

基于优化解调算法的光纤传感器交叉敏感问题研究

鲍克勤, 倪蓉, 张雪健

(上海电力大学 自动化工程学院, 上海 200090)

摘要: 光纤传感器固有的交叉敏感问题一直是光纤传感技术应用中亟需解决的问题。提出了一种多目标粒子群优化(MPSO)解调算法, 分别讨论了2个光纤布喇格光栅(FBG)中心波长在相同与不同的传感系统中的解调情况, 以及不同反射率对解调结果的影响。该算法不仅具备较高检测精度(温度测量精度为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 应变精度为 $0.5\text{ }\mu\text{e}$), 而且系统结构简单、易于实现, 对FBG的材料、结构、中心波长及反射率无严格限制。

关键词: 光纤布喇格光栅; 光纤传感器; 交叉敏感; 优化算法; 解调

中图分类号: TP212 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2020)03-0017-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.03.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on cross sensitivity of optical fiber sensor based on optimized demodulation algorithm

BAO Keqin, NI Rong, ZHANG Xuejian

(School of Automation Engineering, Shanghai Electric Power University, Shanghai 200090, China)

Abstract: The inherent cross sensitivity of optical fiber sensor is always an urgent problem to be solved in the application of optical fiber sensing technology. A multi-objective particle swarm optimization (MPSO) demodulation algorithm is proposed. The demodulation of two fiber Bragg grating (FBG) central wavelengths in the same and different sensing systems is discussed respectively, and the influence of different reflectivity on the demodulation results is also discussed. This method not only has high detection accuracy, the temperature measurement accuracy is $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, the strain accuracy is $0.5\text{ }\mu\text{e}$, but also the system structure is simple and easy to realize, which has no strict restrictions on the material, structure, central wavelength and reflectivity of FBG.

Key words: fiber Bragg grating; optical fiber sensor; cross sensitivity; optimized algorithm; demodulation

0 引言

随着光纤传感技术^[1]的发展, 光纤布喇格光栅(FBG)传感器理论与工程应用都取得了很大的进步。FBG传感器测量对象极其广泛, 在电力、医学、土木和航天等领域均有涉及^[2-7]。但是, FBG传感器中固有的交叉敏感问题, 一直是研究的热点和难点^[8]。

目前, 解决FBG交叉敏感问题的方案很多。例如: 双波长矩阵法^[9,10], 通过2个敏感系数不同的FBG感

收稿日期: 2019-08-29。

基金项目: 国家自然科学基金(61573239)资助。

作者简介: 鲍克勤(1965-), 男, 硕士, 副教授, 在上海电力大学自动化工程学院任教, 主要研究方向为电厂控制系统优化、电网安全评估技术以及电气设备状态检测技术。曾获得“华东电网科技奖”、“浙江省电力公司科技进步奖”等奖项。



应温度、应变的变化量, 但两者的中心波长值在不同带宽范围内, 需要2套解调系统。长周期法利用长周期光栅能够对温度、应力变化产生不同程度响应, 并结合短周期FBG实现温度、应变的同时测量, 进行长周期光栅与短周期光栅同时解调, 但该方法对解调系统要求较高^[11-13]。参考光栅法^[14], 采用2个温度特性相同的光栅组成测量系统, 传感光栅感应温度、应力变化, 但参考光栅仅感应温度变化。此外, 还可以通过不同的封装结构来控制调节由温度引起的波长漂移, 起到温度补偿作用, 但封装结构过于复杂、稳定性差^[15,16]。

本文基于温度、应变交叉敏感的原理, 提出多目标粒子群优化(MPSO)解调算法, 有效克服传统方法中对FBG结构和参数的严格限制, 实现简单高效的温度、应变解调。在满足解调精度的基础上, 进一步降低测量系统组建的复杂度, 解决传统的交叉敏感问题。

1 FBG 交叉敏感原理

根据光纤光栅耦合模理论,宽带光从 FBG 入射,会发生模式耦合,使得满足 Bragg 条件的光被反射。当外界所测物理量(温度、应变等)发生变化时,波长发生漂移,引起中心波长的变化为:

$$\Delta\lambda_B=(1-P_e)\lambda_B\Delta\varepsilon+(\alpha+\xi)\lambda_B\Delta T=K_\varepsilon\Delta\varepsilon+K_T\Delta T \quad (1)$$

