

长啾啾光纤光栅分布式双参量传感特性研究^{*}

孟凡勇,卢建中,闫 光,宋言明,董明利

(北京信息科技大学 光电信息与仪器北京市工程研究中心 光电测试技术北京市重点实验室 北京 100016)

摘 要:针对在复杂条件下传统精密位置传感器易受电磁干扰,复合材料兼容性差等问题,提出了一种基于长啾啾光纤光栅的分布式位置与压力双参量传感器。建立了长啾啾光纤光栅双参量传感模型,通过数值仿真对长啾啾光纤光栅双参量传感器理论模型进行了验证。并建立了长啾啾光纤光栅双参量传感系统,实验表明该传感器对于位置参量在全量程范围内具有 50 μm 的空间分辨率与 99.99% 的线性度;对于横向力具有 0.003 399 dB/N 的灵敏度系数与 99.8% 的线性度。该传感器可以应用于复杂环境下的精密横向力测量及定位。

关键词: 仪器仪表技术;啾啾光纤光栅;双参量检测;精密位置传感

中图分类号: TH823 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 51020

Research on distributed double-parameter sensing characteristics of long chirped fiber bragg grating

Meng Fanyong, Lu Jianzhong, Yan Guang, Song Yanming, Dong Mingli

(Beijing Key Laboratory for Optoelectronics Measurement Technology, Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, China)

Abstract: The traditional precise position sensor is susceptible to electromagnetic interference and poor compatibility of composite materials under complicated conditions. A distributed position and pressure double-parameter sensor is proposed based on long chirped fiber grating. A double-parameter sensing model of long chirped fiber grating is established, and the theoretical model of double-parameter sensor based on long chirped fiber grating is validated by numerical simulation. A double-parameter sensing system for long chirped fiber gratings is developed. The experimental results show that the sensor has a spatial resolution of 50 μm and a linearity of 99.99% for the position measurement in the full scale range. This sensor also has a sensitivity coefficient of 0.003 399 dB/N and a linearity of 99.8% for the transverse force. This sensor can be applied to precise lateral force and location measurement in complex environment.

Keywords: instrument and meter technique; chirped fiber bragg grating; double-parameter measurement; precise position sensing

0 引 言

精密位置传感技术在航空航天、精密加工、安全防护等领域应用广泛^[1]。常见的位置传感器存在重量大、难复用、易受电磁干扰、复合材料兼容性差、难以同时对压力进行检测等问题,因此全光精密位置压力双参量传感系统的研究具有重要意义。

光纤布拉格光栅因其具有具有灵敏度高、不受电磁干扰、防水性能好、体积小、重量轻、可靠性高、可埋入复合材料等优点^[2-6],成为优良的传感元件。并在诸多领域取得了广泛应用,如周界安防、桥梁等大型土木工程健康监测、飞机载荷谱测试、航天器热至变形测量等^[7-12]。啾啾光纤光栅(chirped fiber Bragg gratings,CFBG)是一种周期不均匀的光纤光栅,与传统光纤光栅相比具有更宽的反射谱带宽与更长的栅区敏感范围,能够在栅区覆盖范

收稿日期:2017-07 Received Date: 2017-07

^{*} 基金项目:教育部“长江学者和创新团队”发展计划(IRT1212)、北京市教委 2015 年度创新能力提升计划(TJSHG201510772016)、国家自然科学基金面上项目(51675053)、北京市教育委员会科技计划(KM201611232005)项目资助

围实现分布式测量。传统的全光分布式传感系统多基于光纤内非线性效应如布里渊时域分析(Brillouin optical time domain analysis, BOTDA)、光频域反射(optical frequency domain reflection, OFDR)等,存在空间分辨率低、应变灵敏度小、响应时间长、系统复杂等局限。长啁啾光纤光栅作为基于耦合模式的波长调制分布式传感器件,具有高空间分辨率、解调简单等优势,近年来成为新的研究热点。2014年,南秋明等人^[13]通过引入参考光栅在利用啁啾光纤光栅测量中,实现了高线性度的应变和温度传感器;2016年,刘智超等人^[14]基于啁啾光栅完成了粮仓测温网络的研究,实现了大容量温度测量组网;同年,Ahmad E. J. 等人^[15]实现了应变分辨率 $9.1 \mu\epsilon$ 的全分布式啁啾光纤光栅应变测量;Tomasz O 等人^[16]使用定制锥形啁啾光纤光栅获得了宽范围的单调应变响应。2017年,斐丽等人^[17]利用啁啾相移光纤光栅获得了灵敏度 $0.19 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 的分布式应变传感器。在精确应变及位置传感方面,啁啾光纤光栅横向力与定位传感正逐渐成为研究焦点。

