensor with fiber grating based on the polarized effect were discussed. The effect of the linear birefringence and the incident polarizing angle on the output performance of the sensor were derived using Jones matrix and the simulations were made. The research on the relationship between the sensitivity of the sensor to the linear birefringence and the incident polarizing angle has been made. The results show that when incident polarizing angle has some special values the sensitivity of the system to the linear birefringence will be minimized and the stability of the system will be enhanced.

**Key words** fiber optical sensors; electromagnetic measurement; linear birefringence; incident polarizing angle; Jones matrix

### 1 引 言

光纤传感器是 20 世纪 80 年代伴随着光导纤维及光通信技术的发展而逐步发展起来的新型传感器。利用光纤传感器可以测量压力、温度、应变、磁场、电流、电压等参数, 还便于实现分布式测量。光纤光栅由于其突出的优点, 越来越被大量的研究人员青睐, 并广泛的应用于通信与传感器系统。目前研究基于光纤光栅的磁场传感器主要集中在利用磁致伸缩材料测量布拉格波长的漂移<sup>[1~3]</sup>。现在一

些研究人员已经开始在利用光纤光栅的偏振效应进行传感实验, 例如温度和应力的传感<sup>[4,5]</sup>。本文提出了利用光纤光栅的偏振效应测量外界磁场的方法。主要的原理就是利用磁场引起的法拉第效应, 利用线偏振光入射, 由于磁场的作用左旋和右旋在磁场作用下其传输常数会改变, 导致两者在光栅中的投射能量系数会有差别即偏振相关损耗, 测量出 PDL 即可以反推外界磁场大小<sup>[6]</sup>。

基于偏振效应的光纤光栅磁场传感器结构简

**基金项目:** 国家自然科学基金(60871075)资助项目。

**作者简介:** 彭 晖(1979—)男, 博士研究生, 主要从事光传感方面的研究。E-mail: maomaopenghui99@tom.com

**导师简介:** 李玉权(1944—)男, 教授, 博士生导师, 主要从事电磁场与微波技术、光信息技术方面的研究。

E-mail: proflyq@126.com

单,尺寸小,动态范围大等优点,适合于各种磁场的测量。然而要将其付诸实用还有一段距离,其主要原因在于光纤的线双折射效应。光纤中的线双折射除了光纤固有的以外,还随外界环境、应力等条件变化,影响了传感器的灵敏度和稳定性。因此研究系统对于线双折射的敏感度对于光纤光栅磁场传感器的实用化很重要。本文介绍了基于偏振效应的光纤光栅磁场传感器系统结构。利用琼斯矩阵分析了线双折射和入射起偏角对系统性能的影响,确定了最佳起偏角,提高了系统的稳定性。

## 2 基于偏振效应的光纤光栅磁场传感器原理

### 2.1 法拉第效应

所谓法拉第效应<sup>[4]</sup>是指在磁场作用下光纤中传输的左旋和右旋圆偏振光有效折射率会稍有差异,其差为

$$n_{\text{eff L}} - n_{\text{eff R}} = \frac{VH\lambda}{\pi} \quad (1)$$

其中下标 L,R 分别表示左旋光和右旋圆偏振光,  $V$  为韦尔代(Verdet)常数。石英光纤在 1300 nm 波长附近的 Verdet 常数大约为  $8 \times 10^{-1} \text{ rad/T} \cdot \text{m}$ 。  $H$  为磁场强度。

### 2.2 光纤布拉格光栅(FBG)的偏振相关损耗

偏振相关损耗(PDL)<sup>[7~9]</sup>定义为两个偏振模之间的差分损耗。对于 FBG,其 PDL 则为

$$PDL(\lambda) = \left| 10\lg\left(\frac{T_L(\lambda)}{T_R(\lambda)}\right) \right| / \text{dB} \quad (2)$$