其中, P_e 为纤芯的有效弹光系数, ε 为应变变量, α 为热膨胀系数, ξ 为热光系数, ΔT 为温度变化量, K_ε 为应变敏感系数, K_T 为温度敏感系数。当温度和应变同时改变时,根据中心波长漂移量无法区分温度、应变的变化量,即 FBG 交叉敏感原理。

2 MPSO 优化解调算法原理

2.1 基于目标粒子群(PSO)算法的解调模型

根据 FBG 交叉敏感原理可知,采用单个 FBG 无法区分温度、应变的变化量。因此,本文在传感器中放置 2 个 FBG 同时测量,其中一个 FBG 对温度、应变进行测量;另一个

FBG 起温度补偿作用。该方法只需要 1 套解调系统和 1 个光源,结构简单,其结构图如图 1 所示。

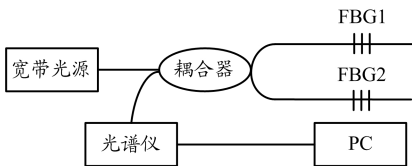


图 1 基于 PSO 算法的系统结构图

本文根据光谱形状的信息对光谱进行解调,对 2 个 FBG 的中心波长、敏感系数无特殊要求。假设 2 个 FBG 的反射谱为高斯光谱 $g_1(\lambda)$ 、 $g_2(\lambda)$,原始合成光谱 $R(\lambda)$ 为:

$$R(\lambda)=r_1g_1(\lambda-\lambda_{B1})+r_2g_2(\lambda-\lambda_{B2})+N(\lambda) \quad (2)$$

其中, r_1 、 r_2 为 FBG1、FBG2 的峰值反射率, λ_{B1} 、 λ_{B2} 为 FBG1、FBG2 的中心波长, $N(\lambda)$ 为光谱中的高斯白噪声。

为了便于对波长进行解调,重构光谱的表达式如下:

$$R_v(\lambda)=r_1g_1(\lambda-x_{B1})+r_2g_2(\lambda-x_{B2}) \quad (3)$$

其中, x_{B1} 、 x_{B2} 为 FBG1、FBG2 重构后的中心波长。

原始光谱与重构后的光谱的方差为:

$$f(x_B)=\int_0^\infty (R(\lambda)-R_v(\lambda))^2d\lambda \quad (4)$$

式(4)即为 PSO 算法中的目标函数。

2.2 PSO 算法的优化改进

PSO 算法起源于鸟群觅食,是一种群体智能算法。

鸟群中每个个体,即粒子在 D 维搜索空间中寻求最优解。粒子在寻优过程中,不断更新迭代速度、位置,直至达到终止条件,获得最优解。假设 D 维搜索空间中有 m 个粒子,第 i 个粒子由 FBG 的中心波长构成, $\lambda_i=(\lambda_1,\lambda_2,\dots,\lambda_d)$,粒子 i 的速度为 $v_i=(v_{i1},v_{i2},\dots,v_{id})$,位置为 $X_i=(x_{i1},x_{i2},\dots,x_{id})$,粒子 i 的个体最优位置 $p_i=(p_{i1},p_{i2},\dots,p_{id})$,粒子种群最优位置 $p_g=(p_{g1},p_{g2},\dots,p_{gd})$ 。通过不断更新迭代得到最优解,即解调后的 FBG 中心波长。综上,第 i 个粒子的更新迭代公式如下:

$$\begin{cases} v_{id}^{t+1}=wv_{id}^t+c_1r_1(p_{id}^t-x_{id}^t)+c_2r_2(p_{gd}^t-x_{id}^t) \\ x_{id}^{t+1}=x_{id}^t+v_{id}^{t+1} \end{cases} \quad (5)$$

其中, d 为搜索空间维数($d=1,2,\dots,D$), t 为迭代次数, w 为惯性权重, c_1 为自身学习因子, c_2 为社会学习因子, r_1 、 r_2 为 $[0,1]$ 上的随机数。

2.2.1 惯性权重的优化改进

惯性权重 w 在 PSO 算法中至关重要。当 w 取值较大时,便于在全局搜索中提高种群的多样性,避免陷入早熟;当 w 取值较小时,可以提高收敛精度,实现精确的局部搜索。在基本 PSO 算法中, w 的取值范围在 $(0,1)$ 之间,是一个固定值,无法平衡全局搜索能力和局部搜索能力。因此,将惯性权重做如下改进:

$$w=w_{\min}+(w_{\max}-w_{\min})\sqrt{\frac{t}{N}} \quad (6)$$

其中, $w_{\max}$ 、 $w_{\min}$ 分别为最大、最小惯性权重值, t 为当前迭代次数, N 为最大迭代次数。

由式(6)可知,改进后的惯性权重为非线性递减变化。在搜索初期时, w 的取值较大,随着迭代过程进行 w 逐渐减小。而采用动态惯性权重,在搜索初期时能够提高算法的全局搜索能力;在后期进行局部搜索时可以提高搜索精度。

