

基于光栅透射光斯托克斯参量的实时压力传感方法及性能优化

苏 洋 张宝富 朱 勇 叶振兴 彭 晖

(解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要 提出了基于光纤光栅透射光斯托克斯参量测量的新型实时压力传感方法。深入分析了透射光第一斯托克斯参量和压力所致线双折射之间的单调变化关系。分析表明,入射线偏振光入射角度以及相应测量波长点的选择对系统灵敏度、线性度及动态范围有重要影响。利用光纤光栅和高速在线检偏器搭建了实时压力测量系统,实验数据验证了压力和透射光第一斯托克斯参量之间的单调变化关系,证明了此方法的可行性。最后对实验误差和系统性能进行了分析并提出了改进方案。

关键词 光栅;光纤光栅;压力传感;线双折射;斯托克斯参量

中图分类号 TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1128002

Real-Time Pressure Measurements Using Stokes Parameter in Fiber Bragg Gratings and the Performance Analysis

Su Yang Zhang Baofu Zhu Yong Ye Zhenxing Peng Hui

(Institute of Communications Engineering, Chinese People's Liberation Army University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China)

Abstract A novel real-time pressure measurement using Stokes parameter of fiber Bragg gratings (FBG) in transmission is proposed. It is analyzed that the first Stokes parameter of the transmitted light in FBG has monotonous relationship with linear birefringence induced by pressure. The simulations show that the choices of incident angle and the wavelength points have an important effect on the sensitivity, the linearity of the sensor and dynamic range. Experimental results obtained on fiber Bragg gratings transversally loaded by an external force confirm the simulated evolutions. The performances are analyzed and the solutions are proposed to improve the system.

Key words gratings; fiber Bragg gratings; pressure sensor; linear birefringence; Stokes parameter

OCIS codes 280.4788; 280.5475; 050.2770; 260.1440; 260.5430

1 引 言

光纤光栅(FBG)作为一种成熟的全光纤器件,由于其具有体积小、插入损耗低、易于与其他光纤器件集成等特点,在光纤传感领域中有着非常重要的应用。目前主要用于温度、应力等参量的传感测量,其测量原理主要是利用外界参量变化引起的光纤光栅的折射率或光栅周期的变化从而导致布拉格波长发生偏移,通过测量偏移量达到传感的目的^[1~3]。这种方法主要是要解决各种因素的交叉敏感问题。

近年来的研究表明,光参数中的偏振特性也会对外界变量敏感^[4~6]。在前期的工作中,本课题组提出了光栅透射光的第一斯托克斯参量 s_1 与线双折射呈单调递增关系^[6]。而光栅中线双折射大小会随压力而改变。因此,通过测量一定波长范围内的 s_1 参量便能感知光栅的受力情况。本文研究了基于光栅透射光第一斯托克斯参量的实时压力测试原理,并搭建实验系统进行测试,对测量结果进行了分析,并提出了后期性能优化的方案。

收稿日期: 2012-05-07; **收到修改稿日期**: 2012-06-04

基金项目: 国家自然科学基金(60871075),国家自然科学基金青年基金(61107074)和江苏省自然科学基金(BK2012508)资助课题。

作者简介: 苏 洋(1980—),女,博士,讲师,主要从事光传感技术方面的研究。E-mail: qieziyangyang@163.com

2 基础理论

理想的单模光纤纤芯是规则的圆,光的电场矢量在各个方向上的传播速率相同。而当对光纤施加一定的压力时,其纤芯就近似成为一个椭圆。光的电场矢量在长轴方向上的传播速度较慢,称为慢轴;在短轴方向上速度较快,便为快轴,这就是光纤的线双折射效应。研究表明,光栅压力 F 和双折射 Δn 之间的关系可表示为^[7~9]

$$\Delta n = \frac{F(K_x - K_y)}{LD}, \quad (1)$$

式中 F 为光纤光栅上的压力, D 为光纤直径,普通单模光纤直径约为 $125 \mu\text{m}$, L 为光纤受力长度,快慢轴上常数分别为 $K_x = 7.73 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$, $K_y = -1.54 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$ 。