本文利用耦合模理论建立了长啁啾光纤光栅作为横向力测量与定位双参量传感的理论模型,通过传输矩阵模型对其双参量传感特性进行了数值仿真分析。并使用 280 mm 长度的啁啾光纤光栅对横向力测量与定位双参量传感进行了试验验证,获得了定位精度 $50 \mu\text{m}$,线性度 99.99% ,横向力灵敏度 0.003399 dB/N 的全分布式长啁啾光纤光栅双参量传感系统。

1 长啁啾光纤光栅双参量传感器模型分析

1.1 长啁啾光纤光栅双参量传感器耦合模理论分析

啁啾光纤光栅的光学特性可由以下耦合模方程获得:

$$\begin{cases} \frac{dA^+}{dz} = i\zeta^+ A^+(Z) + i\kappa B^+(Z) \\ \frac{dB^+}{dz} = i\zeta^+ B^+(Z) + i\kappa A^+(Z) \end{cases} \quad (1)$$

由于啁啾光纤光栅的光栅参数沿光纤方向发生变化。从耦合模方程不能得到反射系数和反射率的解析解,因此采用传输矩阵法对式(1)进行求解。传输矩阵模型将非均匀光栅分成许多小段,每一小段都看成是均匀光栅,每段都用一个 2×2 的矩阵来表示。这样整个非均匀光栅就可表示为一系列 2×2 矩阵的乘积,利用这个矩阵就可以求出光栅的反射系数,时延和色散等参数。

将啁啾光纤光栅均匀分成 M 个子光纤光栅,并将其中的每一个都视为均匀光纤光栅。 Δz 为单个子光栅长度,且 $\Delta z \gg \Lambda$,即:

$$M \ll \frac{2n_{\text{eff}}}{\lambda_d} \quad (2)$$

针对其中每段子光栅,其均符合均匀光纤光栅耦合

模方程,其对应的中心波长可以表示为:

$$\lambda_d = 2n_{\text{eff}}\Lambda(z) \quad (3)$$

式中: n_{eff} 为栅区有效折射率, $\Lambda(z)$ 为随位置 z 变化的栅区周期。对于线性啁啾光纤光栅,其周期表达式如下:

$$\Lambda(z) = \Lambda_0 + \Delta\Lambda(z) \quad (4)$$

式中: $\Lambda(z)$ 为光栅周期分布函数, Λ_0 为光栅中点处的周期, $\Delta\Lambda(z)$ 为周期的变化。 $\Delta\Lambda(z)$ 满足如下关系:

$$\frac{\Delta\Lambda(z)}{\Lambda_0} = \frac{\Delta k(z)}{k_0} \quad (5)$$

式中: $k_0 = \frac{2\pi}{\Lambda_0}$, $\Delta k(z) = \frac{d\Phi(z)}{dz}$ 。 $\Phi(z)$ 为啁啾光纤光栅的啁啾函数,可表示为:

$$\Phi(z) = F(z/L)^2 \quad (6)$$

式中: F 为啁啾系数, L 为光纤光栅长度。由式(4)~(6)联立得:

$$\Lambda(z) = \Lambda_0 + \frac{F\Lambda_0^2}{2L^2z} \quad (7)$$

结合式(5)可知,其应变位置 z 与啁啾光栅的栅区周期存在唯一的对应关系,即可以根据啁啾光纤光栅受横向力后光谱凹陷位置获得实际受力位置。因长啁啾光纤光栅具有较大的啁啾系数 F ,从而实现几十微米分辨率的连续分布式位置测量。

当受力点中心位于第 I 段子光栅时,其反射率满足均匀光纤光栅的耦合模方程,可以表示为:

$$R_i = \frac{\sinh\sqrt{\kappa^2 - \hat{\delta}^2}}{\cosh\sqrt{\kappa^2 - \hat{\delta}^2} - \frac{\hat{\delta}^2}{\kappa^2}} = \frac{\kappa^2}{\kappa^2 + \frac{\kappa^2 - \hat{\delta}^2}{\sinh^2\sqrt{\kappa^2 - \hat{\delta}^2}}} \quad (8)$$

其中有:

$$\kappa = \frac{\pi}{\lambda} \overline{\delta n_{\text{eff}}}, \hat{\delta} = \delta_d + \zeta - \frac{1}{2} \cdot \frac{d\varphi}{dz}, \delta_d = 2\pi n_{\text{eff}} \left[\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_d} \right], \zeta = \frac{2\pi}{\lambda} \overline{\delta n_{\text{eff}}} \quad (9)$$