2.2.2 学习因子的优化改进

在粒子寻优过程中, c_1 在算法初期起主要作用。若 c_1 取值过大,粒子容易陷入局部范围内,搜索能力有限。在算法后期通过学习种群信息,完成寻优,若 c_2 取值过大,会导致在局部范围内过早收敛。本文采用动态变化的学习因子,将 c_1 、 c_2 做如下改进:

$$\begin{cases} c_1=c_{1s}-(c_{1s}-c_{1e})\cos(w) \\ c_2=c_{2s}+(c_{2e}-c_{2s})\cos(w) \end{cases} \quad (7)$$

其中, c_{1s} 、 c_{2s} 为学习因子初值, c_{1e} 、 c_{2e} 为学习因子终值。

在算法初期,通过采用动态学习因子,加强自身学习因子 c_1 ,弱化社会学习因子 c_2 ,有利于加快搜索速度,提高搜索能力;在算法后期,加强社会学习因子 c_2 ,

减弱自身学习因子 c_1 , 增强群体多样性,避免陷入局部极小值,获取全局最优解。

因此,本文根据 PSO 的优化改进提出多目标粒子群(MPSO)优化解调算法,其流程图如图 2 所示。

3 仿真与分析

本文在 Matlab 中进行算法仿真,采用 MPSO 优化算法解调出

2 个 FBG 的中心波长: FBG1 同时感应温度、应力变化;FBG2 只感应温度变化,对应应变传感器进行温度补偿。依据中心波长偏移量计算对应的温度、应变,如式(8)所示:

$$\begin{cases} \Delta\lambda_1 = K_{e1} \Delta\varepsilon + K_{T1} \Delta T \\ \Delta\lambda_2 = K_{T2} \Delta T \end{cases} \quad (8)$$

取 $K_{T1}=10.24, K_{e1}=1.205, K_{T2}=10.2$, 计算分析在该种解调算法下温度、应变的解调精度。为了进一步验证本文提出的优化解调算法,分别对不同情况的 2 个 FBG 进行数值仿真,参数设置如下:2 个 FBG 的中心波长取 1525~1565 nm 之间,在每个独立光谱中加入高斯噪声,2 个 FBG 的反射率取不同值。