当光在理想的光纤光栅中传输时,不同偏振态的入射光将有着同样的传输谱。但是如果光纤光栅中存在线双折射,两个本征模(x 模和 y 模)折射率之间存在 Δn 的差值,即两个方向的有效折射率分别为 $n_{\text{eff},x} = n_{\text{eff}} + \Delta n/2$ 和 $n_{\text{eff},y} = n_{\text{eff}} - \Delta n/2$ 。此时光纤光栅的复传输系数 t 就会演变成两个传输系数 t_x 和 t_y ,不同的偏振主态有着不同的光功率损耗,对应的 x 和 y 方向光的强度和相位便会随着传输系数之间的差别发生变化,这些变化导致了透射光的斯托克斯参量发生相应的变化^[6]。

假设入射的是起偏角为 φ 的线偏振光,输入光矢量为

$$\begin{bmatrix} E_{i,x} \\ E_{i,y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{bmatrix}, \quad (2)$$

则透射光为

$$\begin{bmatrix} E_{o,x} \\ E_{o,y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_x \cos \varphi \\ t_y \sin \varphi \end{bmatrix}, \quad (3)$$

根据斯托克斯参量的定义

$$S_0 = |E_{ox}|^2 + |E_{oy}|^2, \quad S_1 = |E_{ox}|^2 - |E_{oy}|^2, \quad (4)$$

得到归一化第一斯托克斯参量 s_1 的表达式为

$$s_1 = \frac{S_1}{S_0} = \frac{|E_{ox}|^2 - |E_{oy}|^2}{|E_{ox}|^2 + |E_{oy}|^2}. \quad (5)$$

图 1(a) 是线双折射作用下的透射光第一斯托克斯参量的变化情况,其中光栅长度 8 mm,折射率调制系数 1×10^{-4} ,入射偏振角度 45° 。从图 1(a) 可以看到中心波长的两边 x 线偏振和 y 线偏振分别各占优势, s_1 幅度随双折射的增加而增加。图 1(b) 是 s_1 峰值随双折射的变化曲线,可以看到在一定范围之内, s_1 峰值与线双折射呈单调变化关系,之后随着线双折射的进一步增加进入饱和区域,这个饱和区域决定了测量范围。在双折射较小时,它和双折射之间呈线性变化关系,如果能实时测量 s_1 参量的数值就可以实现对压力的实时监测。

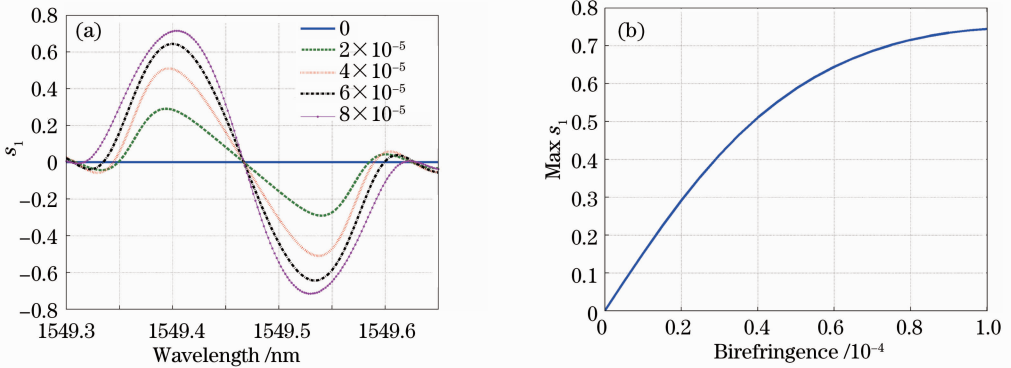


图 1 (a) 线双折射对 s_1 参量谱的影响; (b) s_1 峰值与线双折射的关系

Fig. 1 (a) Wavelength dependency of the first Stokes parameter for different birefringence; (b) evolution of maximum s_1 values as function of birefringence

