

基于叠加级联长周期光纤光栅的温度和应变传感的理论分析

崔春雷, 冯建, 李锋

(广东交通职业技术学院 智慧交通工程学院, 广州 510650)

摘要: 设计了一种基于叠加型级联长周期光纤光栅的温度与应变双参量同时测量方案, 该方案结构小巧、成本低、制作简单; 方案在同一段光纤上重叠写入周期为 Λ_1 和 Λ_2 的两个子栅, 构成了叠加型级联长周期光纤光栅, 这种叠栅的透射谱稳定可控, 避免了串联式长周期光纤光栅透射谱谐振峰过于密集多峰、过于敏感不适合作为测量标的缺陷; 通过数值方法分析了不同周期、不同阶次谐振峰分别与温度及应变灵敏度的关系, 仿真表明: 在给定参数下, 光栅的周期越大、两子光栅的周期差也越大时温度与应变灵敏度也越高, 选用的两个谐振峰阶次越高、阶次的差异越大时温度与应变灵敏度也越高; 利用仿真结果设计了增敏的传感解调矩阵, 并对矩阵进行了摄动分析, 结果表明设计的解调矩阵相对于其他方案的条件数更低, 有效提高了传感器的抗扰性, 减小了测量误差对测量精度的影响。

关键词: 光纤光学; 长周期光纤光栅; 级联结构; 传感器; 抗扰性

Theoretical Analysis of Temperature and Strain Sensing Based on Superimposed Cascaded Long-period Fiber Gratings

CUI Chunlei, FENG Jian, LI Feng

(Intelligent Transportation Engineering College, Guangdong Communication Polytechnic, Guangzhou 510650, China)

Abstract: A dual-parameter simultaneous measurement scheme of temperature and strain based on superimposed long period gratings (SLPFG) is designed, which is compact in structure, low in cost and simple in fabrication. In the scheme, two sub-gratings with periods Λ_1 and Λ_2 are overlapped and written on the same fiber to form a superimposed long period grating (SLPFG). The transmission spectrum of this grating is stable and controllable, the disadvantages are avoided that the resonance peaks of the transmission spectrum of the tandem type cascaded long-period fiber grating (CLPFG) are too dense and multi-peaked, too sensitive, and not suitable as a measurement target. The relationship between different grating pitch, different order resonance peaks and temperature and strain sensitivity is analyzed by the numerical method. The simulation results show that, under the premise of fixing certain parameters, the greater the absolute pitch of the grating and the greater the difference of the pitch between the two sub-gratings, and the higher the temperature and strain sensitivity. The higher the order of the selected two resonance peaks and the greater the difference in order, and the higher the temperature and strain sensitivity. By the simulation results, a sensor demodulation matrix with enhanced sensitivity is designed, and the perturbation analysis of the matrix is carried out. The results show that the designed demodulation matrix has a lower condition number than other schemes, which effectively improves the immunity of the sensor, and the influence of measurement error on measurement accuracy is reduced.

Keywords: fiber optics; long period fiber grating; cascade structure; sensor; anti-disturbance

0 引言

长周期光纤光栅 (LPG, Long period fiber grating) 是一种透射型光纤光栅^[1], 作为一种新型光纤器件, 相对于布拉格光纤光栅 (FBG), 长周期光纤光栅对应变、温度、环境折射率、弯曲等环境参数的灵敏度更高^[2], 且具备多个损耗峰, 谐振峰波长与温度和应变之间有着较好的

线性关系^[3-4], 加上成本低、体积小, 近年来在传感领域受到普遍关注。多参数同时测量是光纤传感技术的发展趋势^[5], 但在工程测量中温度和应变会相互影响, 从而形成交叉敏感现象^[6-7]。目前常采用两种以上光栅组合的方式来克服交叉敏感实现多参数的测量^[8], 如采用 FBG 与 LPG 组合的方式^[9], LPG 与 HBG 组合的方式^[10], 用 LPG 与保偏光纤 sagnac 环组合的方式^[11], 这些方法主要利用不同

收稿日期: 2022-05-11; 修回日期: 2022-06-11。

基金项目: 教育部职业院校信息化教学研究课题 (2018LXA0006)、(pdjh2020b0978); 广东交通职业技术学院院级课题 (ZCK-B-07-18-029); 2020 年广东省科技创新战略专项资金 (“攀登计划”专项资金)。

作者简介: 崔春雷 (1978-), 男, 河南焦作人, 硕士, 讲师, 主要从人工智能、通信技术方向的研究。

引用格式: 崔春雷, 冯建, 李锋. 基于叠加级联长周期光纤光栅的温度和应变传感的理论分析[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(9): 280-285.