式中  $T_L(\lambda)$  和  $T_R(\lambda)$  分别表示左旋和右旋圆偏振光的能量透射系数。根据模耦合理论可得光栅的能量透射系数

$$T_{L(R)}(\lambda) = \left| t_{L(R)}(\lambda) \right|^2 = \frac{\alpha_{L(R)}^2}{\sigma_{L(R)}^2 \sinh^2(\alpha_{L(R)}L) + \alpha_{L(R)}^2 \cosh^2(\alpha_{L(R)}L)} \quad (3)$$

式中  $\alpha_{L(R)} = (\kappa^2 - \sigma_{L(R)}^2)^{1/2}$ ,  $\kappa = \nu\pi\delta n / \lambda$ ,  $\sigma_{L(R)} = 2\pi n_{\text{eff}}(1/\lambda - 1/\lambda_{B,L(R)}) + 2\pi\delta n / \lambda$ ,  $\kappa$  为交流耦合系数,  $\nu$  为折射率变化的条纹可见度,一般为常数,本文中取 1。  $\sigma$  为直流耦合系数,其值与折射率有关,  $L$  为光栅长度,  $n_{\text{eff}}$  为有效折射率,  $\delta n$  为折射率调制系数,  $\lambda_B$  为布拉格波长。

在外加磁场的的作用下,左旋和右旋偏振光的布拉格波长发生了改变,这样就引起了光栅的 PDL。根据(2)、(3)式,略去中间推导过程,可以将 PDL 表示为

$$PDL(\lambda) = \left| 10\lg \frac{\frac{\alpha_L^2}{\kappa_L^2 \cosh^2(\alpha_L L) - \sigma_L^2}}{\frac{\alpha_R^2}{\kappa_R^2 \cosh^2(\alpha_R L) - \sigma_R^2}} \right| / \text{dB} \quad (4)$$

根据(4)式可以得到 PDL 的示意图如图 1 所示。

在  $(\sigma/\kappa)^2 \gg 1$  的条件下,(4)式可以近似简化为

$$PDL(\lambda) = 80H\kappa \frac{n_{\text{eff}}V\lambda\Delta}{(\ln 10)\lambda_B^2\sigma_L\sigma_R} (\text{dB}) \quad (5)$$

式中  $\lambda_B$  为没有磁场作用条件下的布拉格波长,在测量的磁场动态范围内,  $\sigma_L$ ,  $\sigma_R$  可以近似认为是不变的。在这些合理的近似条件下,由(5)式可见,PDL 是波长与磁场  $H$  大小的函数,固定任一波长,PDL 值与磁场成正比。利用该特性,可以用来测量磁场的大小,为了便于测量,一般采用 PDL 的峰值来测量磁场。

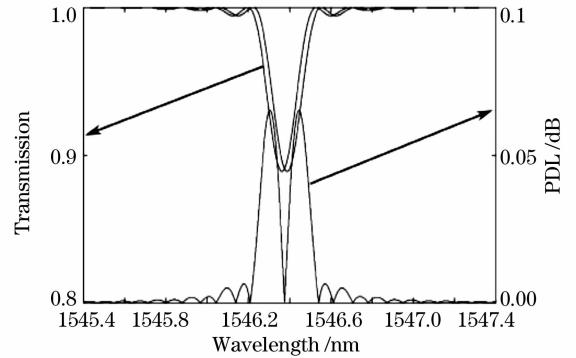


图 1 左(右)旋圆偏振光的透射能量系数与 PDL  
Fig. 1 Transmission coefficients (for two modes) and PDL evolution with wavelength

利用 PDL 与外加磁场的这一关系,可以进行磁场测量,测量系统结构框图如图 2 所示,激光器发出宽谱光,利用起偏器将线偏振光入射到光纤光栅,利用解调模块和信号处理模块进行处理,最后得到外加磁场的大小。通过该方法进行磁场测量的实验结果已经在光学学报发表<sup>[6]</sup>。