在均匀的子光栅中, $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ 为常数,且 $d\varphi/dz$ 。当横向加载的力增大时, $\Lambda(i)$ 会随之增大,此时 κ^2 为常数,光谱凹陷加深,凹陷的深度与该点受力大小存在唯一对应关系。

1.2 啁啾光栅双参量传感器传输矩阵模型

设第 I 段光栅的前向光场和后向光场分别为 R_i, S_i 。对于布拉格光栅,其初始条件为 $R_0 = R(L/2) = 1$ 和 $S_0 = S(L/2) = 0$,通过求解可得 $R(-L/2) = R_M$ 和 $S(-L/2) = S_M$ 。第 I 段的传输矩阵为:

$$\begin{bmatrix} R_i \\ S_i \end{bmatrix} = \mathbf{F}_i \begin{bmatrix} R_{i-1} \\ S_{i-1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

从耦合模方程可得到布拉格光栅的传输矩阵为:

$$\begin{aligned} F_{11} &= \cosh(\gamma_B \Delta z) - i \frac{\hat{\delta}}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z), F_{12} = \\ &- i \frac{\kappa}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z), F_{21} = i \frac{\kappa}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z), F_{22} = \cosh(\gamma_B \Delta z) + \end{aligned}$$

$$i \frac{\hat{\delta}}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z), \mathbf{F}_i^B = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中有:

$$\gamma_B = \sqrt{\kappa^2 - \hat{\delta}^2} \quad (12)$$

则总的矩阵可表示为:

$$\begin{bmatrix} R_M \\ S_M \end{bmatrix} = \mathbf{F}_M \cdot \mathbf{F}_{M-1} \cdot \dots \cdot \mathbf{F}_i \cdot \dots \cdot \mathbf{F}_1 \begin{bmatrix} R_0 \\ S_0 \end{bmatrix} = \mathbf{F} \begin{bmatrix} R_0 \\ S_0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

2 长啁啾光纤光栅双参量传感器仿真研究

假设长啁啾光纤光栅其中心波长为 $\lambda_c = 1\,578\text{ nm}$, 光纤有效折射率 $n_{\text{eff}} = 1.45$, 光栅长度为 $L = 0.3\text{ m}$, 啁啾系数 $C = 27\text{ nm/m}$, 使用传输矩阵模型对其进行了数值仿真。获得其反射光谱如图 1 所示。

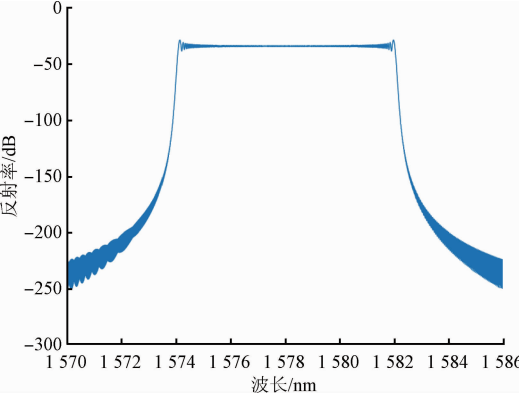


图 1 数值仿真长啁啾光栅反射谱

Fig. 1 Reflection spectrum of long chirped grating by numerical simulation

由图 1 可知,该仿真长啁啾光栅的 3 dB 带宽约为 8 nm。由建模分析知,当在啁啾光栅某位置进行横向力加载时,会在长啁啾光纤光栅上引入应变,反射谱对应位置会出现光谱凹陷。由式(7)可知其光谱凹陷所在光谱位置由横向力加载位置决定。

在如图 2(a) 所示的长啁啾光纤光栅结构中,在 $z = 0.05\text{ m}$ 处为起点,以 0.05 m 为步进施加相同的横向力 s , 获得的光谱如图 2(b) 所示。其光谱间隔为 1.43 nm , 与理论模型相符。在如图 3(a) 所示的长啁啾光纤光栅结构中,在 $z = 0.1\text{ m}$ 处为起点,以 $50\text{ }\mu\text{m}$ 为步进施加相同的横向力 s , 获得的光谱如图 3(b) 所示。可以看到光谱凹陷中心位置变化依然如式(5)所描述,符合理论推导,该结果表明其位置分辨率能够达到 $50\text{ }\mu\text{m}$ 。由于 $\Delta z \gg \Lambda$, 当子光栅只有几个光栅周期时不适用传输矩阵模型进行分析,所以仿真不能获得更小的分辨率结果。