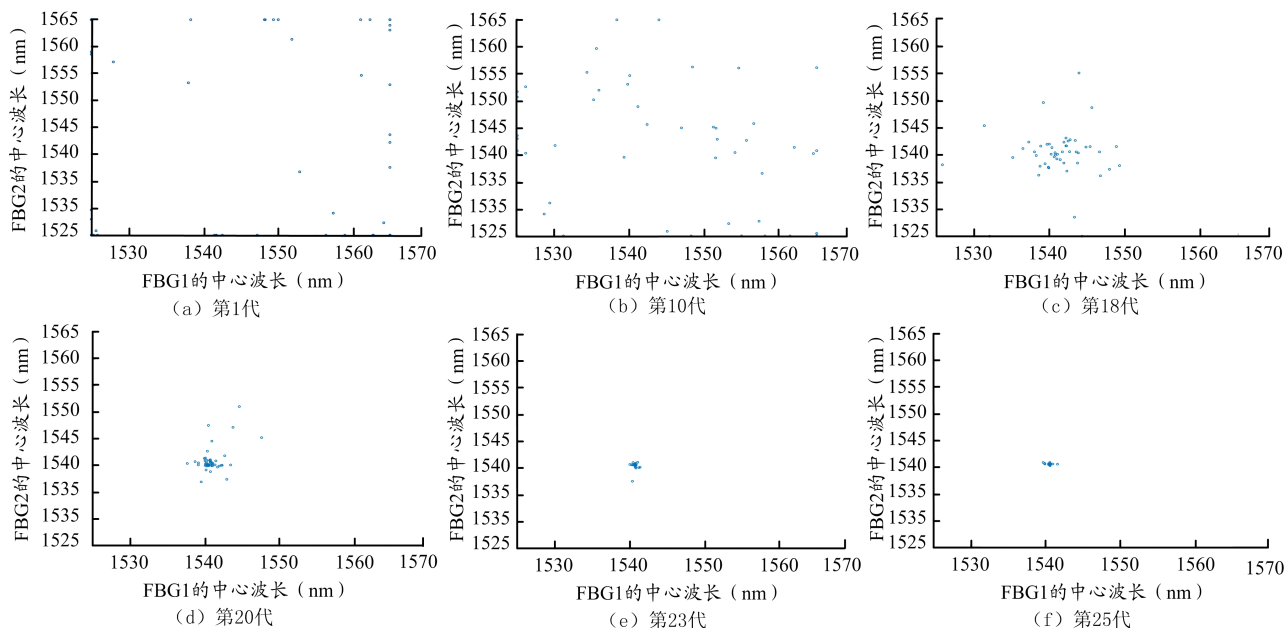


图 3 PSO 算法粒子运动图

3.1 2 个 FBG 中心波长相同时的解调情况

仿真时设置 2 个 FBG 中心波长都为 1540.6 nm, 反射率 $r_1=0.95, r_2=0.85$ 。

3.1.1 温度不变,只改变应力

本文首先研究系统在温度不变只有应力变化时的波长解调情况。每次仿真时应力增加 $10 \mu\varepsilon$,直至增加到 $500 \mu\varepsilon$,这样进行 50 组仿真,每组仿真运行 10 次,取平均值。分别采用 PSO 算法和 MPSO 算法求解粒子运动过程,结果如图 3 和图 4 所示。通过对比 2 种算法的粒子运动轨迹可知,MPSO 算法比 PSO 算法收敛速度快,具备高效性,在第 25 代时能够寻到最优解,即 2 个 FBG 的中心波长;而 PSO 算法在 25 代时未能收敛,粒子仍在搜索状态。MPSO 算法的平均耗时约为 0.52 s,PSO 算法平均耗时 6.4 s。因此,MPSO 算法在解调的时效性上优势明显。

2 种算法的适应度值变化情况如图 5 所示。2 种算法迭代次数都为 25,可以看出 MPSO 算法适应度值收敛较快,其最终适应度值比 PSO 算法适应度值小 5 个数量级,适应度值更接近 0,说明 MPSO 优化算法的精确度更高。

仿真过程中,FBG1 同时感应温度和应变,中心波长逐渐增大;FBG2 只感应温度,所以中心波长不变。通过 PSO、MPSO 算法求解每次施加应力后 FBG1 的反射波长与中心波长的偏移量,根据偏移量解调可得到温度和应变值。我们对算法输出的反射波长进行线性拟合,得到拟合曲线如图 6 所示。应变波长拟合曲线函数的斜率为 0.0012047,每步应力变化量为

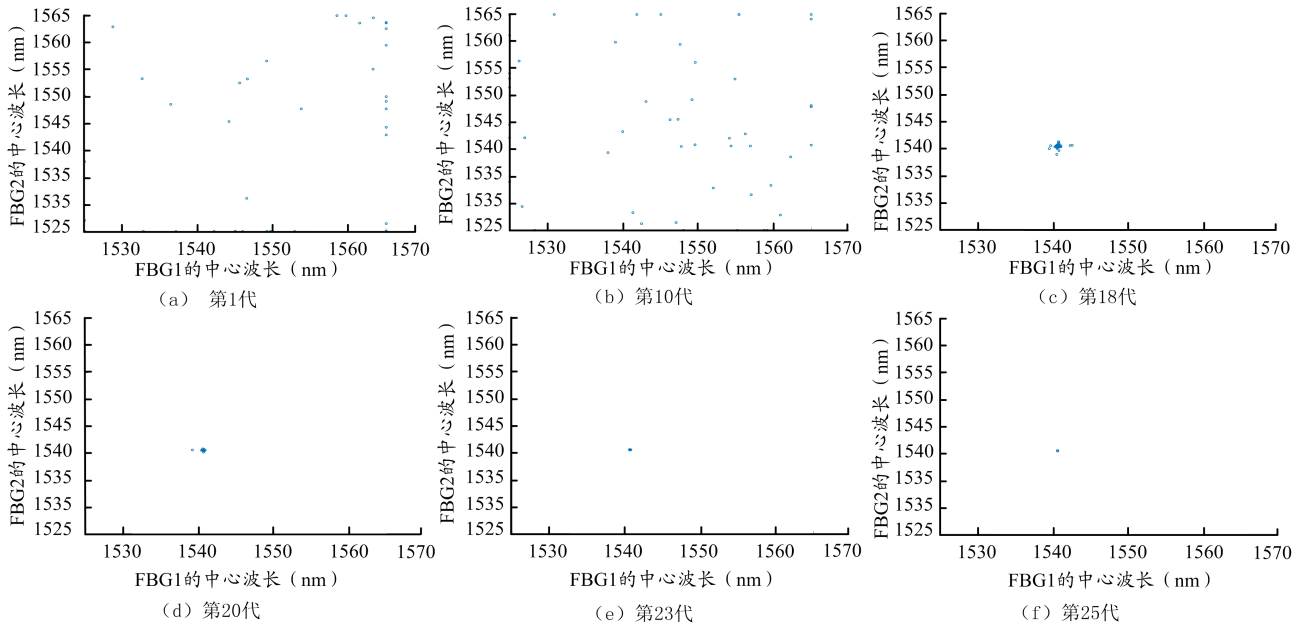
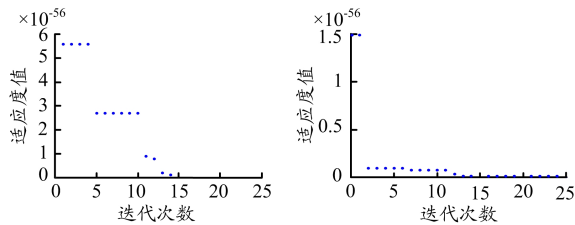