3 性能仿真

除了光栅长度和折射率调制系数,偏振光入射角度的选择对测量性能有较大影响。在不同的起偏角下, s_1 的幅度随起偏角的变化整体逐渐上移或下移。图 2 为光栅参量条件不变的情况下,偏振光入射角为 $\pi/6$ 和 $\pi/3$ 时的 s_1 曲线,此时基本值不再为

0,而是分别围绕 0.5 和 -0.5 变化。与 45° 的对称情况不同,此时左右数值出现了不对称,其左、右峰值波长点(相对于中心波长点)变化量表现出了不同的灵敏度和线性度。对于 $\pi/6$ 时,短波长点的测量更早地进入了饱和区,而在 $\pi/3$ 时,情况则正好相反。

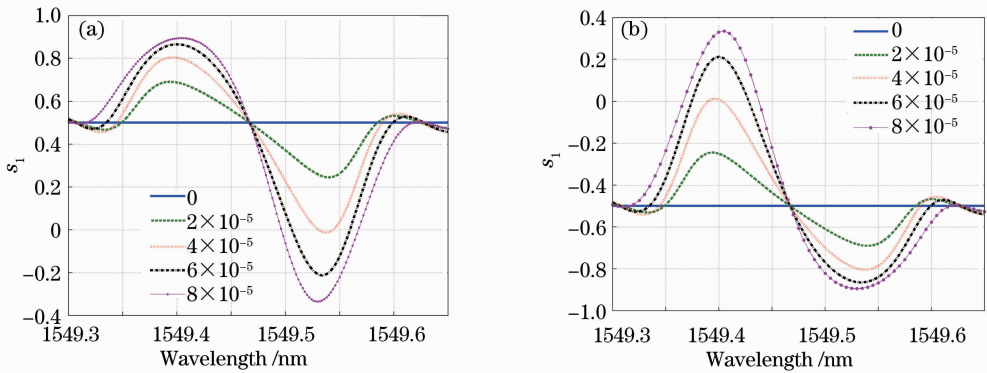


图 2 偏振光入射角度分别为(a) $\pi/6$ 和(b) $\pi/3$ 时 s_1 曲线

Fig. 2 s_1 curves with incident angles of (a) $\pi/6$ and (b) $\pi/3$

图 3 为不同起偏角下, s_1 峰值变化量灵敏度的比较, 仿真实验中选取了多种起偏角度, 结果表明起偏角对测量灵敏度有很大影响, 综合比较而言, 当起偏角为 $\pi/4$ 时, 具有较高的灵敏度, 越偏离 $\pi/4$, 灵敏度越低。

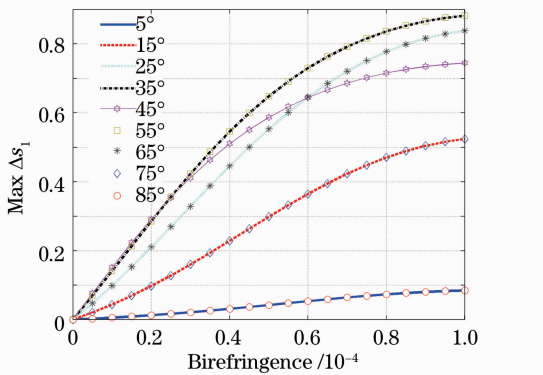


图 3 偏振角度对测量灵敏度的影响

Fig. 3 Influence of incident angle on the sensitivity

在图 1(a)和图 2 的仿真实验中, s_1 参量的峰值对应的波长点是随线双折射发生变化的。如果实验中要采取实时测量, 则要固定波长点。以图 2(a) $\pi/6$ 时的情形为例, 仿真了单波长点测量时 s_1 变化值 Δs_1 与线双折射之间的关系, 如图 4 所示。图 4 中分别取短波长方向的 1549.4 nm 和长波长方向的 1549.52 nm、1549.54nm 作为固定测量波长点, 并与两个方向上的 s_1 峰值变化进行比较。