类型的光栅对温度与应变等参数的灵敏度的不同来实现多参数同时测量, 但这些方案的成本高, 制作工艺和光路复杂, 影响测量精度的因素多^[12]。为解决上述问题, 有学者采用同类型光栅串联的方式作为传感器, 如 pssetti 通过级联两个周期相同的光栅实现了多参数测量^[13], 但该方案中两段光栅使用相同的模式, 无法形成对温度和应力的差异化感应, 导致无法实现对温度与应力的同时独立测量。

本文提出了一种基于叠加型级联长周期光纤光栅的温度与应变双参数同时测量的方案, 该方案采用在同一段光纤上重叠写入两种不同周期的 LPFG, 利用周期不同的子栅具有不同的温度、应变响应这一特性, 设计了具有增敏和抗扰特性的解调矩阵, 从而实现温度与应变的高精度同时测量。

1 叠加型级联长周期光纤光栅的数学描述

常见的级联型长周期光纤光栅 (CLPFG, Cascaded Long-Period Fiber Grating) 一般采用串联的方式把两个光栅 LPFG1 与 LPFG2 连在一根光纤上。光经过 LPFG1 后, 纤芯模的一部分会被耦合进包层模, 然后包层模和剩余的纤芯模分别在包层和纤芯中传播距离 d , 之后包层模又耦合回 LPFG2 的纤芯并和纤芯模发生干涉, 其工作原理与 Mach-Zehnder 干涉仪相近^[14]。如图 1 所示, 因为纤芯模的干涉, 导致串联式级联型 LPFG 的光谱具有密集多峰的特点, 且光谱的密集程度和距离 d 、环境温度、光栅强度都高度敏感^[15], 这一特性决定了串联型级联型 LPFG 作为传感器是较为困难的。如陈美娟等人提出了基于串联级联 LPFG 的温度与应变传感器^[16], 但该方案并未考虑到串联型 LPFG 透射谱的因为过于密集多变无法成为稳定的测量标的。

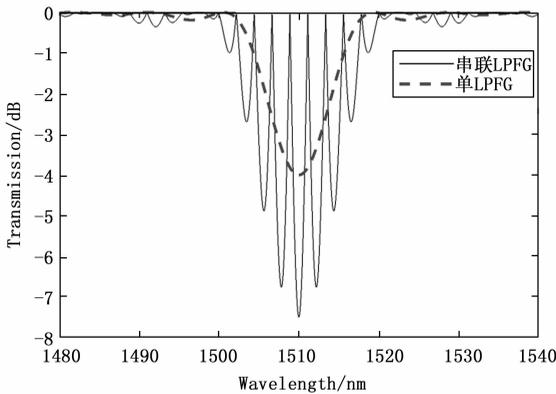


图 1 串联式级联型长周期光纤光栅 (CLPFG) 透射谱

为了克服 CLPFG 光谱过密不适合作为测量标的的缺陷, 本文提出了一种基于叠加型级联长周期光纤光栅 (SLPFG, Superimposed Long Period Fiber Grating) 的多参数传感器, 该传感器结构简单, 可以实现温度与应变的同时测量, 相对于单栅其灵敏度更高, 且克服了串联型级联 LPFG 作为传感器时光谱过于密集多峰的问题。

SLPFG 结构如图 2 所示, 在同一段光纤中重叠写入周期分别为 Δ_1 和 Δ_2 的两个子栅, 此时纤芯折射率改变量为:

$$\Delta n(z) = \sum_{i=1}^2 \Delta n_i + \Delta n_1 \sin\left(2\pi \frac{z}{\Delta_1}\right) + \Delta n_2 \sin\left(2\pi \frac{z}{\Delta_2}\right) \quad (1)$$

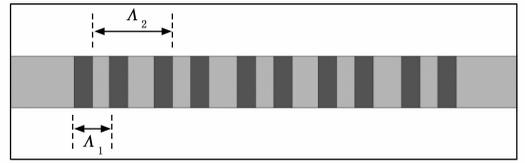


图 2 叠加型级联长周期光纤光栅 (SLPFG) 结构

其中: Δn_i 为第 i 个子光纤光栅的平均折射率该变量。在这种重叠级联式 LPFG 中, LPFG1 和 LPFG2 分别把纤芯模耦合到自身的某个包层模中, 从而避免了串联式级联 LPFG 中的光谱干涉现象。

