

引用本文: 冯士强, 黄勇林, 杨文新. 基于少模光纤长周期光栅的新型传感系统[J]. 光通信技术, 2025, 49(2): 44–48.

基于少模光纤长周期光栅的新型传感系统

冯士强, 黄勇林*, 杨文新

(南京邮电大学 电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院, 南京 210023)

摘要:为解决光纤光栅传感器存在的温度交叉敏感问题,提出了一种基于少模光纤长周期光栅的新型传感系统。该系统利用少模光纤能传输基模和少量高阶模的特性,通过调整光栅周期实现纤芯模与包层模的有效耦合。系统由 2 个周期不同的长周期光栅通过耦合器连接而成,并接入宽带光源和光谱仪。利用矩阵法分析不同温度和应变条件下光栅中纤芯模与包层模耦合的灵敏度差异,以实现温度和应变的同时测量。实验结果表明:在 0~100 ℃ 温度范围内,光栅波长发生红移,耦合后在波谷 Peak₁、Peak₂ 处的温度灵敏度分别为 0.512 86、0.761 43 nm/℃;在应力为 0~500 με 时,光栅波长发生蓝移,2 个波谷处的应变灵敏度分别为 -0.138 57、-0.082 29 nm/με。

关键词:交叉敏感;少模光纤长周期光栅;温度;应变

中图分类号: TN91 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2025)02-0044-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.02.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Novel sensing system based on few mode fiber long-period grating

FENG Shiqiang, HUANG Yonglin*, YANG Wenxin

(College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics (Future Technology),
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: To address the issue of temperature cross sensitivity in fiber optic grating sensors, a novel sensing system based on few mode fiber long-period gratings is proposed. This system utilizes the characteristic of few mode optical fibers that can transmit fundamental modes and a small number of higher-order modes, and achieves effective coupling between core modes and cladding modes by adjusting the grating period. The system is composed of two long-period gratings with different periods connected by a coupler, and connected to a broadband light source and spectrometer. Using matrix method to analyze the sensitivity differences of fiber core mode and cladding mode coupling in gratings under different temperature and strain conditions, in order to achieve simultaneous measurement of temperature and strain. The experimental results indicate that within the temperature range of 0 to 100 ℃, the grating wavelength undergoes a red shift, with temperature sensitivities at the troughs Peak₁ and Peak₂ being 0.512 86 nm/℃ and 0.76143 nm/℃, respectively, after coupling. Under a stress range of 0 to 500 με, the grating wavelength experiences a blue shift, with strain sensitivities at the two troughs being -0.138 57 nm/με and -0.082 29 nm/με.

Key words: cross sensitivity, few modes fiber long-period grating, temperature, strain

0 引言

光纤光栅传感器具有抗电磁干扰能力强、电绝缘

性能好、安全可靠、耐高温、耐腐蚀、传输距离远等优点^[1-3],使其在许多领域取得了成功的应用,例如建筑行业^[4]和航天行业^[5-6]。但由于光纤光栅传感器对温度和应变存在交叉敏感问题^[7-8],在一定程度上限制了其在实际应用中的使用,因此解决该问题变得至关重要。自二十世纪 90 年代,许多研究者提出了不同的解决方案。1995 年, XU M G 等人^[9]提出将 2 个不同中心反射波长的光纤布喇格光栅(FBG)刻写在光纤的同一位置,用于同时测量温度和应变,但该方法需要 2 套宽带光源,增加了成本。1997 年, BHATIA V 等人^[10]利

收稿日期: 2024-07-30。

作者简介: 冯士强(1999—),男,硕士研究生,现就读于南京邮电大学电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院电子信息专业,连续 3 年获得南邮奖学金,主要研究方向为光纤光栅传感、光纤通信技术,参与了江苏省光通信工程技术研究中心课题项目。

* **通信作者:** 黄勇林(1963—),男,博士,教授,主要研究方向为光波分复用系统中光分插复用器件和光纤光栅传感。



用长周期光栅(LPG)不同包层模对温度和应变的灵敏度不同的特点,实现了同时测量,这种方法虽然显著降低了成本,但由于波长范围较大,导致光谱扫描时间较长。2002年,王目光等人^[11]提出利用双周期光栅测量温度和应变,但光栅制作难度较大。