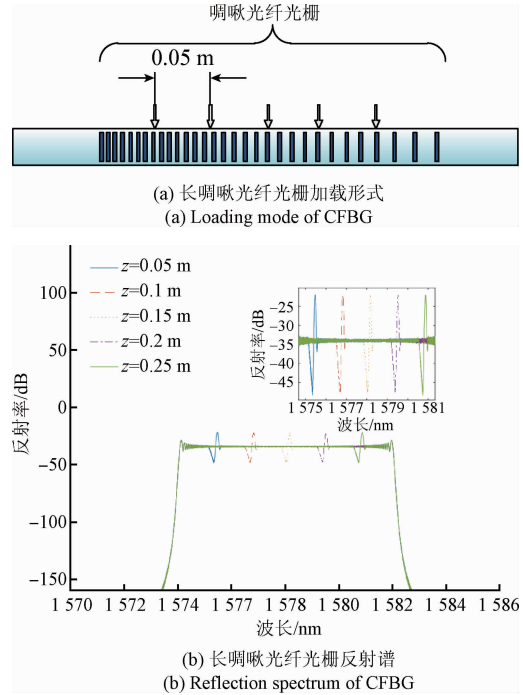


图 2 数值仿真长啁啾光栅横向力大范围加载
Fig. 2 Loading lateral load of CFBG in large range by numerical simulation

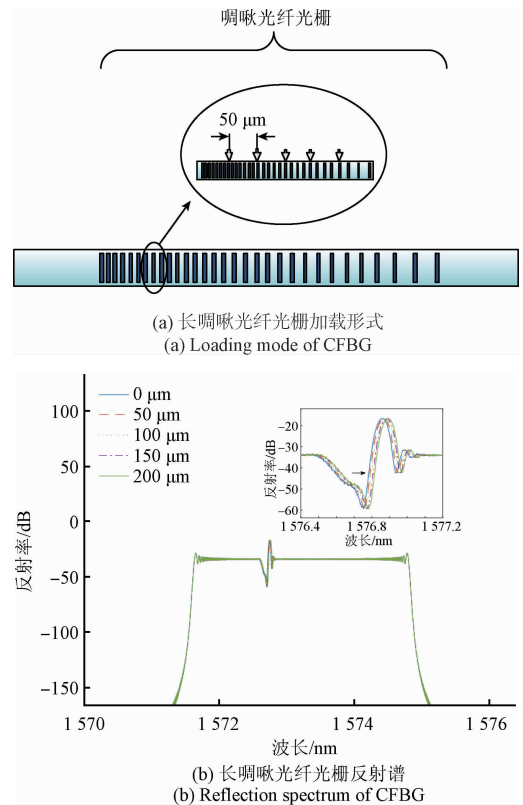


图 3 数值仿真长啁啾光栅横向力小范围加载
Fig. 3 Loading lateral load of CFBG in small range by numerical simulation

如图 4(a) 所示的长啁啾光纤光栅结构中,在 $z=0.1\text{ m}$ 处逐级加载不同的横向力 s ,获得的光谱如图 4(b) 所示。其光谱凹陷深度随横向力 s 的增大而变深,成线性关系。且凹陷中心波长基本保持不变,与理论模型相符。

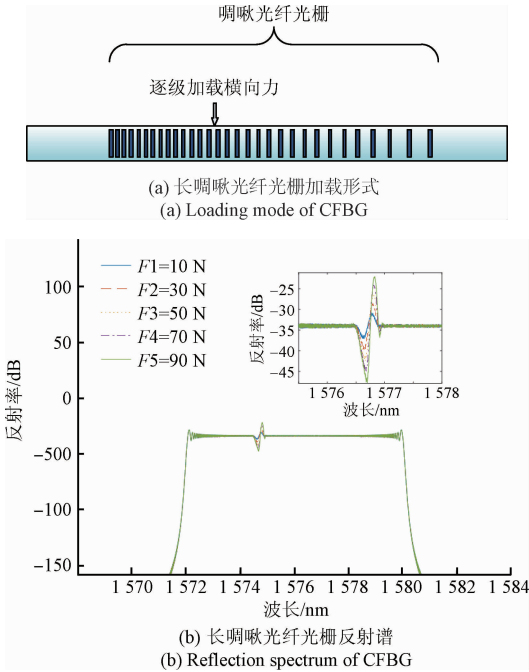


图 4 数值仿真长啁啾光栅横向力逐级加载
Fig. 4 Step loading lateral load of CFBG by numerical simulation