此时, 光栅中耦合方程可以表示为^[17]:

$$\begin{cases} \frac{dA_1}{dZ} = k_1 A_2 + k_2 A_3 \\ \frac{dA_2}{dZ} = -k_1 A_1 + k_2 \delta_1 A_2 \\ \frac{dA_3}{dZ} = -k_2 A_1 + j 2 \delta_2 A_3 \end{cases} \quad (2)$$

其中: $A_1 = a_1(z)$, $A_2 = a_2(z) e^{j 2 \delta_1 z}$, $A_3 = a_3(z) e^{j 2 \delta_2 z}$; 这里 a_1, a_2, a_3 分别为纤芯基模和两个包层模式对应的振幅; k_1 和 k_2 分别表示 LPFG1 和 LPFG2 的纤芯基模和包层模的耦合系数; δ_1 和 δ_2 分别表示 LPFG1 和 LPFG2 中纤芯基模和包层模对应的失谐量, 且有:

$$\delta_1 = \frac{1}{2} \left(\beta_1 - \beta_2 - \frac{2\pi}{\Delta_1} \right), \delta_2 = \frac{1}{2} \left(\beta_1 - \beta_3 - \frac{2\pi}{\Delta_3} \right) \quad (3)$$

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 分别为纤芯基模以及 LPFG1 和 LPFG2 包层模的传播常数。通过求解方程 (2), 得到 A_1, A_2, A_3 后, 最终可得出长度为 L 的叠加级联长周期光纤光栅 (SLPFG) 的透射率为:

$$T = \left| \frac{A_1(L)}{A_1(0)} \right|^2 \quad (4)$$

图 3 为数值仿真得到的叠加型级联长周期光纤光栅 (SLPFG) 的传输谱, 其中 $\Delta_1 = 400 \mu\text{m}$, $\Delta_2 = 410 \mu\text{m}$ 仿真结果与文献 [18] 结论一致, 这里因 Δ_1 和 Δ_2 差距较小, 所以图中两个 LPFG 的同一阶次的谐振峰的位置也较为接近。

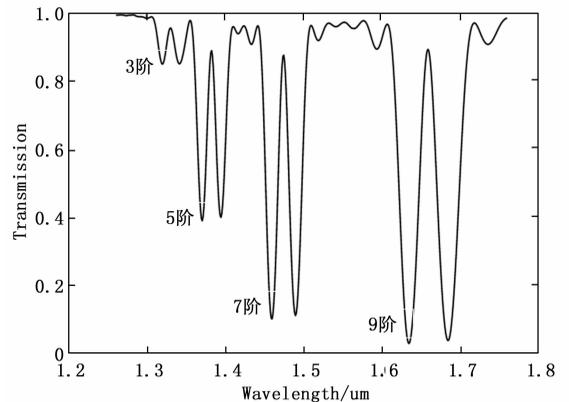


图 3 叠加型级联长周期光纤光栅 (SLPFG) 透射谱

2 叠加级联长周期光纤光栅双参数传感原理

长周期光纤光栅的耦合发生在纤芯基模和同向传播的

一阶 m 次包层模之间, 根据耦合模理论可得^[19]:

$$\lambda_m = (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m})\Lambda \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (5)$$

其中: λ_m 为谐振波长, $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$, $n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$ 分别为纤芯基模和一阶 m 次包层模对应的有效折射率, Λ 为光栅周期。由公式 (5) 可以看出, 谐振波长 λ_m 与有效折射率 $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$, $n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$ 相关, 而 $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$, $n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$ 又受到环境的温度、应变等参数的影响, 因此可以建立谐振波长 λ_m 与环境温度 (ΔT)、应变 ($\Delta \epsilon$) 的函数关系, 这是长周期光纤光栅作为双参数传感器的理论基础。

对 $\lambda_m(T, \epsilon)$ 进行泰勒展开, 当忽略高阶项时, 可得到:

$$\Delta \lambda_m = \frac{\partial \lambda}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial \lambda}{\partial \epsilon} \Delta \epsilon + \frac{\partial^2 \lambda}{\partial T \partial \epsilon} \Delta T \Delta \epsilon \quad (6)$$