目前,针对光纤光栅交叉敏感问题的研究主要集中在单模光纤上,而少模光纤(FMF)光栅方面的研究则相对较少。相较于单模光纤,FMF不仅支持多个模式传输,而且灵敏度更高且制造成本较低,在多参数检测方面具有显著优势。此外,FMF能够覆盖更广泛的波长范围,除了基模外,其纤芯中还可以传播多个高阶模。这些模式与包层模耦合时,会呈现出不同的温度和应变灵敏度^[12]。基于此背景,本文提出基于FMF-LPG的新型传感系统。

1 基于 FMF-LPG 的新型传感系统原理

本文提出的基于 FMF-LPG 的新型传感系统是通过不同周期 LPG 设计的,旨在探讨在不同温度和应变条件下 FMF 光栅中纤芯模式与包层模式间的灵敏度差异。通过采用双波长测量方法,并分析各模式间的耦合特性,实现对温度和应变的同时监测。

系统原理图如图 1 所示。该系统由 1 个宽带光源(BBS)、2 个 3 dB 耦合器、2 个光栅周期不同的 FMF-LPG 和 1 个光谱仪(OSA)构成。BBS 发出的光信号通过第一个 3 dB 耦合器后分为 2 路,分别经过 FMF-LPG₁ 和 FMF-LPG₂。在这些光栅中,纤芯模式和包层模式发生耦合。随后,2 路光信号通过第二个 3 dB 耦合器重新合并,并最终传输至 OSA 进行检测和分析。OSA 通过测量光信号的光谱特性,能够获取光栅中的波长漂移信息,从而实现对温度和应变的同时监测。

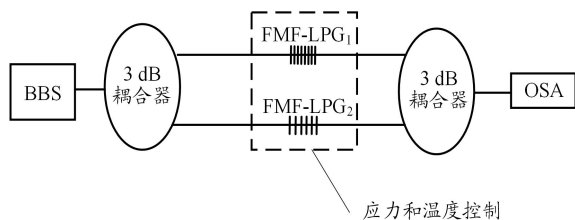


图 1 FMF-LPG 的新型传感系统原理图

使用周期不同 FMF-LPG 能够分别激发纤芯模和各次包层模耦合产生谐振峰。谐振波长的位置取决于相位匹配条件,如式(1)所示。

$$\lambda_{\text{res}} = \left(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl}} \right) \Lambda \quad (1)$$

其中, λ_{res} 是光栅的谐振波长, $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 是纤芯模的有效折射

率, $n_{\text{eff}}^{\text{cl}}$ 是包层模的有效折射率, Λ 是 FMF-LPG 的周期。由式(1)可知,光栅的谐振波长取决于纤芯和包层模的有效折射率以及光栅的周期,且它们都是关于温度的函数^[13]。因此,对式(1)两边进行温度 T 微分,可以得到谐振波长的温度灵敏度,求解过程如式(2)所示。

$$\frac{d\lambda_{\text{res}}}{dT} = \left(\frac{dn_{\text{eff}}^{\text{co}}}{dT} - \frac{dn_{\text{eff}}^{\text{cl}}}{dT} \right) \Lambda + \left(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl}} \right) \frac{d\Lambda}{dT} \quad (2)$$

当外界温度发生变化时,光栅受到热光效应和弹光效应的影响,导致谐振波长发生漂移;由于光纤的热膨胀效应和热光效应,引起的光栅周期变化以及纤芯模与包层模的有效折射率变化分别为

$$\frac{d\Lambda}{dT} = \alpha \Lambda \quad (3)$$

$$\frac{dn_{\text{eff}}^{\text{co}}}{dT} = \xi_{\text{co}} n_{\text{eff}}^{\text{co}} \quad (4)$$

$$\frac{dn_{\text{eff}}^{\text{cl}}}{dT} = \xi_{\text{cl}} n_{\text{eff}}^{\text{cl}} \quad (5)$$