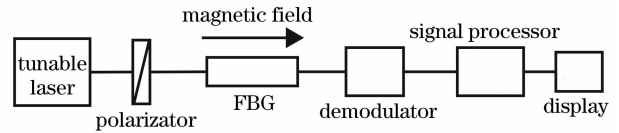


图 2 基于偏振效应的光纤光栅电磁场测量实验系统  
Fig. 2 Magnetic field measurement system base on the polarization effect of fiber grating

## 3 测量系统的琼斯矩阵分析

目前常用的 G. 652 光纤中,是存在线双折射的,量级在  $10^{-7}$  左右,而且双折射还会随外界环境变化而变化。在光栅的制作过程中,由于曝光的照

射,也会造成光栅的线双折射。一般选用的光栅长度在 10 cm 左右,因此假设存在的线双折射均匀分布,当在光的传播方向上存在平行的磁场时,将同时产生磁光效应和线双折射效应。

假设起偏角为为  $\varphi$  时,入射光矢量为  $\mathbf{E}_I = \begin{bmatrix} \cos\varphi \\ \sin\varphi \end{bmatrix}$ 。文献[10]给出了既有法拉第效应又有线

$$\text{双折射的传感头的琼斯矩阵 } \mathbf{J} = \begin{bmatrix} A & -B \\ B & A^* \end{bmatrix}$$

式中  $A = \cos(\frac{\Delta}{2}) + j\cos\varphi\sin(\frac{\Delta}{2})$ ;  $B = \sin\varphi\sin(\frac{\Delta}{2})$ ;  $(\frac{\Delta}{2})^2 = (\frac{\delta}{2})^2 + \theta^2$ ;  $\sin\varphi = \frac{2\theta}{\Delta}$ ;  $\cos\varphi = \frac{\delta}{\Delta}$ ;  $\delta$  反映了由线双折射引入的相位延迟;  $\theta$  为磁光晶体中的法拉第旋转角。

将入射光分解为左旋和右旋圆偏振光为

$$\mathbf{E}_I = \begin{bmatrix} \cos\varphi \\ \sin\varphi \end{bmatrix} = \frac{\cos\varphi}{2} \left( \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix} \right) + \frac{j\sin\varphi}{2} \left( \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix} \right) \quad (6)$$

式中令  $\mathbf{E}_{XL} = \frac{\cos\varphi}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{E}_{XR} = \frac{\cos\varphi}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{E}_{YL} = -\frac{j\sin\varphi}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{E}_{YR} = \frac{j\sin\varphi}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix}$ , 这四个电场分量

对应着不同的折射率。 $n_{XL(R)} = n_{\text{eff}} + \delta \pm \frac{\Delta n}{2}$ ,  $n_{YL(R)} = n_{\text{eff}} - \delta \pm \frac{\Delta n}{2}$ , 其中  $R$  取正号,  $L$  取负号, 其中  $\Delta n$  表示(1)式中给出的左右旋折射率之差。

光纤光栅对偏振态是不敏感的,只对折射率敏感,因此在没有磁场作用下,光栅对左旋和右旋圆偏振光的透射率是相同的,在磁场作用下,其透射率将会发生变化。

根据第二节的介绍四个电场分量相应的透射系数为  $\tau_{X(Y)L(R)}$ , 因此各个电场通过光纤光栅后的输出电场为

$$\mathbf{E}_o = \tau \begin{bmatrix} A & -B \\ B & A^* \end{bmatrix} \mathbf{E}_I \quad (7)$$

最后系统的输出 PDL 即为

$$PDL = \left| 10\lg \frac{\mathbf{E}_{XL,o}^2 + \mathbf{E}_{YL,o}^2}{\mathbf{E}_{XR,o}^2 + \mathbf{E}_{YR,o}^2} \right| \quad (8)$$