式中, 最后一项为温度与应变的交叉敏感项, 在温度与应变较小时, 交叉敏感项对系统误差的影响非常小^[20], 可以忽略不计, 此时可把式 (6) 写为:

$$\Delta \lambda_m = K_T \Delta T + K_\epsilon \Delta \epsilon \quad (7)$$

当仅考虑应变作用时, LPFG 的谐振波长与应变关系为:

$$\Delta \lambda_m = K_\epsilon \Delta \epsilon = [(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}) + (p_{\text{cl}} n_{\text{eff}}^{\text{cl},m} - p_{\text{co}} n_{\text{eff}}^{\text{co}})] \Lambda \Delta \epsilon \quad (8)$$

当仅考虑温度作用时, LPFG 的谐振波长与和温度的关系为^[21]:

$$\Delta \lambda_m = K_T \Delta T = [(\xi_{\text{co}} n_{\text{eff}}^{\text{co}} - \xi_{\text{cl}} n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}) + \alpha (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m})] \Lambda + \frac{1}{2} (p_{11} + 2p_{12}) \alpha (p_{\text{cl}} n_{\text{eff}}^{\text{cl},m} - p_{\text{co}} n_{\text{eff}}^{\text{co}}) \lambda_m] \Delta T \quad (9)$$

其中: K_ϵ , K_T 分别是光栅的应变和温度灵敏度系数, Λ 为光栅周期, $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 为纤芯基模有效折射率, $n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$ 为 m 阶包层模的有效折射率, p_{co} 和 p_{cl} 为纤芯和包层的光弹系数, ξ_{co} 和 ξ_{cl} 为纤芯和包层的热光系数, p_{11} 和 p_{12} 为弹光张量的分量, α 为光纤的热膨胀系数。

LPFG 的谐振波长与温度或应变的灵敏度系数的大小与 LPFG 的周期以及损耗峰的阶次密切相关, 假定忽略温度和应变的交叉敏感, 此时 LPFG 的谐振波长与温度和应变为线性关系。对重叠级联长周期光纤光栅, 可以利用不同周期的不同谐振峰对温度和应变的差异性, 来达到增大传感器的灵敏度、减小交叉敏感的目的。当环境温度与应变同时改变时, LPFG1 与 LPFG2 的谐振波长会随着这两个环境参数的改变而发生漂移, 可表示为:

$$\begin{bmatrix} \Delta \lambda_{\text{LPG1}_m} \\ \Delta \lambda_{\text{LPG2}_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{T_LPG1_m} & K_{\epsilon_LPG1_m} \\ K_{T_LPG2_n} & K_{\epsilon_LPG2_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \epsilon \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中: $\Delta \lambda_{\text{LPG1}_m}$ 表示 LPFG1 的纤芯基模 LP_{01} 与 LP_{0m} 阶包层模的谐振峰的波长漂移量, $\Delta \lambda_{\text{LPG2}_n}$ 表示 LPFG2 的纤芯基模 LP_{01} 与 LP_{0n} 阶包层模的谐振峰的波长漂移量。 $K_{T_LPG1_m}$ 和 $K_{\epsilon_LPG1_m}$ 为 LPFG1 的 m 阶谐振峰波长与温度和应变之间的灵敏度系数, $K_{T_LPG2_n}$ 和 $K_{\epsilon_LPG2_n}$ 为 LPFG2 的 n 阶谐振峰波长与温度和应变之间的灵敏度系数。把式 (10) 逆运算, 得到:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \epsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{T_LPG1_m} & K_{\epsilon_LPG1_m} \\ K_{T_LPG2_n} & K_{\epsilon_LPG2_n} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_{\text{LPG1}_m} \\ \Delta \lambda_{\text{LPG2}_n} \end{bmatrix} \quad (11)$$

显然 SLPPFG 作为传感器时, 通过测量两个子栅对应的波长漂移量 $\Delta \lambda_{\text{LPG1}_m}$ 和 $\Delta \lambda_{\text{LPG2}_n}$, 然后带入公式 (11), 则可计算得到温度与应变的变化量 ΔT 和 $\Delta \epsilon$ 。

图 4 为基于叠加级联长周期光纤光栅 (SLPPFG) 的温度与应变传感系统。该系统主要分为三大部分: 宽带光源 (ASE)、SLPPFG 光栅、光谱仪 (OSA)。其中宽带光源 (ASE) 发出的光, 在经过 SLPPFG 光栅时因受环境温度与应变的作用, 会导致 SLPPFG 的透射谱中的谐振峰发生偏移, 且不同周期不同阶次的模式对应的谐振峰受环境因素的影响各不相同, 导致波峰的偏移量也各不相同, 经过光谱仪接收后, 利用设计的增敏解调矩阵, 就可以把环境温度与应变分别独立求出。

