

激光与光电子学进展

基于光纤偏振特性的压力传感中测量范围的拓展方法

张超, 苏洋*, 王艺敏, 汪井源, 李建华

陆军工程大学通信工程学院, 江苏 南京 210014

摘要 测量范围的拓展对提升基于偏振特性的光纤压力传感系统的实用性有着重要意义。以拓宽测量范围并保持原有传感灵敏度为目标, 提出了一种基于斯托克斯多参量融合的传感方案。通过理论仿真得到传感头目标偏振轴。利用偏振控制器, 压力装置和偏振检测计, 在实验中得到了线性度为 99.8%、灵敏度为 0.1938 N^{-1} 、测量范围为 28 N 的传感性能, 多参量融合方案的测量范围比单参量测量方案提高了 5 倍。实验结果与理论预期吻合较好。所提方案可以大幅度提升基于光纤偏振特性的传感系统的性能并扩展了其实用价值。

关键词 光纤光学; 光纤压力传感; 斯托克斯参量; 测量范围; 偏振旋转轴; 灵敏度

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1906001

Measurement Range Expansion of Pressure Sensing Using Fiber Polarization

Zhang Chao, Su Yang*, Wang Yimin, Wang Jingyuan, Li Jianhua

College of Communication Engineering, Army Engineering University, Nanjing, Jiangsu 210014, China

Abstract Expanding the measurement range of the optical fiber can substantially improve the applicability of pressure sensing system based on polarization properties. Accordingly, a sensing method based on the fusion of multiple Stokes parameters is proposed to expand the measurement range while ensuring high sensitivity. The polarization rotation axis of the sensor is obtained using theoretical simulations. Then, polarization controllers, a pressure device, and a polarimeter are used to achieve a sensing performance with a linearity of 99.8%, sensitivity of 0.1938 N^{-1} , and measurement range of 28 N. The measurement range of the proposed multiparameter fusion method is five times larger than that of the methods based on single-parameter measurement, confirming the theoretical design. The proposed method can highly improve the performance and applicability of sensing systems based on polarization properties.

Key words fiber optics; optical fiber pressure sensing; Stokes parameter; measurement range; polarization rotation axis; sensitivity

OCIS codes 060.2370; 260.5430; 280.5475

1 引言

光纤传感技术因体积小、抗电磁干扰、系统方

案简单等诸多优点, 在航天、铁路等领域中被广泛用来监测压力、位移、温度等物理参量^[1-4]。光纤传感系统通过光纤中光信号的强度、相位、频率以及

收稿日期: 2021-01-19; 修回日期: 2021-01-21; 录用日期: 2021-01-27

基金项目: 国家自然科学基金(61975238)

通信作者: *qieziyangyang@163.com

偏振态(SOP)等参数与外界待测物理量联系,实现对各种物理量的传感。光纤传感具有灵敏度高、构造简单、动态性能良好等优点,近年来在压力监测方面得到广泛研究。本课题组提出了基于光纤偏振特性的实时压力传感方法,利用光的斯托克斯参量与压力之间的线性关系进行传感测量^[5-6]。经过实验验证,该方案结构简单、实时性强,并且实现了对压力、位移的测量。

在基于斯托克斯参量的光纤传感中,力与三个斯托克斯参量都存在余弦关系。通常以单参量作为对象进行压力测量研究,选择合适的工作点使系统工作在余弦曲线的线性部分^[7]。同时由于波峰和波谷的影响,力与斯托克斯分量的线性范围有限。在前期的研究中得到线性度为 99.95% 情况下对应的压力测量范围约为 5.25 N^[7]。为了进一步提高基于光纤偏振特性的压力传感方法的实用价值,需要在保持灵敏度的前提下研究拓展测量范围的方法,来提升传感系统的性能。本文从三个斯托克斯参量之间的关系入手,提出理论模型,进行数学推导,提出一种多参量组合的方法来拓展测量范围。通过实验数据,对方案的可行性和准确性进行了验证。