可见 PDL 同时受到线双折射,磁场大小及起偏角的影响,理想情况是 PDL 只受磁场变化的影响,因此线双折射和起偏角将影响传感系统的测量结果。

### 4 仿真与分析

从以上的分析中可以发现,系统输出 PDL 受到起偏角和线双折射的影响,根据前面的理论来仿真分析线双折射和起偏角对系统 PDL 输出的影响,仿真中采用的光栅长度为 20 mm,调制深度为  $2.4e^{-5}$  的均匀光栅。

首先考虑固定磁场大小,对不同的双折射,起偏角对系统输出的影响做仿真分析,如图 3 所示。图中的起偏角范围取  $0 \sim \pi$ ,线双折射取  $0 \sim 5e^{-7}$ 。

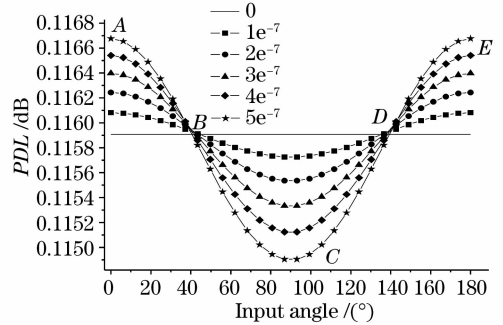


图 3 起偏角对系统输出的影响

Fig. 3 Effect of polarizing angle upon the output performance

从图中可以看出系统输出随光纤的线双折射和起偏角的变化而变化。当线双折射为 0 时,输出与起偏角大小无关。而当线双折射不为零时,输出随起偏角近似余旋曲线变化,线双折射越大,曲线幅度越大。曲线的相交点(图中 B, D 点)对应着系统对线双折射敏感最低的地方;而曲线的最高点和最低点(A, C, E)则对应着系统对线双折射变化最敏感的起偏角,从图中可以看出,最佳起偏角约为  $41^\circ$ 。

然后从另一个角度进行论证,固定磁场,研究不同起偏角情况下,双折射对系统输出的影响,仿真如图 4 所示。

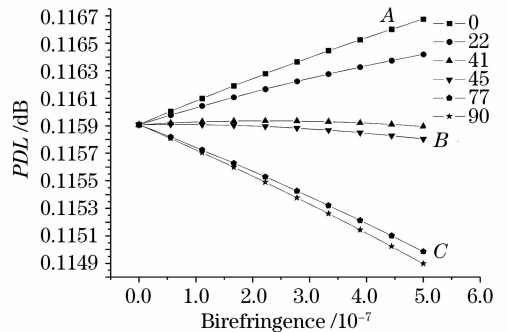


图 4 不同起偏角下线双折射对系统性能的影响  
Fig. 4 Effect of the linear birefringence on the performance under different polarizing angle

仿真中取交点、波峰、波谷以及其他中间值进行比较。曲线的斜率越小,系统输出对线双折射变化的敏感度越低。从图中可以看出,输出曲线的变化范围在波峰与波谷对应的起偏角之间(曲线 A 和 C 之间)。在交点出的斜率最小(曲线 B),即为系统对线双折射变化最不敏感的起偏角设置。波谷和波峰处对应的斜率最大,即对应着最敏感的起偏角设置,这与图 3 的结论是一致的。

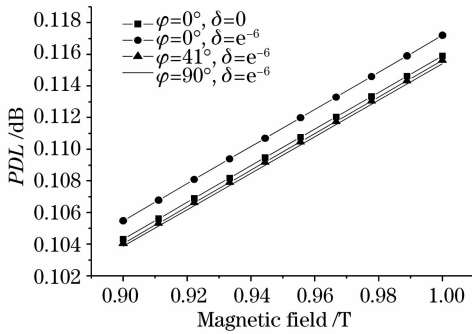


图 5 不同起偏角和线双折射下磁场与系统输出的关系  
Fig. 5 Relationship between the magnetic field and output under different polarizing angle and linear birefringence