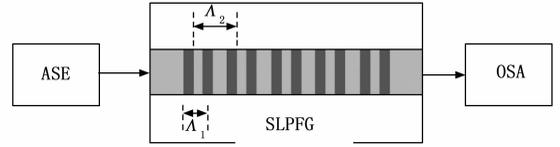


图 4 基于 SLPPFG 的传感系统

3 双参数传感的仿真与分析

为了使 SLPPFG 双参数传感系统工作于最佳波段, 需要先分析单个 LPFG 的透射谱与温度与应变灵敏之间的关系。进行数值仿真时设光栅参数为: $\alpha_1 = 4.15 \mu\text{m}$, $\alpha_2 = 62.5 \mu\text{m}$, $n_1 = 1.4681$, $n_2 = 1.4628$, 周期 $\Lambda = 400 \mu\text{m}$, 光栅长度为 $L = 3 \text{ cm}$, $p_{11} = 0.113$, $p_{12} = 0.252$, $\alpha = 5.5 \times 10^{-1}/^\circ\text{C}$, $\xi_{\text{co}} = 6.45 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $p_{\text{co}} = 0.22$, $t_0 = 20^\circ\text{C}$ 。由文献 [22] 可知温度敏感系数 K_T 的大小与正负主要由 ξ_{co} 和 ξ_{cl} 的相对大小决定, 且两者相差越大 K_T 越大, 这里设 $\xi_{\text{cl}} = 6.34 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。应变敏感系数 K_ϵ 的大小与正负主要由 p_{co} 和 p_{cl} 的相对大小决定^[23], 且两者相差越大 K_ϵ 越大, 这里设 $p_{\text{cl}} = 0.24$ 。

3.1 模序对温度与应变灵敏度的影响

采用上述参数, 通过数值计算得到了 1 510 nm 波长处不同阶包层模对应的温度系数 K_T 与应变系数 K_ϵ 的函数关系图。

图 5 为当 $\xi_{\text{cl}} < \xi_{\text{co}}$ 时温度系数 K_T 与模序的关系。由图可知 1~17 阶包层模所对应的温度系数 K_T 为正, 且随着阶次越高, 温度系数 K_T 也越来越大; 而 19 阶及之后的包层模

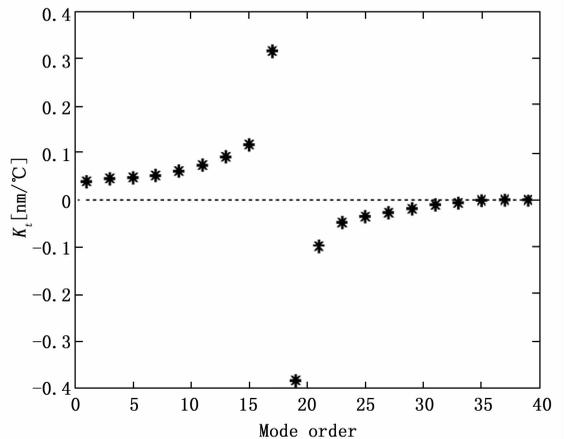


图 5 温度系数 K_T 与模序关系

对应的温度系数 K_T 为负, 且随着阶次的增加 K_T 的绝对值也快速减小。可见在测量温度时想获得足够高的灵敏度, 则所选的模序越接近 17 阶越好, 考虑到温度系数 K_T 的正负应尽量保持一致性, 本文只采用透射谱中 17 阶之前的模式的谐振峰作为测量标的。

图 6 为当 $p_{cl} > p_{co}$ 时应变系数 K_ϵ 与模序的关系。由图可知 19 阶包层模之前的 K_ϵ 为正, 且其值随着阶次的升高, 对应的应变系数 K_ϵ 也越来越大; 而 21 阶及之后的包层模对应的应变系数 K_ϵ 为负, 且 K_ϵ 的绝对值随着模序的增加而减小。由图 6 可知, 在测量应变时, 如果想获得足够高的灵敏度, 则所选的模序越接近 19 阶越好, 考虑到应变系数 K_ϵ 的正负应尽量保持一致性, 本文只采用透射谱中 19 阶之前谐振峰作为测量标的。