其中, α 是光纤的热膨胀系数, ξ_{co} 、 ξ_{cl} 分别是纤芯和包层的热光系数。将式(3)~式(5)代入式(2)中,同时考虑光纤的模式色散和波导色散,则式(2)整理后可得

$$\frac{d\lambda_{\text{res}}}{dT} = \lambda_{\text{res}} \frac{d\Lambda}{dT} \left(\alpha + \frac{\xi_{\text{co}} n_{\text{eff}}^{\text{co}} - \xi_{\text{cl}} n_{\text{eff}}^{\text{cl}}}{n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl}}} \right) \quad (6)$$

根据弹性力学和弹光效应理论可知,光纤的纤芯模与包层模的有效折射率及光栅周期不仅与温度相关,也受到轴向应变的影响。因此,通过分析相位匹配条件(式(1))并对其两边对应变 ε 取微分,可以得到谐振波长的应变灵敏度表达式为

$$\frac{d\lambda_{\text{res}}}{d\varepsilon} = \frac{dn_{\text{eff}}^{\text{co}}}{d\varepsilon} - \frac{dn_{\text{eff}}^{\text{cl}}}{d\varepsilon} \Lambda + \left(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl}} \right) \frac{d\Lambda}{d\varepsilon} \quad (7)$$

当光纤受到轴向应变时,光纤的弹光效应会导致纤芯和包层的有效折射率发生变化,这种变化的程度与弹光系数相关。考虑到光纤的模式色散和波导色散,则式(8)整理后可得

$$\frac{d\lambda_{\text{res}}}{d\varepsilon} = \lambda_{\text{res}} \frac{d\Lambda}{d\varepsilon} \left(1 + \frac{\eta_{\text{co}} n_{\text{eff}}^{\text{co}} - \eta_{\text{cl}} n_{\text{eff}}^{\text{cl}}}{n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl}}} \right) \quad (8)$$

其中, η_{co} 是纤芯的弹光系数, η_{cl} 是包层的弹光系数。

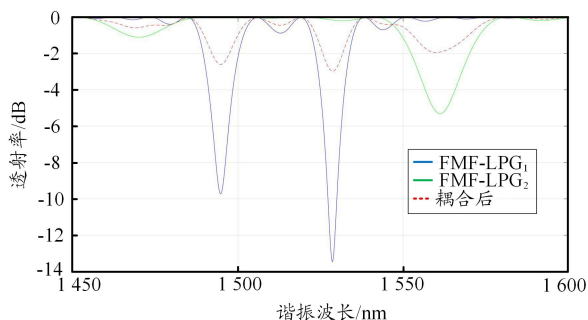
2 FMF-LPG 特性分析

为了分析系统中 2 个 FMF-LPG 谐振波长的变化,本文采用 Optigrating 对 FMF-LPG 建立仿真模型,

冯士强, 黄勇林, 杨文新: 基于少模光纤长周期光栅的新型传感系统

以探究应力及温度与谐振波长之间的关系。FMF 的参数设置如下: 纤芯直径为 $13.58\ \mu\text{m}$, 包层直径为 $125\ \mu\text{m}$; 纤芯折射率 n_1 为 1.450 6, 包层折射率 n_2 为 1.444 03。在模式分析中, 计算得出光纤可传输 2 种纤芯模 LP_{01} 和 LP_{11} , 有效折射率分别为 1.448 983 8、1.446 635 4; 还获得了包层模 LP_{02} 、 LP_{03} 、 LP_{12} 、 LP_{13} 的有效折射率分别为 1.444 001 1、1.443 885、1.443 962 4、1.443 796 8。每个光栅的光栅长度均为 $40\ \text{mm}$, 折射率调制深度为 0.000 3。

当 FMF-LPG_1 的周期设为 $300\ \mu\text{m}$ 时, 基于相位匹配条件可以计算出基模与 LP_{02} 、 LP_{03} 模式耦合的谐振波长分别为 $1\ 494$ 、 $1\ 529\ \text{nm}$ 。当 FMF-LPG_2 的周期设为 $550\ \mu\text{m}$ 时, 根据相同条件得到 LP_{11} 与 LP_{12} 、 LP_{13} 模式耦合的谐振波长分别为 $1\ 470$ 、 $1\ 561\ \text{nm}$ 。通过结合 Optigrating 和 Matlab 仿真, 本文计算得到 FMF-LPG_1 和 FMF-LPG_2 的透射谱, 如图 2 所示。图中虚线表示 2 个光栅经过 3 dB 耦合器耦合后的透射谱。可以看出, 由于 2 种光栅的谐振波长不同, 耦合后透射谱的透射率大致介于 2 种光栅之间, 且产生 4 个波谷。