上述仿真表明,长啁啾光纤光栅横向力测量具有良好的线性度,极高的空间分辨率,在全量程具有极高的一致性。

3 长啁啾光纤光栅双参量传感器实验及分析

3.1 实验系统建立

本文实验中采用的测试系统包括 280 mm 长的线性啁啾光纤光栅 (9 nm 啁啾量)、光谱分析仪 (Yokogawa AQ6370D, 分辨率 0.02 nm) 和 ASE 宽带光源 (朗普达)、横向力加载装置及二维平移台等,如图 5 所示。

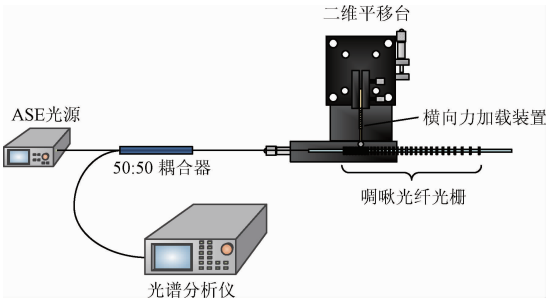


图 5 CFBG 传感系统原理

Fig. 5 Schematic diagram of CFBG sensing system

其中,加载装置如图 6 所示,由加载圆柱体与弹簧柱组成,弹簧柱中安装有行程 6.25 mm 的压缩弹簧,满行程时弹力为 250 N,根据弹簧弹力公式,可以将压缩弹簧行程线性转换为施加弹力。

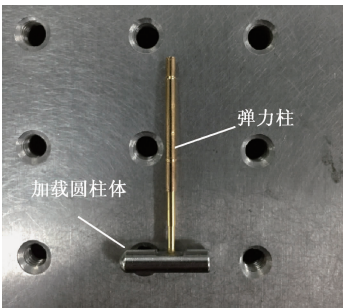
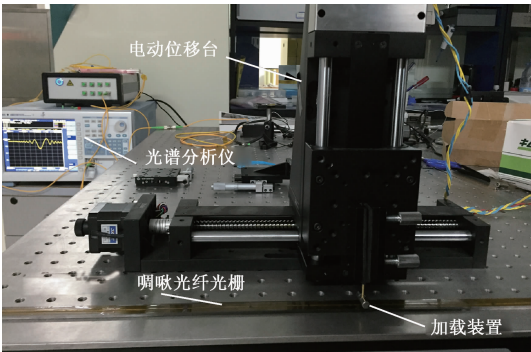


图 6 CFBG 加载装置实物
Fig. 6 CFBG loading device

ASE 宽带光源为 C + L 波段宽带光源。宽带光源的光通过 50:50 耦合器入射到长啁啾光纤光栅中。宽带光源不同波长的光进入啁啾光纤光栅后在不同的位置满足布拉格条件而被反射,最终形成宽带反射谱。此时载荷作用在长啁啾光纤光栅的不同位置的位置信息就被调制到宽带反射谱中,由耦合器进入光谱分析仪中。线性啁啾光纤光栅在 280 mm 的长度上具有 9 nm 的啁啾量。

3.2 横向力定位传感实验

首先使用高精度光谱仪与位移平台对长啁啾光纤光栅位置传感器进行横向力定位传感实验,如图 7(a) 所示。实验测试过程中,保证 C + L 波段宽谱光源光功率稳定。为对传感器全量程范围线性度进行测试,采用电控平移台和加载装置对长啁啾光纤光栅从一端起进行步进为 5 mm 的加载。加载装置与啁啾光纤光栅接触为两个垂直圆柱体相切,光纤受压位置为近似点接触。直至光谱特征漂移超过有效反射谱宽度,此时为 280 mm。图 8(a) 所示为实验过程中在 50、100、150、200 和 250 mm 处光谱特征变化趋势,完整实验结果如图 8(b) 所示。以上实验数据采用线性拟合,方程为 $z=0.028\ 18\lambda+1\ 574$,其定位传感器的线性度为 99.99%。