由图 4 结合图 2 的 s_1 谱可以看到: 1) 在单波长测量时, 在不同起偏角时, 选取短波长方向还是长波长方向的波长点, 对灵敏度、线性度和动态范围有很大影响。综合比较而言, 在入射角度为 $\pi/4$ 时, 具有最好的灵敏度和较好的线性度, 而且左右对称; 如果入射角度小于 $\pi/4$ 时, 为了具有比较好的线性度和线性范围, 则要选择 s_1 参量的长波长测量点; 而在入射角度大于 $\pi/4$ 时, 则需选择短波长测量点。2)

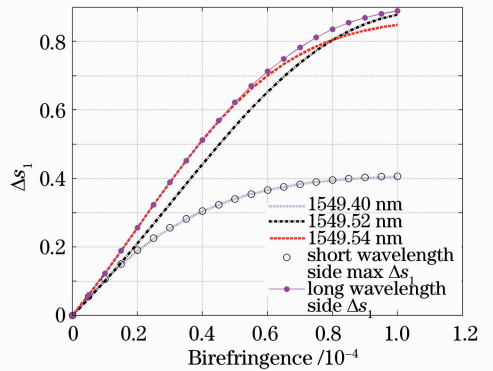


图 4 $\pi/6$ 时不同固定波长点以及峰值波长测量曲线比较

Fig. 4 Evolution of Δs_1 as function of birefringence with different wavelengths when the incident angle is $\pi/6$

对于同一端不同的波长点测量曲线的灵敏度和线性范围也有差别, 但都能在一定的范围内保持线性变化关系。

4 实 验

根据上面的仿真结果, 搭建了基于光纤光栅偏振效应的压力传感系统, 其系统框图如图 5 所示。利用普通单模光纤制作了中心波长在 1549.46 nm, 长度为 8 mm, 折射率调制系数 1×10^{-4} 的均匀光纤光栅作为压力感应器件。可调谐激光器发出一定波长的激光, 进入工作波长为 1550 nm 的在线起偏器, 输出线偏振光进入光纤光栅, 利用不同重量的砝码在光栅上施加压力引入不同大小的线双折射, 从而引起 s_1 偏振参量的改变。光路中光隔离器用来隔离并减少光纤光栅和各光器件接头上的反射信号的影响, 偏振控制器(PC)用来调节和补偿光路中普通单模光纤引入的相位差, A、B、C、D 是光纤连接端口。

偏振检测部分采用 General Photonics(GP)公司的高速在线检偏模块, 输出四路模拟电压信号, 利

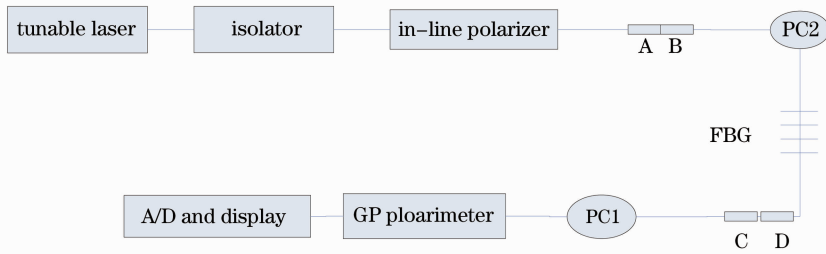


图 5 光纤光栅压力测量系统

Fig. 5 Pressure measurement system based on fiber gratings

用实验室自制的数据采集系统,将四路模拟电压信号转换成数字信号(A/D),并利用 GP 模块所提供的 1550 nm 处的校正矩阵,实时检测出 4 个斯托克斯参量,并显示在实时偏振检测软件界面上。