图 2 FMF-LPG_1 和 FMF-LPG_2 经过 3 dB 耦合器的透射谱

2.1 温度特性

设置温度范围为 $0\sim 100^\circ\text{C}$, 以 20°C 为步长记录数据, 并使用 Origin 进行拟合, 研究此温度范围内光栅波长漂移的情况。 FMF-LPG 的 4 种耦合模式谐振波长随着温度的变化关系如图 3 所示。可以看出, 随着温度的升高, 各模式的谐振波长均向较长波长方向漂移。这是因为温度升高导致光纤材料膨胀, 使得光纤光栅的周期变长。根据式(1)可知, 随着光栅周期 Λ 的增大, 光栅的谐振波长 λ_{res} 也会随之增大。同时, 温度升高还会引起光纤折射率的变化。通常情况下, 光纤的折射率随温度上升而降低, 这也促使谐振波长向更长波长的方向漂移。此外, 4 种模式的谐振波长随温度变化呈现良好的线性关系。通过拟合曲线发现, 在同一周期的光栅中, 纤芯模和前 2 次包层模的线性拟合斜率非常接近; FMF-LPG_2 这 2 种模式 (LP_{11} - LP_{12} 与 LP_{11} -

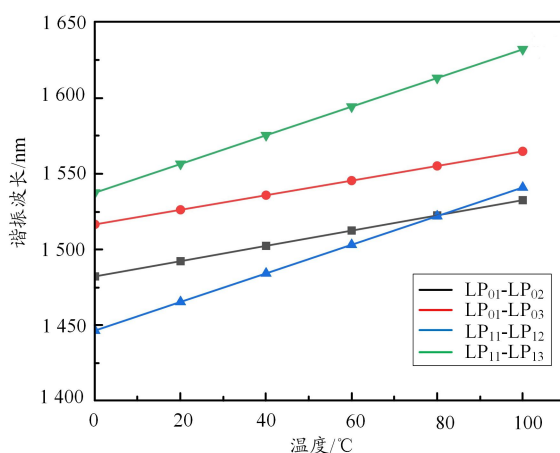


图 3 4 种耦合模式谐振波长随温度的变化关系

LP_{13}) 的线性拟合曲线斜率大约是 FMF-LPG_1 模式 (LP_{01} - LP_{02} 与 LP_{01} - LP_{03}) 的 2 倍; 在升温过程中, 4 种耦合模式的温度灵敏度分别为 $0.503\ 2$ 、 $0.481\ 6$ 、 $0.944\ 3$ 、 $0.945\ 8\ \text{nm}/^\circ\text{C}$ 。表明这些模式对温度变化具有不同的敏感度。所有拟合曲线的线性度 $R^2=1$, 说明实验数据与理论模型之间具有极好的一致性。

2.2 应力特性

设置应力范围为 $0\sim 500\ \mu\text{e}$, 以 $100\ \mu\text{e}$ 为步长记录数据, 并用 Origin 进行拟合。 FMF-LPG 的各模式谐振波长随着应力的变化关系如图 4 所示。可以看出, 与温度传感机制不同, 当施加的应力变大时, 各模式的谐振波长向短波长漂移。这是因为应力的增加会引起光纤的折射率增加, 折射率的增加会导致谐振波长向短波长方向漂移。此外, 4 种耦合模式谐振波长随应力的变化呈现出良好的线性关系, 拉伸应变灵敏度分别为 $-0.172\ 64$ 、 $-0.165\ 36$ 、 $-0.291\ 36$ 、 $0.290\ 28\ \text{nm}/\mu\text{e}$ 。拟合曲线线性度 $R^2=1$ 。实验数据与理论模型之间展示了