2 基础理论

在光纤上施加横向压力,在受力区域内,光纤会发生双折射现象。压力致双折射产生的相位差为

$$\theta(F) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n \times L = \frac{2\pi KF}{\lambda d}, \quad (1)$$

式中: d 为光纤的直径; F 为施加压力大小; L 是受压光纤的长度; $K = 9.0431 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1[8-10]}$ 。

光的偏振态可以用斯托克斯参量表示, $s = (s_1, s_2, s_3)'$,其中 s_1, s_2 和 s_3 分别为归一化的第一,二和三斯托克斯参量。随着压力的增加,偏振态在邦加球上的轨迹为绕本征旋转轴 $\mathbf{n} = (a, b, c)$ 旋转^[11]。因此,三个斯托克斯参量 s_1, s_2 和 s_3 和外在压力之间呈现出余弦变化关系^[7]。

由上述理论可知,压力致双折射引起的相位变化为 2π 时,对应偏振态在邦加球上绕轴一周,即三个斯托克斯参量经过一个周期的变化。利用(1)式计算出理论上裸纤(只有纤芯和包层)情况下的半周期对应的压力为 10.71 N,对半周期曲线内不同范围进行拟合,如图 1 所示,对应线性度和测量范围如表 1 所示。可见在裸光纤情况下,理论测量范围只有几个牛顿。

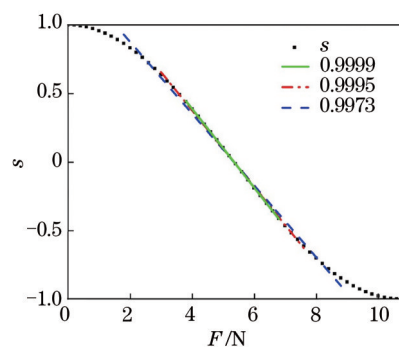


图 1 裸纤情况下的半个周期内不同范围的线性拟合
Fig. 1 Linear fitting of different ranges in half cycle for bare fiber

表 1 裸纤情况下的半个周期内不同测量范围及其他性能参数

Table 1 Different measurement ranges and other performance parameters in half cycle for bare fiber

Linear range /N	Correlation coefficient	Linear span /N	Sensitivity / N ⁻¹
3.8-6.8	0.9999	3	0.28721
3-7.6	0.9995	4.6	0.27931
1.8-8.8	0.9973	7	0.26211

2.1 随机状态下的工作曲线分析

搭建光纤挤压装置,在随机状态下,对有涂层的光纤进行挤压,实验得到斯托克斯参量与力的关系曲线,一个周期为 28 N,如图 2 所示。对图 2 中的数据点进行拟合,在正弦曲线的线性工作区,取中心位置前后 60° 的范围,得到线性范围和灵敏度。其中灵敏度最高的为 s_2 曲线,为 0.2088 N⁻¹,对应线性范围为 4.95 N。同时根据计算, s_1, s_2 和 s_3 与 F 的关系曲线周期分别为 28.4105 N, 28.24094 N 和 27.94558 N,这也证明了三个斯托克斯分量与力的关系曲线周期一致。由于采样点数的问题,因此计

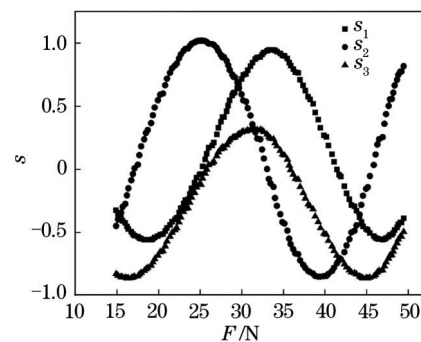


图 2 实验中有涂层光纤的斯托克斯矢量与力的关系曲线
Fig. 2 For coated fiber, relationship between Stokes vector and force in the experiment