图4 MPSO解调算法粒子运动图



(a) PSO算法适应度值变化情况 (b) MPSO算法适应度值变化情况

图5 2种算法适应度值变化情况

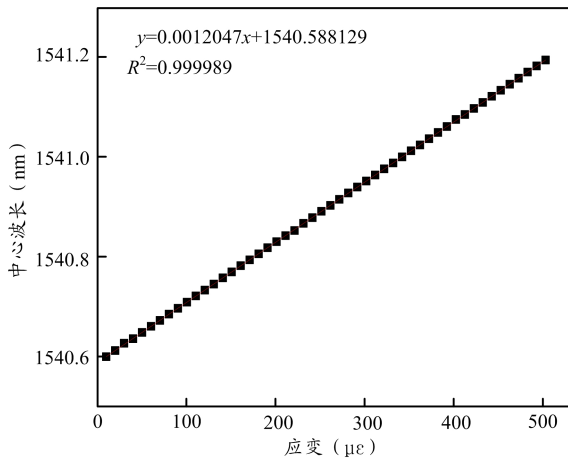


图6 应变-波长拟合图

10 $\mu\epsilon$, 应变敏感系数 $K_{\epsilon 1}=1.2047 \text{ pm}/\mu\epsilon$, 与理论设置值基本一致。拟合优度 R^2 为 0.999989, 线性关系良好。

3.1.2 温度、应力同时改变

本文其次研究系统在温度、应力同时改变时的波长解调情况。2个FBG的参数仍同上,每次仿真时温

度增加 2°C , 应变增加 $5 \mu\epsilon$, 进行 15 组仿真, 且每组仿真重复运行 10 次, 取平均值。温度、应力解调曲线如图 7 所示。温度和应变的拟合优度 R^2 分别为 0.999907、0.999824, 线性拟合度较好。温度、应变解调系数分别为 1.992422、5.014459, 与实际变化率十分接近。温度、应变的解调结果中, 温度解调平均误差为 0.05194°C , 最大误差为 0.09853°C ; 应变解调平均误差为 $0.1955 \mu\epsilon$, 最大误差为 $0.415 \mu\epsilon$ 。