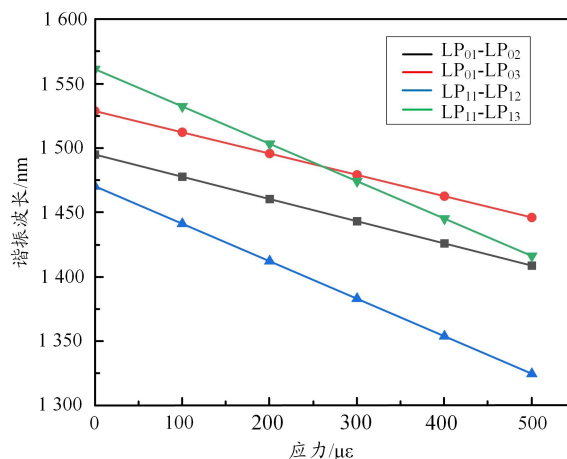


图 4 4 种耦合模式谐振波长随应力的变化关系

极高的吻合度, 这表明实际观测结果与预测模型之间具有显著的一致性。

通过对仿真结果的分析发现, 对于同一周期的光栅, 其纤芯模和前 2 次包层模在温度和应力灵敏度上都非常接近, 导致单一光栅的双波长解调方案无法有效解决交叉敏感问题。因此, 本文采用双光栅并联的方案。基于 2 个光栅纤芯模式 (FMF-LPG₁ 的 LP₀₁-LP₀₂ 模式和 FMF-LPG₂ 的 LP₁₁-LP₁₂ 模式) 的耦合透射谱, 通过 3 dB 耦合器将这些模式传输至光谱仪。所得波长与透射率在温度为 0~100 °C 之间的关系如图 5 所示。可以看出, 2 种模式通过 3 dB 耦合器耦合后的透射谱产生了 2 个波谷 Peak₁、Peak₂。由图中插图可知, 在经过耦合器后, 波长和温度之间的变化关系并非线性。由图 3 可知, 当温度达到 80 °C 时, 2 种模式 (LP₀₁-LP₀₂ 与 LP₁₁-LP₁₂) 的谐振波长出现交叉。这种情况下, 2 个谐振波长通过 3 dB 耦合在一起, 导致只产生了一个波谷, 即 Peak₁ 和 Peak₂ 重合, 并且在 80 °C 时透射谱深度显著影响。同理, 由图 4 可知, LP₁₁-LP₁₃ 模式、LP₀₁-LP₀₂ 模式以及 LP₀₁-LP₀₃ 模式之间存在交叉现象。因此, 本研究选择 LP₀₁-LP₀₃ 与 LP₁₁-LP₁₂ 这 2 种模式。

LP₀₁-LP₀₃ 与 LP₁₁-LP₁₂ 经 3 dB 耦合器耦合后, 产生了 2 个波谷 Peak₁ 和 Peak₂ 的波长随温度和应力变化的关系分别如图 6 和图 7 所示。可以看出, 2 个波谷的波长和温度之间的变化关系符合线性条件, 从而实现温度和应变的同时测量。

根据计算, 耦合后产生 Peak₁、Peak₂ 的温度灵敏度分别为 0.512 86、0.761 43 nm/°C, 应变灵敏度分别为 -0.138 57、-0.082 29 nm/μ ϵ 。由温度和应变引起的波长变化可以表示为