算出的曲线周期存在一定误差。

2.2 动态范围拓展理论

从实验中得到的斯托克斯矢量与力的关系曲线呈现出良好的正余弦关系。建立曲线模型：

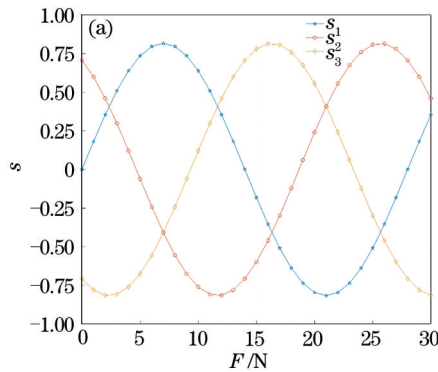
$$y = A \sin(B \times F + C) + D, \quad (2)$$

式中： A 决定整个曲线的峰峰值； $2\pi/B$ 为周期； C 代表曲线的初相位； D 代表曲线的直流分量。

因此假设斯托克斯分量 s_1, s_2, s_3 与力 F 的关系为

$$\begin{cases} s_1 = A_1 \sin(B_1 \times F + C_1) + D_1 \\ s_2 = A_2 \sin(B_2 \times F + C_2) + D_2 \\ s_3 = A_3 \sin(B_3 \times F + C_3) + D_3 \end{cases} \quad (3)$$

注意到图 2 中三条斯托克斯参量曲线的线性范围位于不同的力区间, 这为拓展测量范围提供了一条思路。因此所提三条斯托克斯融合处理的方法的研究对象并不局限于某一条斯托克斯分量与力的曲线, 而是三条曲线共同参与, 通过合理设计, 达到拓宽压力线性测量范围的目的。而保持三条曲线的灵敏度一致, 才能达到整个测量范围内灵敏度一致的目的, 即(3)式中 $A_1 = A_2 = A_3 = A$ 。为使灵敏度 A 值最大, 需要设定直流分量 D_1, D_2, D_3 值为零^[7], 同时由于周期一致, 因此 $B_1 = B_2 = B_3 = B$ 。则(3)式变为



$$\begin{cases} s_1 = A \sin(B \times F + C_1) \\ s_2 = A \sin(B \times F + C_2) \\ s_3 = A \sin(B \times F + C_3) \end{cases} \quad (4)$$

C_1, C_2, C_3 代表三条曲线的初相位, 它的取值要使 s_1, s_2, s_3 曲线在线性关系部分相互交叉, 从而达到扩展测量范围的目的。因此, 最简单的方法就是对 2π 周期进行三等分, 取 $C_1 = 0^\circ, C_2 = 120^\circ, C_3 = 240^\circ$, 同时要满足斯托克斯关系 $s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 = 1$, 即可计算得到 A 的大小为 0.816。同时根据图 2 实验结果, 正弦曲线一个周期对应的牛顿数约为 28 N, 则在仿真时 B 的取值为 0.2243。因此理论所得理想曲线如图 3(a) 所示, 每段的线性工作区域处于正弦曲线零点前后共 60° 的范围, 并且三条曲线的线性部分之间相互连接。

为了得到上述设计的斯托克斯曲线与压力的关系, 需要首先得到模型的理论偏振旋转轴, 并将实际偏振旋转轴调到该轴。图 3(a) 的斯托克斯矢量大小 $s = (s_1, s_2, s_3)^T$ 在邦加球上随力的演化关系如图 3(b) 所示, 从初始点开始偏振绕旋转轴旋转, 一个周期构成一个完整的轨迹圆。根据文献[7], 在固定的输入偏振态下对光纤持续加压, 测量得到的输出偏振态所在圆面的法向量就是偏振旋转轴的方向向量。从圆面数据中计算得到目标偏振旋转轴为 $\mathbf{n} = (0.866, 0.866, 0.866)$ 。