(a) 线性度测试实验
(a) Linearity test

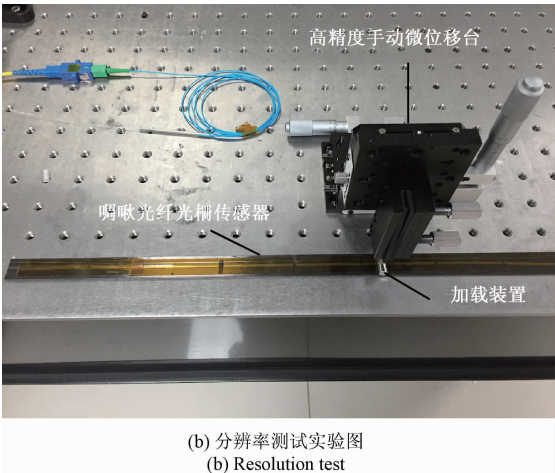


图 7 CFBG 横向力定位测试实物

Fig. 7 The location of lateral force for CFBG

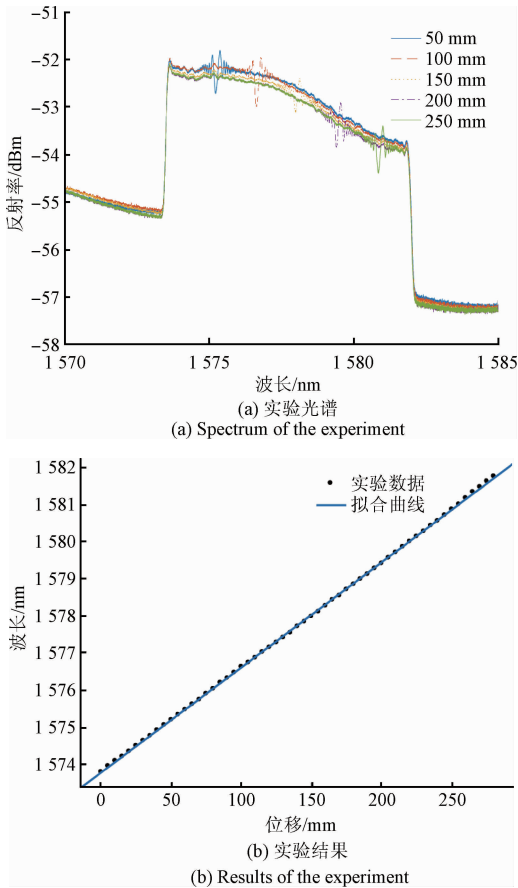


图 8 CFBG 横向力定位线性度测试结果

Fig. 8 Results of the linearity location test of lateral force for CFBG

如图 7(b) 所示,为对该传感器分辨率进行测试,采用高精度微手动微位移平台和加载装置对其进行步进为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的加载。图 9 所示为分辨率测试实验光谱图,以

上实验数据采用线性拟合,方程为 $z = 0.000\ 064\lambda + 1\ 577$,其定位传感测量曲线的线性度为 99.61%。该实验表明当光源输出稳定时,特征光谱波长与横向力加载位置为线性关系,验证了啁啾光纤光栅横向力定位传感原理及仿真分析的结果。

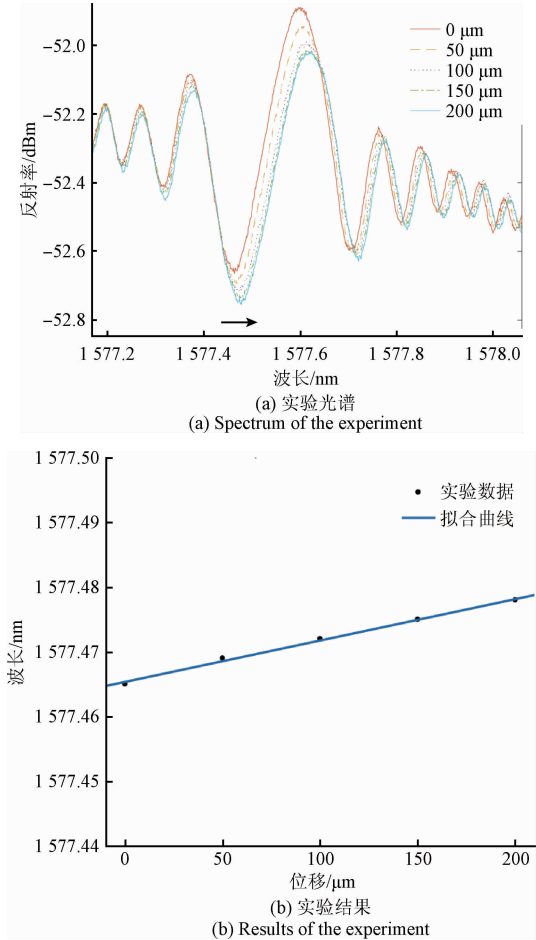


图 9 CFBG 横向力定位分辨率测试结果

Fig. 9 Results of the resolution location test of lateral force for CFBG

3.3 横向力测量传感实验

使用高精度光谱仪与高精度手动微位移平台对长啁啾光纤光栅位置传感器进行横向力逐级加在传感实验,实验系统同横向力定位分辨率实验相同。实验测试过程中,同样需保证 C + L 波段宽谱光源光功率稳定。为对传感器某固定点进行测试,采用高精度平移台和加载装置对长啁啾光纤光栅从某一固定点进行垂直步进为 20 N 的加载与卸载。采用弹簧作为加载装置弹簧的加载力对应压缩量关系为:

$$F = \frac{250}{6.25}z \tag{14}$$

式中: z 为弹簧垂直方向压缩量。采用微分头调节弹簧压

缩,微分头精度为 0.01 mm。加载装置与啾啾光纤光栅接触为两个垂直圆柱体相切,光纤受压位置为近似点接触。图 10 所示为加载实验过程光谱图,卸载实验过程光谱图与加载相似。以上实验数据采用线性拟合,方程为

$$\begin{cases} F = -0.003\,399I - 52.91 \\ F = 0.003\,404I - 52.92 \end{cases} \quad (15)$$

由式(15)可知,该传感器的横向力灵敏度系数在加载和卸载时分别为 0.003 399 与 0.003 404 dB/N,其横向力测量曲线的线性度分别为 99.8% 与 99.79%。

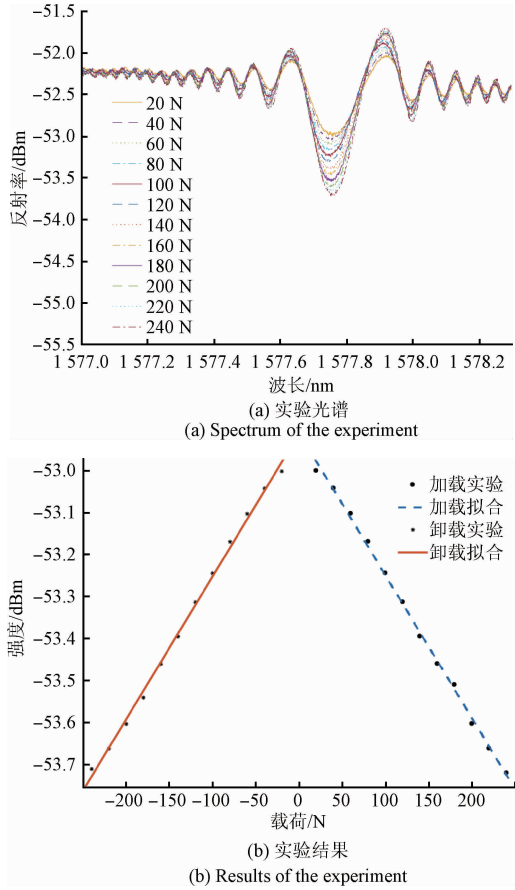


图 10 CFBG 横向力测量结果

Fig. 10 Results of the test of lateral force for CFBG

4 结 论

本文通过耦合模理论分析建立了长啾啾光纤光栅双参量传感模型,根据传输矩阵模型对长啾啾光纤光栅双参量传感器进行了仿真分析,对长啾啾光纤光栅双参量传感器理论模型进行了验证。并对其进行了实验研究,建立了长啾啾光纤光栅双参量传感系统,实验表明该传感器对于位置参量在 280 mm 测量范围内具有 50 μm 的空间分辨率,99.99% 的线性度,且因传感分辨率只受光栅啾啾量影响,在更长的光栅上通过调整光栅啾啾量已

然能够获得相同的空间分辨率;对于横向力加载/卸载具有 0.003 399 与 0.003 404 dB/N 的灵敏度系数,99.8% 与 99.79% 的线性度。

参考文献

[1] 闫光,刘力宏,左春桢. 飞机载荷谱实测数据并行统计处理算法[J]. 吉林大学学报:工学版,2012,42(3):683-688.
YAN G, LIU L H, ZUO CH CH. Parallel statistics processing algorithm of aircraft load spectrum testing data[J]. Journal of Jilin University : Engineering and Technology Edition, 2012, 42(3):683-688.
[2] 丁浩,李军,商和龙,等. 基于最小二乘法的光纤互感器双路温补技术[J]. 电子测量技术,2016,39(6):190-195.
DING H, LI J, SHANG H L, et al. Study on dual-way temperature compensation method based on least square method for fiber optical current transformer [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(6):190-195.
[3] 李红,祝连庆,刘锋,等. 裸光纤光栅表贴结构应变传递分析与实验研究[J]. 仪器仪表学报,2014,35(8):1744-1750.
LI H, ZHU L Q, LIU F, et al. Strain transfer analysis and experimental research of surface-bonded bare FBG[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014,35(8):1744-1750.
[4] 黄建明,张明达. 光纤光栅应变传感器温度补偿[J]. 国外电子测量技术,2017,36(5):74-77.
HUANG J M, ZHANG M D. Temperature compensation of fiber bragg grating strain sensors [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2017, 36(5):74-77.
[5] SUNG H J, TAN M D, KIM J M, et al. Long-term monitoring of ground anchor tensile forces by FBG sensors embedded tendon [J]. Smart Structures & Systems, 2017,19(3):269-277.
[6] MIELOSZYK M, OSTACHOWICZ W. Moisture contamination detection in adhesive bond using embedded FBG sensors [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2017, 84(2):1-14.
[7] 陈勤勤,王峰,张旭苹,等. POTDR 振动传感系统的数据处理与分析方法[J]. 电子测量与仪器学报,2016,30(11):1671-1678.
CHEN M M, WANG F, ZHANG X P, et al. Data processing and analysis method of POTDR vibration sensing system [J], Journal of Electronic Measurement & Instrumentation, 2016, 30(11):1671-1678.
[8] 娄小平,陈仲卿,庄炜,等. 非正交 FBG 柔杆空间形