$$\Delta\lambda = K_{\epsilon}\Delta\epsilon + K_T\Delta T \quad (9)$$

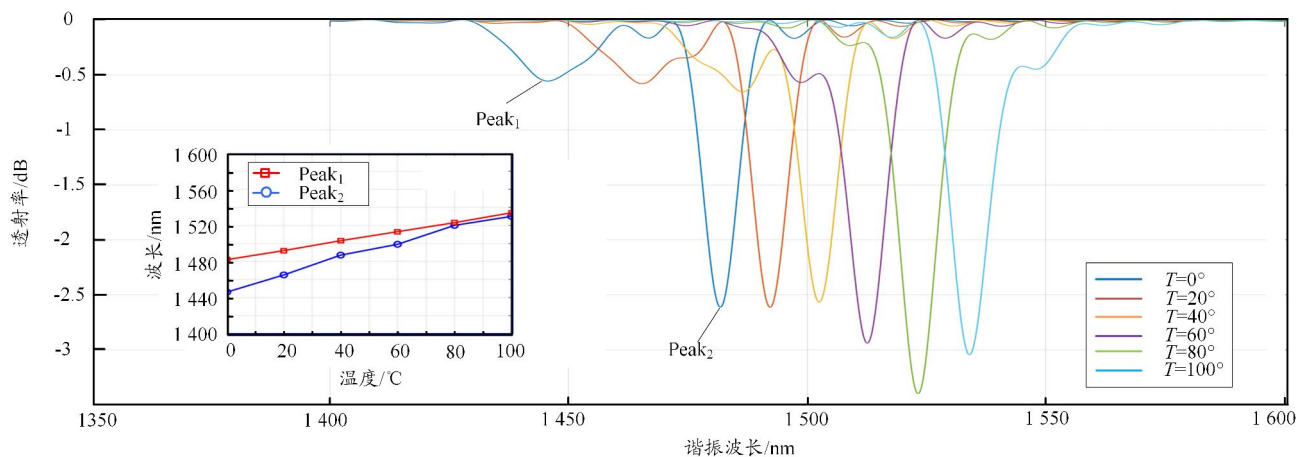


图 5 光栅的耦合透射光谱

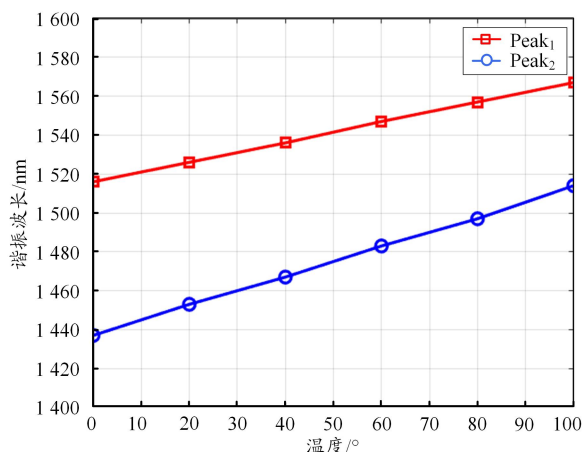


图 6 波长随温度的变化关系

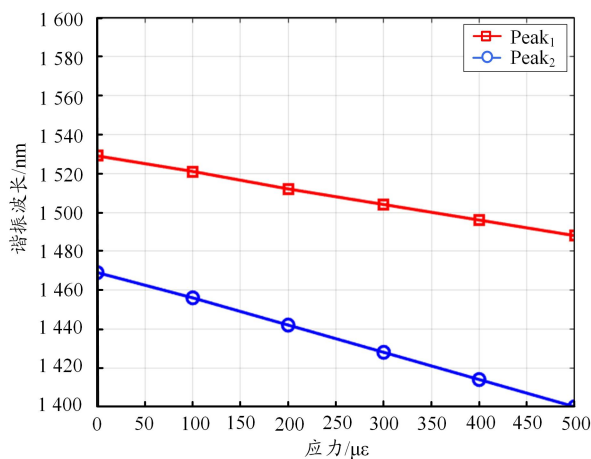


图 7 波长随应力的变化关系

其中, K_{ϵ} 、 K_T 分别为耦合后透射谱的应变和温度灵敏度系数。用 $K_{\epsilon 1}$ 和 $K_{\epsilon 2}$ 分别表示 Peak₁ 与 Peak₂ 的应变灵敏度系数, 而 K_{T1} 和 K_{T2} 则分别表示它们的温度灵敏度系数, 根据式 (10) 求出应变和温度的变化关系为

冯士强, 黄勇林, 杨文新: 基于少模光纤长周期光栅的新型传感系统

$$\begin{bmatrix} \Delta \varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{e1} & K_{T1} \\ K_{e2} & K_{T2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_1 \\ \Delta \lambda_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

将具体数值代入式(10)中,可以得到光栅传感器系统的灵敏度矩阵

$$\begin{bmatrix} \Delta \varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.138\ 57 & 0.512\ 86 \\ -0.082\ 29 & 0.761\ 43 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_1 \\ \Delta \lambda_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