讨论磁场大小与输出的关系,如 5 图所示,磁场取 0.9 T 到 1T,分别取线折射为 0 和  $1e^{-6}$ ,起偏角分别为  $0^\circ, 41^\circ, 90^\circ$ ,从图中可以看到:(a)在相同线双折射下, $\varphi = 41^\circ$ 时所引起的误差小于  $\varphi = 0^\circ$  或  $90^\circ$  时的情况;(b)线双折射由 0 增加到  $e^{-6}$  时, $\varphi = 41^\circ$ 所引起的输出变化远小于  $\varphi = 0^\circ$  或  $90^\circ$  所引起的变化。因此合理设置起偏角可以减少线双折射引起的误差。

综上所述,对于任意磁场,其最佳起偏角是固定的。与理想输出相比,线双折射使输出产生误差,并且误差的大小随入射起偏角而变化。因此设定最佳起偏角可以降低输出对线双折射的敏感度,提高系统的稳定性,增加磁场测量的准确度。

## 5 结 论

本文给出了一种利用偏振效应测量磁场的光纤光栅传感器的系统框图。理论上研究了线双折射以及起偏角对光纤光栅磁场传感器的影响,利用琼斯

矩阵推导了输出信号与线双折射以及起偏角之间的函数关系。并研究了系统对线双折射变化的敏感度与起偏角的关系,确定了最佳起偏角,并进行了仿真验证。研究表明在系统设计中,在尽可能减少光纤双折射影响的同时应该合理的设计入射光的入射角度,本文通过仿真证明最佳起偏角为  $41^\circ$ ,而且该起偏角不随磁场的变化而改变,设置最佳起偏角可以尽可能将系统对双折射变化的敏感度降到最低,提高系统稳定性,为基于偏振效应的光纤光栅磁场传感器的实用化提供了参考。

## 参 考 文 献

- Wang Limeng, Zhu Ronghua. Sensing scheme for magnetic field with fiber bragg grating [J]. *Laser&infrared*, 1999, **29**(4): 238~242  
王黎蒙,朱荣华. 光纤布喇格光栅磁场传感方案[J]. 激光与红外, 1999, **29**(4): 238~242
- He Wanxun, Shi Wenkang, Ye Ailun. Realization of long period fiber grating based on magnetic field sending scheme [J]. *Optical Technique*, 2001, **27**(6): 545~546  
何万迅,施文康,叶爱伦. 基于长周期光纤光栅的磁场传感方案的实现[J]. 光学技术, 2001, **27**(6): 545~546
- Zhang Hucheng, Li Yuquan. Magnetic field sensor based on fiber bragg grating [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2004, **5**(2): 33~35  
张虎成,李玉权. 基 FBG 的磁场传感器实验设计方案[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2004, **5**(2): 33~35
- S. Bette, C. Caucheteur et al.. Spectral Characterization of Differential Group Delay in Fiber Bragg Grating Written into Hi-Bi Optical Fiber. [C]ECCO 2005 Proceedings, **3**: 131
- C. Caucheteur, S. Bette, R. Garcia-Olcina. Transverse strain measurements using the birefringence effect in fiber Bragg grating [J]. *IEEE Photo Technology Letter*, 2007, **13**(19): 966~968
- Peng Hui, Su Yang, Li Yuquan. Measurement for magnetic field with fiber grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1717~1722  
彭 晖,苏 洋,李玉权. 基于光纤光栅的磁场测量新方法[J]. 光学学报, 2008, **28**(9): 1717~1722
- Ping Lu, Dan Grobncic, Stephen J. Mihailov. Characterization of the birefringence in fiber Bragg gratings fabricated with an ultrafast-infrared laser [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(3): 779~786
- A. D. Kersey, M. J. Marrone. Fiber Bragg Grating High-Magnetic-Field Probe [C]. *SPIE*, 1994, **2360**(9): 53~56
- Turan Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- W. J. Tabor, F. S. Chen. Electromagnetic propagation through materials possessing both Faraday rotation and birefringence: Experiments with Ytterbium Orthoferrite [J]. *J. Appl. Phys.*, 1969, **40**(7): 2760~2765