利用以上测量系统,将光纤光栅固定在水平的平台上,通过向光纤光栅施加不同重量的砝码(50~

500 g)来改变光栅的线双折射,并通过调节在线起偏器和光纤光栅输入接口的角度来改变偏振光的输入角度。测量波长点选取为 1549.52 nm,分别测量了在不同偏振光入射角度($\pi/6, \pi/4, \pi/3$)时的 s_1 参量值,其中 $\pi/4$ 入射光测量了两次,以检验重复性,测量结果如表 1 所示。

表 1 不同入射角度时单波长测量点的 s_1 参量数值

Table 1 Values of s_1 for different incident angles of linearly polarized light

Weight /g	Measurement wavelength (1549.52 nm) s_1			
	$\pi/4$ (first)	$\pi/3$	$\pi/6$	$\pi/4$ (second)
0	0.010	-0.512	0.492	0.008
50	-0.075	-0.579	0.444	-0.062
100	-0.128	-0.634	0.391	-0.121
150	-0.198	-0.673	0.356	-0.180
200	-0.238	-0.688	0.312	-0.237
250	-0.271	-0.732	0.274	-0.266
300	-0.302	-0.762	0.242	-0.329
350	-0.382	-0.792	0.193	-0.371
400	-0.393	-0.791	0.177	-0.386
500	-0.426	-0.793	0.121	-0.425

前面仿真实验证明了线双折射和 s_1 之间的关系,而实验数据得到的是砝码质量(即压力)和 s_1 参量的关系,因此要引入压力和线双折射之间的关系,建立压力-线双折射- s_1 参量三者之间的对应关系,才能对理论曲线和实验数据进行比较。根据第 2 节的理论,在本光栅参数条件下,计算得到压力 F 和

双折射之间的关系为 $F = 1.078 \times 10^5 \times \Delta n$,考虑到实验中压力的范围在 0~4.9 N 之间,因此,线双折射的范围在 0~ 5.2822×10^{-5} 范围之内,属于测量范围之内。将具体光栅参数下的压力 F 与线双折射的关系代入,再转换成砝码质量,得到理论上 s_1 与砝码质量的关系曲线,结合表 1 的试验数据,得到

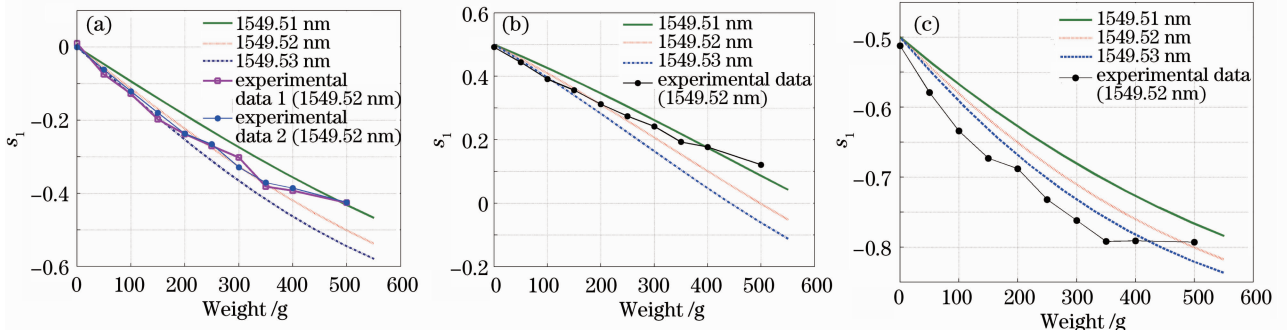


图 6 起偏角分别为(a) $\pi/4$, (b) $\pi/6$ 和 (c) $\pi/3$ 时的实验和理论曲线比较

Fig. 6 Comparison of the simulation and experimental values with the incident angles of (a) $\pi/4$, (b) $\pi/6$ and (c) $\pi/3$