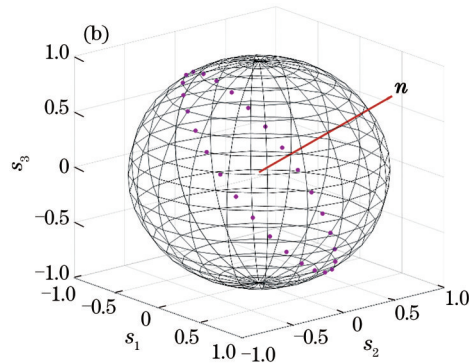


图 3 理论设计的斯托克斯参量仿真。(a) 理论设计的斯托克斯参量曲线; (b) 设计的斯托克斯曲线对应的邦加球位置及旋转轴
Fig 3 Stokes parameter simulation of theoretical design. (a) Stokes parameter curve of theoretical design; (b) for the designed Stokes curve, its position and rotation axis in the Poincare sphere

3 实验验证

实验装置如图 4 所示, 可调谐激光器(TLS)发出波长为 1550 nm 的激光, 通过第一个机械式三环偏振控制器(PC1), PC1 的作用是调控整个实验系统的初始偏振态; 压力源给光纤施加一个连续、逐

步变大的力, 使得光纤的偏振态发生变化; 第二个机械式三环偏振控制器(PC2)用于调整传感头的偏振旋转轴^[12]; 最后, 用 General Photonics 公司的在线偏振检偏模块对光纤末端的偏振态进行实验数据的采集, 并在电脑上对数据进行处理和分析。

首先进行传感头偏振旋转轴的校准, 对 PC2 进

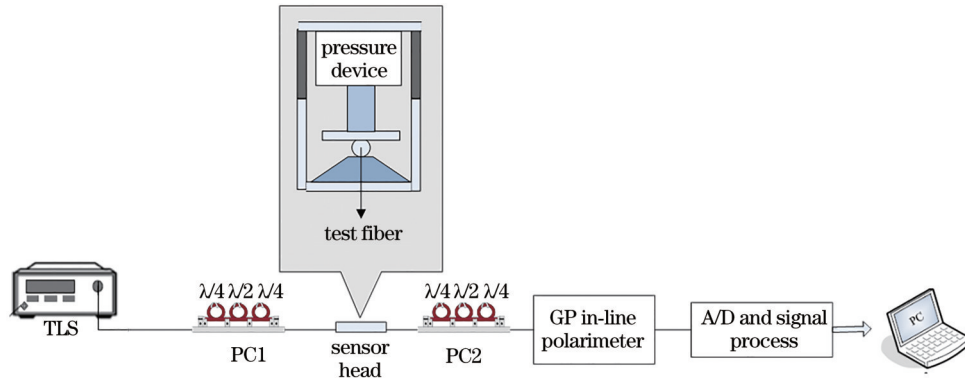


图 4 实验装置

Fig. 4 Experimental setup

行反复调整,在邦加球上进行观察,最终如图 5(b) 所示,得到接近理论偏振旋转轴的实验偏振旋转轴 $n=(0.9901, 0.8417, 0.7492)$ 。对比分析,在邦加球所处的三维空间中,理论偏振旋转轴和实验偏振旋转轴相差 5° 左右。

在找到偏振旋转轴的基础上,调整 PC1, 改变初始偏振态。由于在一系列围绕旋转轴的同心圆中,过邦加球球心的轨迹圆灵敏度最大^[7]、直流分量为 0, 因此调整 PC1, 将入射偏振态调整到过球心的圆上,在此圆上的任意偏振态都可以作为入射偏振态。对光纤施加压力,得到实验斯托克斯参量的拟合曲线与理论曲线对比,如图 5 所示,拟合曲线参数如表 2 所示。从整体上看实验数据与理论曲线比较接近,但存在一定的相位差和峰峰误差

差。通过分析,误差主要由以下因素造成:实验轴与理论轴有微小偏移;初始偏振态并没有完美调整到理论的最佳圆周上。但是,实验所得斯托克斯参量线性部分的理论曲线和实验数据曲线的峰峰值接近且基本相互平行,意味着灵敏度十分接近,同时计算出单段测量范围约为 4.98 N。由于在实验开始时给光纤施加了一个预紧力以防止光纤移动,因此,图 5 的曲线是从 5 N 的位置开始拟合与分析的。