根据式(11)的灵敏度矩阵,可通过 FMF-LPG 谐振峰波长的双波长测量实现对温度和应力的同步检测^[14]。相对于使用 2 个不同的中心反射波长光栅,这种方案只需要一个宽带光源,并且 2 个光栅通过耦合器形成双通道并联结构,能够有效解决由于波长范围较大导致的光谱扫描时间过长的问题。2 个周期不同的光栅中,纤芯模式和包层耦合产生不同的灵敏度,能够保证 $K_{e1}K_{T1}-K_{e2}K_{T2} \neq 0$,确保式(10)有唯一解。

3 结束语

本文提出了一种基于 FMF-LPG 的新型传感系统,该系统通过 3 dB 耦合器将 2 个周期不同的 FMF-LPG 并联,以实现同时对温度和应变的同时测量,并重点对 2 个不同周期的 FMF-LPG 进行了仿真分析,探讨了其在温度和应变下的响应特性。研究发现,当温度升高时,FMF-LPG 的 4 种耦合模式的谐振波长出现红移;而在应力增加时,4 种耦合模式的谐振波长则发生蓝移。此外,对于同一周期光栅中的纤芯模与前 2 次包层模的耦合灵敏度,无论是在温度还是应力方面,灵敏度都非常接近,不适于温度和应变的同时测量,因此本文选用了 FMF-LPG₁ 的 LP₀₁-LP₀₃ 与 FMF-LPG₂ 的 LP₁₁-LP₁₂ 耦合模式。经过耦合后在波谷 Peak₁、Peak₂ 的温度灵敏度分别为 0.512 86、0.761 43 nm/°C,应变灵敏度分别为 -0.138 57、-0.082 29 nm/μ ε 。综上所述,相较于使用 2 个中心波长的布喇格光栅系统,本文提出的 FMF-LPG 的新型传感系统能够节省一个宽带光

源。同时,它还能有效解决单个长周期光栅系统中存在的光谱扫描时间长的问题,从而提高了测量效率。这种新型传感系统在建筑、航天、工业等领域具有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 廖延彪. 光纤传感发展近况[J]. 光电子技术与信息, 2000(3): 27-29.
- [2] JAMES S W, TATAM R P. Optical fibre long-period grating sensors: characteristics and application[J]. Measurement science and technology, 2003, 14(5): R49-R61.
- [3] 李兵. 少模光纤长周期光纤光栅的研究与应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [4] 吴晓东. 基于光纤光栅传感原理的钢筋混凝土梁内部钢筋锈蚀检测方法研究[D]. 烟台: 鲁东大学, 2019.
- [5] 殷礼鑫. 基于 FBG 传感网络的飞行器结构状态检测系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2022.
- [6] 邵飞, 杨宁, 孙维, 等. 基于光纤传感的航天器结构健康状态监测研究[J]. 航天器工程, 2018, 27(2): 95-103.
- [7] ZHAO Z, DANG Y, TANG M, et al. Spatial-division multiplexed Brillouin distributed sensing based on a heterogeneous multicore fiber[J]. Optics Letters, 2017, 42(1): 171-174.
- [8] JANG M, KIM J S, UM S H, et al. Ultra-high curvature sensors for multi-bend structures using fiber Bragg gratings[J]. Optics Express, 2019, 27(3): 2074-2084.
- [9] XU M G, DONG L, REEKIE L, et al. Temperature-independent strain sensor using a chirped Bragg grating in a tapered optical fibre[J]. Electronics Letters, 1995, 31(10): 823-825.
- [10] BHATIA V, CAMPBELL D, CLAUS R O, et al. Simultaneous strain and temperature measurement with long-period gratings[J]. Optics Letters, 1997, 22(9): 648-650.
- [11] 王目光, 魏淮, 童治, 等. 利用双周期光纤光栅实现应变和温度同时测量[J]. 光学学报, 2002, 22(7): 867-869.
- [12] 杨焯. 长周期少模光纤光栅的设计与制备[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [13] 王义平. 新型长周期光纤光栅特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2003.
- [14] 焦冬莉, 郭文静, 薄晓宁, 等. 基于双周期光纤光栅的温度/折射率双参量传感器[J]. 光学技术, 2019, 45(4): 458-462.