如图 6 所示的仿真结果和实验数据的对比图。

从实验数据和理论数据的比较可以看出：

- 1) 三种角度下的实验数据都表明了 s_1 参量和压力(砝码质量)之间存在着单调变化关系,证明了利用 s_1 参量进行实时压力测量的可行性;
- 2) $\pi/4$ 入射时的两次实验值具有较好的重复性,并与 1549.52 nm 波长点上的理论曲线较为吻合,线性度较好;
- 3) $\pi/6$ 入射时实验值总体在理论值附近,线性度都比较好,随着砝码质量的增加,偏差变大,趋向于 1549.51 nm 的理论曲线;
- 4) $\pi/3$ 入射时实验值线性度较差,这和理论仿真以及前面的分析吻合,实验值的单调变化关系依然存在,但与理论曲线相比差异较大。

实验中分析了引起实验数据和理论曲线误差的因素有如下几点：

- 1) 首先实际制作的光栅具体参数和理论值仿真值有一定的差别,这就会引起实际 s_1 参量谱分布与理论仿真在波长分布上的差异。从上面的 s_1 参量谱就可以看到,选择不同的波长点就会带来不同的测量曲线斜率;
- 2) 在施加砝码的过程中有可能带来一定的应力,从而引起光栅中心波长的漂移;
- 3) 光源中心波长的微小漂移和线路的抖动等因素,也会使实际的透射谱中心波长和 s_1 参量波长测量点发生移动,导致精度变差。

可以看到各种因素引起的波长点的漂移是影响测量数据线性度和灵敏度的重要因素,应该采用各种方法予以解决。另外为了验证 s_1 压力测量的实时性,在同样的实验条件下,在光纤光栅上放一块平

面玻璃,并在玻璃上放置持续震动的手机,此时实时偏振检测软件界面如图 7 所示,加在光纤光栅处的压力随着手机震动频率而变化,此时 s_1 参量值也随着震动频率进行周期性变化,这说明该系统可实时测量压力的变化。

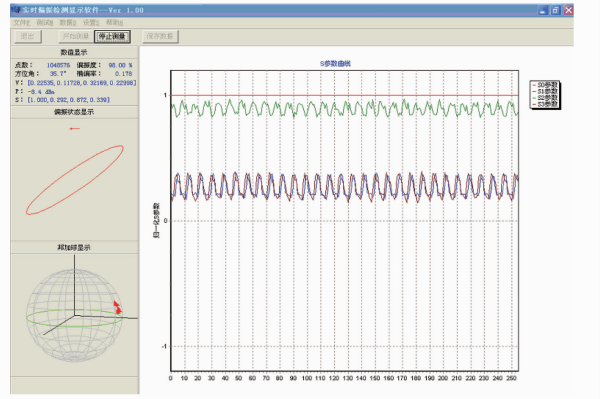


图 7 手机震动压力的 Stokes 参量显示界面

Fig. 7 Interface showing Stokes parameters under the load of a mobile vibrating

5 性能优化方案

5.1 三角形光栅

在上面的误差分析中,一个重要的影响就是各种因素引起的波长漂移。为了解决这个问题,可以通过设计光栅的结构,使其 s_1 参量的峰值波长具有一定的宽度,在这个带宽内, s_1 值能维持稳定,这样就可以在一定程度上减少波长选择和漂移带来的测量误差。

由于 s_1 反映了 x 和 y 分量之间的差别,要想 s_1 峰值恒定,那么需要透射谱 T_x 和 T_y 的差值在这个波长范围内保持恒定,即光栅的透射谱的斜率要保