利用阶梯抬高、反相变换等方式,将斯托克斯参量 s 与 F 的分段函数关系统一整合成一条直线。理论数据和实验数据曲线如图 6 所示。可以看到,两条曲线斜率相近,理论和实验灵敏度分别为 0.1935 N^{-1} 和 0.1938 N^{-1} , 对应线性拟合度分别为

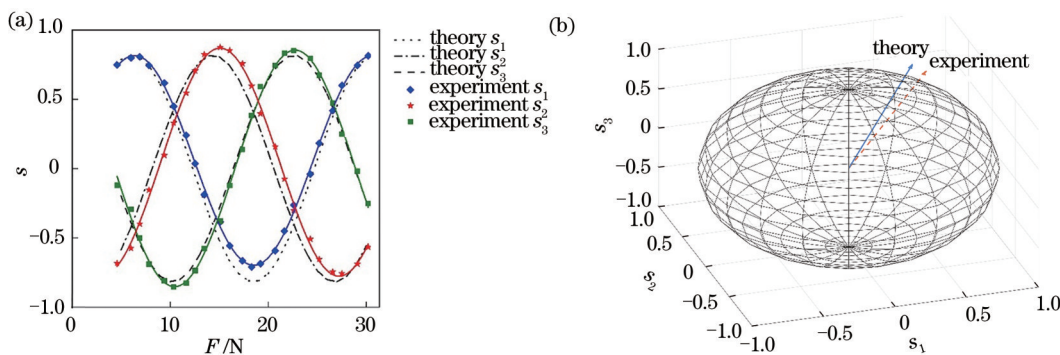


图 5 斯托克斯参量的理论曲线与实验数据比较。(a)理论曲线与实验数据比较;(b)理论曲线与实验数据对应的旋转轴
Fig. 5 Comparison between theoretical curve and experimental data of Stokes parameter. (a) Comparison of theoretical curve and experimental data; (b) rotation axis corresponding to theoretical curve and experimental data

表 2 实验结果的斯托克斯分量曲线拟合参数

Table 2 Fitting parameters of Stokes curves in the experiment

Parameter	s_1	s_2	s_3
Fitting equation	$0.756\sin(0.259F+0.081)+0.059$	$0.822\sin(0.259F+2.340)+0.046$	$0.853\sin(0.256F+4.249)+0.001$
Fitting degree	0.99843	0.99793	0.99698

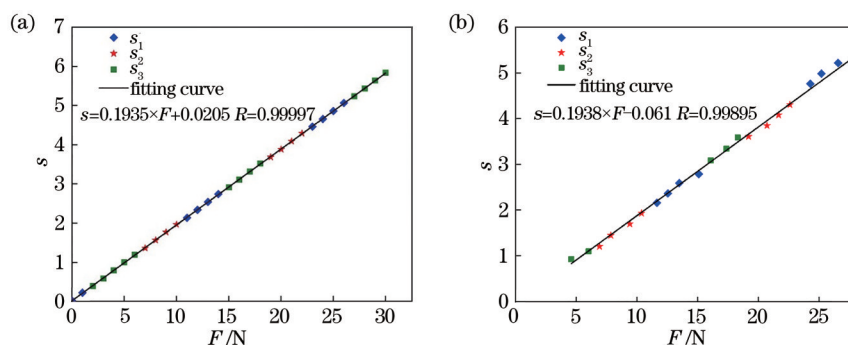


图 6 理论直线拟合与实验直线拟合比较。(a)理论拟合曲线;(b)实验拟合曲线

Fig. 6 Comparison between theoretical line fitting and experimental line fitting. (a)Theoretical fitting curve; (b) experimental fitting curve