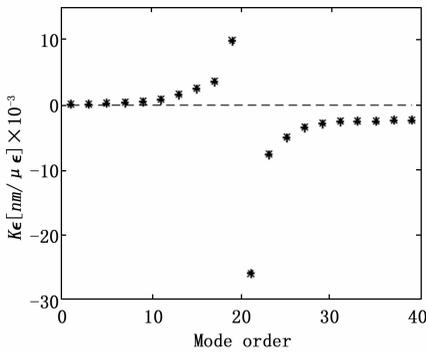


图 6 应变系数 K_ϵ 与模序关系

综合以上分析, 在给定的光栅参数前提下, 阶次较高的模式的谐振峰对环境敏感度也更高, 且在高阶次下的两个相邻模式之间的环境敏感度系数的差值也更大, 这有利于增加传感的灵敏度并降低交叉敏感。由此, 为了增加 SLPG 的传感性能, 结合图 5 和图 6, 本文在仿真 SLPG 传感系统时, 优先选择 17 阶之前且模序较高的谐振峰作为测量指标。

3.2 光栅周期对温度与应变灵敏度的影响

再来分析不同周期对灵敏度系数的影响。保持其他参数不变的前提下, 分析单个 LPFG 的光栅周期取不同值时对应的谐振峰的漂移量与温度的关系 (图 7), 以及谐振峰的漂移量与应变的关系 (图 8)。

图 7 为温度系数 K_T 与光栅周期之间的关系图, 图中的四条函数曲线从下到上分别是光栅周期取 350 μm 、400 μm 、450 μm 、500 μm 时 9 阶包层模的谐振峰波长漂移量与温度之间的关系。

相应的, 图 8 为应变系数 K_ϵ 与光栅周期之间的关系图, 图中的四条函数曲线从下到上分别是光栅周期取 350 μm 、400 μm 、450 μm 、500 μm 时 9 阶包层模的谐振峰波长漂移量与应变之间的关系。

由图 7 和图 8 可以看出, 单个长周期光纤光栅 (LPFG) 作为传感器时, 光栅周期越大则对应的温度与应变灵敏度也越高, 另一方面对两个光栅周期不同的 LPFG, 彼此之间的周期差值越大, 则两者之间相应的灵敏度系数

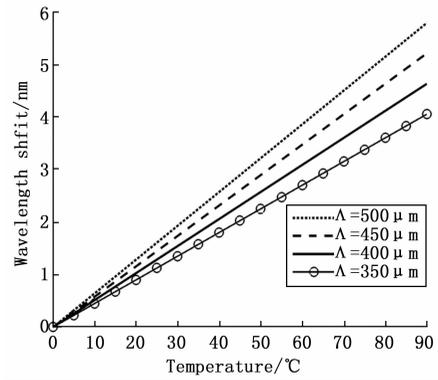


图 7 温度系数 K_T 与光栅周期关系

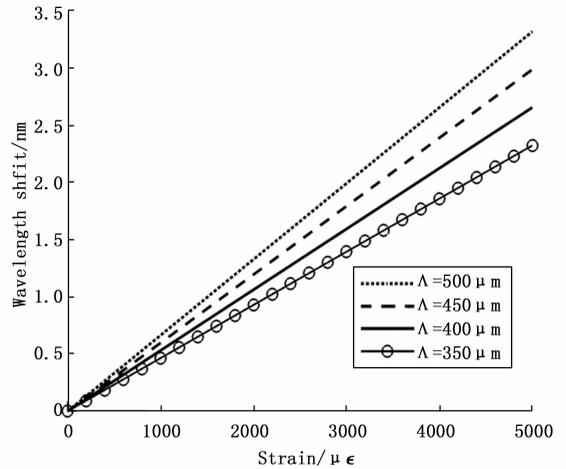


图 8 应变系数 K_ϵ 与光栅周期关系

之间的差异也越大。显然, 在使用 SLPG 制作温度与应变传感系统时, 叠加的两个子栅的周期也应尽量大, 且两个子栅的周期也要有一定差距, 这样不但可以有效提升系统整体的灵敏度, 也可以通过不同子栅之间灵敏度的差异来减小交叉敏感现象。

3.3 基于叠加级联长周期光纤光栅双参量传感的性能分析

在采用叠加型级联长周期光纤光栅 (SLPG) 进行温度与应变的双参数同时测量时, 不但要提高灵敏度, 还要尽可能的减少系统误差, 增强传感系统测量时的抗扰性, 为此公式 (10)、(11) 中的传感解调矩阵的行列式的绝对值在不为零的前提下应该越大越好, 原因如下:

把式 (11) 记为 $b = \mathbf{K}^{-1} \Delta \lambda$, 由于在测量波长偏移量 $\Delta \lambda$ 时会引入测量误差, 这里记为 $\delta \lambda$, 则有: $b + \delta b = \mathbf{K}^{-1} (\Delta \lambda + \delta \lambda)$ 。

$$\text{此时显然有: } \|\delta b\| > \|\mathbf{K}^{-1}\| \|\delta \lambda\| \quad (12)$$

分析式 (12) 可知, 如果要减少系统测量误差对测量精度的影响, 则 $\|\mathbf{K}^{-1}\|$ 应越小越好, 即灵敏度矩阵 $\|\mathbf{K}\|$ 的值越大越好, 这就要求灵敏度系数之比 $\frac{K_{T_LPFG1_m}}{K_{\epsilon_LPFG1_m}}$ 与 $\frac{K_{T_LPFG1_n}}{K_{\epsilon_LPFG1_n}}$ 的差异应该尽可能的大。因此, 要提升叠加型级联长周期光纤光栅 (SLPG) 的传感灵敏度和抗扰性, 则 SLPG 中的两

个子光栅的周期应该尽可能大，且作为测量标的两个谐振峰的模序要尽量高，模序的差异要尽可能大。

设 SLPFG 中的子栅 LPFG1 的周期为 $\Delta_1 = 390 \mu\text{m}$ ，选其 7 阶谐振峰作为观测量，设子栅 LPFG2 的周期 $\Delta_2 = 410 \mu\text{m}$ ，选其 9 阶谐振峰作为观测量，其他参数保持不变，计算得到： $K_{T_LPFG1_7} = 0.052 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ， $K_{T_LPFG2_9} = 0.062 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ， $K_{\epsilon_LPFG1_7} = 0.000033 \text{ nm}/\mu\epsilon$ ， $K_{\epsilon_LPFG2_9} = 0.000055 \text{ nm}/\mu\epsilon$ 。考虑到矩阵中元素之间大小差异过大时，会导致矩阵的条件数增大，矩阵趋向于病态^[24]，会放大测量误差带来的精度损失，于是把应力敏感系数调整单位后改为 $K_{\epsilon_LPFG1_7} = 0.033 \text{ nm}/100 \mu\epsilon$ ， $K_{\epsilon_LPFG2_9} = 0.055 \text{ nm}/100 \mu\epsilon$ ，并带入式 (11)，得到：

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \epsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.052 & 0.033 \\ 0.062 & 0.055 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{LPFG1_7} \\ \Delta\lambda_{LPFG2_9} \end{bmatrix} \quad (13)$$

于是通过测量叠加型级联长周期光纤光栅中 LPFG1 的 7 阶谐振波长的变化量 $\Delta\lambda_{LPFG1_7}$ 以及 LPFG2 的 9 阶谐振波长的变化量 $\Delta\lambda_{LPFG2_9}$ ，代入式 (13) 即可得到待测的温度变化量 ΔT 与应变变化量 $\Delta\epsilon$ 。