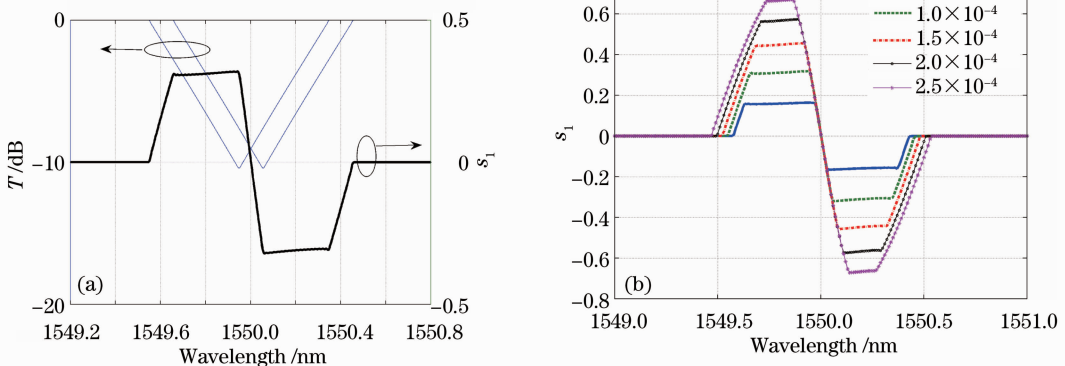


图 8 (a)重构光栅的透射谱和 s_1 谱; (b)不同线双折射下的 s_1 谱

Fig. 8 (a) Transmission and s_1 spectra of reconstructed grating; (b) s_1 spectra for different birefringence

持不变。利用分立剥层算法(DLP)^[10]对构想的三角形光栅进行重构。得到重构光栅的耦合系数,再根据耦合系数采用传输矩阵法对重构光栅进行仿真,得到分裂的两个本征透射谱和相应的 s_1 谱,如图 8(a)所示,得到的 s_1 谱具有相对比较平坦的峰值。利用重构参数,仿真分析了此重构光栅在线双折射下的 s_1 谱,如图 8(b)所示。在较宽的一段波长范围内,其峰值都具有一定的带宽,可以有效降低光源波长漂移或光路因素的微小偏移带来的误差。

5.2 降低本征双折射的影响

在实验数据中,当不施加应力时, s_1 也会有一定的数值,这是由于光栅中的本征线双折射引起的。光纤中的线双折射是由于纤芯横截面的不对称性,在 FBG 中主要是由于刻写过程引起的,并附加在本征光纤双折射中^[11]。在刻写完成后总的线双折射的幅度大概在 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 量级^[11~13]。为了降低本征线双折射,可以采用优化光源的偏振态、采用双边刻写或多重曝光等方式,但是这种方法需要多重刻写过程,实现起来非常复杂,而且容易损伤折射率调制剖面。另外一种方式是引入偏振模耦合^[14],在光栅刻写之前将其扭转,然后在 FBG 刻写完成后再将其放松,通过这样的方法可以大大降低光栅的本征线双折射引起的本征 s_1 值。

用 θ 表示沿长度的总扭转角度,仿真分析了扭转角度对 s_1 幅度的影响,如图 9 所示,其他参数不变,扭转角度分别设置为 0° 、 30° 、 60° 和 90° 。可以看到,扭转到 60° 的时候, s_1 峰值几乎下降到 46%,而扭转到 90° 时, s_1 几乎降到了 0。通过这样的方法,理论上可以降低本征线双折射引起的误差,进一步提高测量的准确度。