99.997% 和 99.895%, 证明二者在力与斯托克斯参量的对应关系中吻合较好。

利用实验数据, 推导在一个大周期 28 N 的范围内力与斯托克斯参量的数学关系式为

$$F = \begin{cases} \frac{-s_3 + 0.86193}{0.19385}, & s_1 > s_3 > s_2 \\ \frac{s_2 + 1.66193}{0.19385}, & s_1 > s_2 > s_3 \\ \frac{-s_1 + 2.46193}{0.19385}, & s_2 > s_1 > s_3 \\ \frac{s_3 + 3.26193}{0.19385}, & s_1 < s_3 < s_2 \\ \frac{-s_2 + 4.06193}{0.19385}, & s_1 < s_2 < s_3 \\ \frac{s_1 + 4.86193}{0.19385}, & s_2 < s_1 < s_3 \end{cases} \quad (5)$$

由此, 利用多参量融合处理的方法, 在相同的灵敏度情况下, 测量范围由单参量时的 4.98 N 提升至 28 N。

4 结 论

在基于光斯托克斯参量的压力传感中, 测量范围的拓展对传感系统的实用性有着重要作用。通过对三个斯托克斯参量进行融合处理的方法搭建理论模型, 在实验中得到了 28 N 的测量范围, 同时保持了 99.8% 的高线性度和 0.1938 N^{-1} 的灵敏度。对比单斯托克斯参量方案, 所提多斯托克斯参量融合方案的测量范围提高了 5 倍, 实验结果与理论预期相符。这种测量范围的拓展方法进一步提高了基于斯托克斯参量的实时压力传感方法的实用性。在下一步的工作中, 希望可以用电动偏振控制器替代手动偏振控制器, 以实现最佳偏振轴的精确调节。

参 考 文 献

- [1] Domingues M F, Rodriguez C A, Martins J, et al. Cost-effective optical fiber pressure sensor based on intrinsic Fabry-Perot interferometric micro-cavities [J]. *Optical Fiber Technology*, 2018, 42: 56-62.
- [2] Abad S, Araujo F, Pinto F, et al. Fiber optic sensing subsystem for temperature monitoring in space in-flight applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10563: 105631D.
- [3] Li T L, Tan Y G, Shi C Y, et al. A high-sensitivity fiber Bragg grating displacement sensor based on transverse property of a tensioned optical fiber configuration and its dynamic performance improvement [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(18): 5840-5848.
- [4] Liao Y B, Yuan L B, Tian Q. The 40 years of optical fiber sensors in China[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328001.
廖延彪, 苑立波, 田芊. 中国光纤传感 40 年[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328001.
- [5] Su Y, Zhu Y, Zhang B F, et al. Real-time transverse force sensing using fiber Bragg grating through direct Stokes parameters measurement[J]. *Optics Express*, 2015, 23(25): 32300-32310.
- [6] Su Y, Zhou H, Shen H P, et al. High-sensitivity and real-time displacement sensor based on polarization properties in fiber[J]. *Optical Fiber Technology*, 2018, 46: 24-29.
- [7] Su Y, Zhang C, Wang Y M, et al. Optimization of incident light polarization state in pressure sensing based on fiber polarization properties[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(14): 1406001.
苏洋, 张超, 王艺敏, 等. 基于光纤偏振特性的压力传感中最佳入射光偏振态的确定[J]. *光学学报*, 2020, 40(14): 1406001.

- [8] Gafsi R, El-Sherif M A. Analysis of induced-birefringence effects on fiber Bragg gratings[J]. *Optical Fiber Technology*, 2000, 6(3): 299-323.
- [9] Wagreich R B, Atia W A, Singh H, et al. Effects of diametric load on fibre Bragg gratings fabricated in low birefringent fibre[J]. *Electronics Letters*, 1996, 32(13): 1223-1224.
- [10] Espejo R J, Dyer S D. Transverse-stress fiber Bragg grating sensor with high spatial resolution and temperature stability[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(7): 1777-1785.
- [11] Li Z Y, Wu C Q, Dong H, et al. Cascaded dynamic eigenstates of polarization analysis for piezoelectric polarization control[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(19): 2900-2902.
- [12] Li Z Y. High-speed polarization control in optical fiber and polarization encoding communication[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.
李政勇. 光纤偏振态的高速控制与偏振编码通信[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.