- 状重构误差分析及标定[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(2):386-393.
- LOU X P, CHEN ZH Q, ZHUANG W, et al. Error analysis and calibration for FBG shape reconstruction based on non-orthogonal curvatures[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(2):386-393.
- [9] 贾丹平, 武威. 基于超磁致伸缩材料的光纤光栅电流传感器[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(12):1806-1812.
- JIA D P, WU W. Fiber Bragg grating current sensor based on giant magnetostrictive material[J]. Journal of Electronic Measurement & Instrumentation, 2015, 29(12):1806-1812.
- [10] GAO ZH Y, ZHU X J, FANG Y B, et al. Active monitoring and vibration control of smart structure aircraft based on FBG sensors and PZT actuators[J]. Aerospace Science & Technology, 2017, 63(4):101-109.
- [11] FACCHINI M, SORENSEN L, BOTSIS J. Measurements of temperature during fatigue of a thermoplastic polymercomposite using FBG sensors[J]. American Journal of Medical Genetics Part A, 2017, 130A(3):322-324.
- [12] INNES M, DAVIS C, ROSALIE C, et al. Acoustic emission detection and characterisation using networked FBG sensors[J]. Procedia Engineering, 2017, 188(12):440-447.
- [13] 南秋明, 宋蕾, 李盛. 啁啾光纤光栅的传感性能及测量方法研究[J]. 功能材料, 2014(12):12093-12096.
- NAN Q M, SONG L, LI SH, et al. Research on sensing properties and measuring method of chirped fiber Bragg grating[J]. Journal of Functional Materials, 2014(12):012093-12096.
- [14] 刘智超, 杨进华, 张刘, 等. 基于啁啾光纤光栅的粮仓测温网络研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(10):3377-3380.
- LIU ZH CH, YANG J H, ZHANG L, et al. Granary temperature measurement network based on chirped FBG[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(10):3377-3380.
- [15] AHMAD E J, WANG C, FENG D, et al. High spatial and temporal resolution interrogation of fully distributed chirped fiber Bragg grating sensors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, doi:10.1109/JLT.2016.2605401.
- [16] TOMASZ O, KONRAD M, KAZIMIERZ J. Fiber-optic strain sensors based on linearly chirped tapered fiber Bragg gratings with tailored intrinsic chirp[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(20):7508-7514.
- [17] 裴丽, 吴良英, 王建帅, 等. 啁啾相移光纤光栅分布式应变与应变点精确定位传感研究[J]. 物理学报, 2017, 66(7):10-18.
- FEI L, WU L Y, WANG J SH, et al. Phase shift chirped fiber Bragg grating based distributed strain and position sensing[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(7):10-18.

作者简介



孟凡勇, 分别在 2003 年和 2011 年于河北工业大学获得学士学位和博士学位, 现为北京信息科技大学讲师, 主要研究方向为光纤传感技术及应用。

E-mail: mengfanyong@bistu.edu.cn

Meng Fanyong received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from Hebei University of Technology in 2003 and 2011, respectively. Now he is a lecturer in Beijing Information Science & Technology University. His main research interests include optical fiber sensing technology and its application.



董明利(通讯作者), 1989 年于合肥工业大学获得硕士学位, 2009 年于北京理工大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学教授, 主要研究方向为精密测量技术与仪器。

E-mail: dongml@sina.com

Dong Mingli (Corresponding author) received her M. Sc. degree from Hefei University of Technology in 1989 and her Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 2009. Now she is a professor in Beijing Information Science & Technology University. Her main research interests include vision measurement technology, precision measurement and instruments.