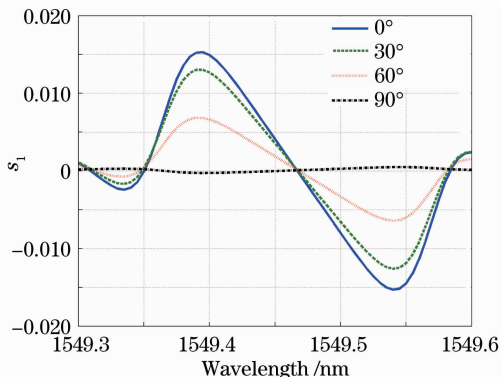


图 9 不同扭转角度的 s_1 谱

Fig. 9 s_1 spectra for different twisted angles

6 结 论

本文提出了基于光纤光栅透射光斯托克斯参量的实时压力测量方法,建立了压力、线双折射和透射光第一斯托克斯参量 s_1 三者之间的关系模型。结果表明,在一定压力范围内, s_1 参量和压力具有良好的线性关系。重点分析了偏振光入射角度以及波长点选择对实时测量系统性能的影响。制作了光纤光栅,搭建了 s_1 参量实时测量系统,测量了不同偏振光入射角度下 s_1 参量受压力所致线双折射的影响曲线,实验数据验证了此方法的可行性。并对实验误差提出了进一步的改进方法,这为新型光栅实时压力传感的研究提供了理论基础和实现方案。

参 考 文 献

- 1 A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors[J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1442~1463
- 2 Liu Hongyue, Liang Dakai, Zeng Jie *et al.*. Long period fiber grating refractive index sensitivity-based reinforcing rebar corrosion sensor in concrete [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0806009
刘宏月, 梁大开, 曾捷等. 基于长周期光纤光栅折射率敏感特性的混凝土结构钢筋锈蚀监测[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0806009
- 3 Yang Xiufeng, Zhang Chunyu, Tong Zhengrong *et al.*. Experimental research of temperature sensing properties of a novel fiber grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0405005
杨秀峰, 张春雨, 童峥嵘等. 一种新型光纤光栅温度传感特性的实验研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0405005
- 4 C. Caucheteur, S. Bette, R. Garcia-Olcina *et al.*. Transverse force sensor exploiting the birefringence effect in uniform fibre Bragg gratings[C]. *SPIE*, 2007, **6585**: 65850C
- 5 Feng Kui, Zhu Yong, Su Yang *et al.*. Analysis of magnetic field sensor with phase-shifted grating based on the polarization properties[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 763~768
冯奎, 朱勇, 苏洋等. 基于偏振特性的相移光栅磁场传感方法分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 763~768
- 6 Su Yang, Xu Junhua, Zhang Baofu *et al.*. Polarization states of transmitted light in linear birefringence gratings[J]. *J. Applied Optics*, 2011, **32**(3): 512~517
苏洋, 徐俊华, 张宝富等. 线双折射传感光栅中的传输光偏振态分析[J]. *应用光学*, 2011, **32**(3): 512~517
- 7 R. J. Espejo, S. D. Dyer. Transverse-stress fiber Bragg grating sensor with high spatial resolution and temperature stability [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(7): 1777~1785
- 8 Wu Fei, Li Lixin, Li Zhiquan. Theoretical analysis of fiber Bragg grating characterization by applying transverse force [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 472~476
吴飞, 李立新, 李志全. 均匀光纤布拉格光栅横向受力特性的理论分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4): 472~476
- 9 Peng Hui. Research on Magnetic Field Measurement Based on Polarization Properties of Fiber Bragg Grating [D]. Nanjing: PLA University of Science and Technology, 2009. 70~74
彭晖. 基于光纤光栅偏振效应的磁场传感方法研究[D]. 南京: 解放军理工大学, 2009. 70~74

- 10 J. Skaar, L. Wang, T. Erdogan. On the synthesis of fiber Bragg gratings by layer peeling [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2001, **37**(2): 165~173
- 11 T. Erdogan, V. Mizrahi. Characterization of UV-induced birefringence in photosensitive Ge-doped silica optical fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1994, **11**(10): 2100~2105
- 12 A. M. Vengsarkar, Q. Zhong, D. Inniss *et al.*. Birefringence reduction in side-written photoinduced fiber devices by a dual exposure method [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19** (16): 1260~1262
- 13 S. T. Oh, W. T. Han, U. C. Paek *et al.*. Discrimination of temperature and strain with a single FBG based on the birefringence effect [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(4): 724~729
- 14 S. Bette, C. Caucheteur, V. Garcia-Munoz *et al.*. PDL and DGD reduction in Bragg gratings using twisted fibers for the inscription [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(22): 1689~1691

栏目编辑：何卓铭