图 9 为根据本文的模型，仿真模拟的温度与应变同时作用于叠加型级联长周期光纤光栅 (SLPFG) 时，其透射谱的变化图。

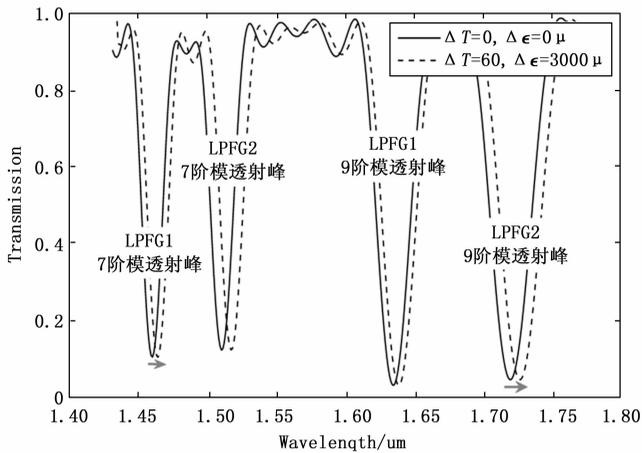


图 9 温度与应变同时改变时 SLPFG 谐振峰的变化

图 9 中的实线为环境参量 $\Delta T = 0$ ， $\Delta\epsilon = 0 \mu\epsilon$ 时的 SLPFG 的透射谱，从左到右分别是子栅 LPFG1 的 7 阶谐振峰、子栅 LPFG2 的 7 阶谐振峰、子栅 LPFG1 的 9 阶谐振峰、子栅 LPFG2 的 9 阶谐振峰；图中的虚线则为 $\Delta T = 60$ ， $\Delta\epsilon = 3000 \mu\epsilon$ 时上述各子栅的 7 阶和 9 阶的谐振峰。很明显，温度和应变的增加导致 SLPFG 的两个子栅的各阶次谐振峰整体向着长波长方向漂移，且阶次越高的谐振峰的波长漂移量也越大，另一方面阶次相同但周期不同的子栅的波长漂移量也不同，周期大的波长漂移量也更大。

再来分析基于叠加型级联长周期光纤光栅 (SLPFG) 的传感系统相对于单长周期光纤光栅 (LPFG) 传感系统的优势。如果传感系统采用单个 LPFG，测量标的仍选用 LP07 和 LP09 两个模式，通过仿真计算，得到传感解调矩

阵表达式为：

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \epsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.052 & 0.033 \\ 0.061 & 0.050 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{LPFG1_7} \\ \Delta\lambda_{LPFG2_9} \end{bmatrix} \quad (14)$$

分别计算式 (13) (14) 中矩阵的条件数 $\text{cond}(K)_\infty$ ，发现式 (13) 的 $\text{cond}(K)_\infty = 16.1$ ，而式 (14) 的 $\text{cond}(K)_\infty = 21.5$ ，根据矩阵的摄动分析理论可知式 (13) 中的传感解调矩阵对抗测量误差扰动的能力更强，即采用相同阶谐振峰作为标的时，基于 SLPFG 的传感器相对于单 LPFG 系统的敏感度更高、测量精度更好、抗扰性更强。

根据以上分析，在设计基于 SLPFG 的传感系统时，如果选用子栅周期差异更大，模序差异更大的两个谐振峰作为测量指标，则可以得到敏感度更高、抗扰性更强的传感矩阵。

4 结束语

本文提出了一种基于重叠级联长周期光栅光栅 (CLPFG) 的温度与应变双参数传感方案，通过在同一段光纤同时刻写两个周期各不相同的子栅得到叠加型级联长周期光纤光栅 (SLPFG)，利用周期不同的子 LPFG 具有不同的温度、应变传感特性实现了双参数同时测量。叠加型级联长周期光纤光栅 (SLPFG) 的透射谱相对于级联型长周期光栅 (CLPFG) 更加稳定易控，其谐振波长更适合作为测量标的。通过分析 LPFG 的温度与应力敏感系数与模序以及周期的关系，得到了传感器增敏的方法，并给出基于 SLPFG 双参数传感系统的传感解调矩阵，并分析了影响解调矩阵的传感精度的因素。通过矩阵摄动理论分析证明了基于 SLPFG 的双参数传感系统的性能要优于单 LPFG 和级联型 LPFG，加上本方案结构简单、光栅刻写容易，使得该方案具有较高的应用价值。

参考文献：

- [1] 赵晓云, 顾 铮. 三包层级联长周期光栅的传输谱特性 [J]. 中国激光, 2008 (10): 1532-1537.
- [2] KIM D K, LEE S L, CHOI S, et al. Bend-Insensitive Simultaneous Measurement of Strain and Temperature based on Cascaded Long-Period Fiber Gratings Inscribed on a Polarization-Maintaining Photonic Crystal Fiber [J]. Journal-Korean Physical Society, 2020, 76 (9): 810-818.
- [3] BHATIA V. Applications of long-period gratings to single and multi-parameter sensing [J]. Optics Express, 1999, 4 (11): 457-466.
- [4] 陆君辉, 施解龙. 含涂覆层长周期光纤光栅温度特性研究 [J]. 量子电子学报, 2012, 29 (2): 247-251.
- [5] 余 鸣, 傅志中. 基于光纤自适应耦合和自调谐的光纤光栅传感系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (5): 1772-1775.
- [6] HAN J, KIM J, LEE S L, et al. Strain-Insensitive Simultaneous Measurement of Bending and Temperature Based on Cascaded Long-Period Fiber Gratings Inscribed on Double-Clad Fiber [J]. IEEE Sensors Journal, 2020 (99): 1.
- [7] 梁丽丽, 刘明生, 李 燕, 等. 长周期光纤光栅温度传感器应变交叉敏感的研究 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44 (3): 1020-1023.