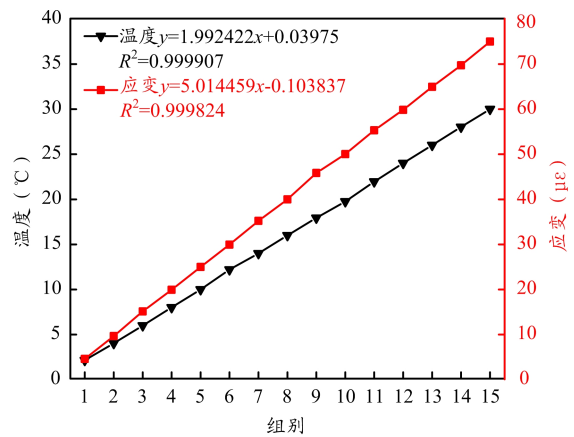


图7 温度、应力同时改变时的温度-应变解调结果

3.1.3 改变反射率

假设 2 个 FBG 反射率分别为 $r_1=0.92$ 、 $r_2=0.36$, 只考虑同时改变温度、应力的解调过程, 温度应力改变量与上节相同, 获得解调结果如图 8 所示。改变反射率后, 温度、应变的解调结果中, 温度解调平均误差为 0.02497°C , 最大误差为 0.09873°C ; 应变解调平均误差为 $0.1717 \mu\epsilon$, 最大误差为 $0.4611 \mu\epsilon$ 。

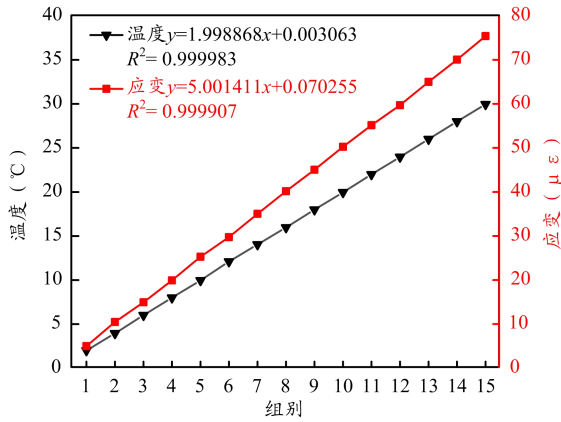


图8 改变反射率时温度-应变解调结果

3.2 2个FBG中心波长不同时的解调情况

本文对2个FBG中心波长不同时的解调过程进行研究,仿真过程参照2个FBG中心波长相同时的温度不变、只改变应力;温度、应力同时改变;改变反射率这3种情况下的解调过程。假设2个FBG中心波长 $\lambda_{B1}=1545.2\text{ nm}$, $\lambda_{B2}=1545.6\text{ nm}$,反射率 $r_1=0.96$ 、 $r_2=0.84$ 。3种情况下的解调误差如表1所示。

表1 2个FBG中心波长不同时,3种情况下的温度、应变解调结果

误差类型	3种情况下的解调数值		
	温度不变, 只改变应力	温度、应力 同时改变	改变反射率
温度平均误差(°C)	0.06712	0.05824	0.03561
温度最大误差(°C)	0.07853	0.08445	0.08562
应变平均误差(με)	0.1859	0.2136	0.1786
应变最大误差(με)	0.3541	0.4552	0.3842

仿真验证表明:在2个中心波长不同的条件下,解调结果仍满足测量要求,温度解调精度达到 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,应变解调精度达到 $0.5\text{ }\mu\text{ε}$ 。因此,MPSO优化解调算法对2个FBG的中心波长没有严格限制,只需要在光谱仪测量范围内即可,且系统结构简单,对传感器的材料结构无特殊要求。

4 结束语

本文提出了MPSO优化解调算法,解决了光纤传感器中固有的温度、应变交叉敏感问题。该方法对2个FBG系统中的中心波长无要求,只要在光谱仪工作范围内在传感系统的构建上更加简易;无需对FBG的封装及结构进行特殊处理,便于操作与实现。该种解调方法对传感系统本身要求不高,且容易进行复用,

能进一步扩大传感网络,实现大规模测量。数值仿真过程中,分别讨论了2个FBG中心波长相同和不同时的解调情况,仿真结果表明都能实现温度、应变的有效区分。其中,温度测量精度为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,应变精度为 $0.5\text{ }\mu\text{ε}$,该优化算法能满足实际测量中对精度的要求。

参考文献:

- [1] 侯俊芳,裴丽,李卓轩,等. 光纤传感技术的研究进展及应用[J]. 光电技术用,2012,27(1):49-53.
- [2] 李强,王艳松,刘学民. 光纤温度传感器在电力系统中的应用现状综述[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(1):135-140.
- [3] 魏红霞. 基于光纤光栅的电力电缆温度在线监测系统研究 [D]. 武汉:武汉理工大学,2010.
- [4] 孙素梅,陈洪耀,尹国盛. 光纤传感器的基本原理及在医学上的应用[J]. 中国医学物理学杂志,2008(5):846-850.
- [5] 何建平. 全尺度光纤布里渊分布式监测技术及其在土木工程的应用 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
- [6] CHEN Z, YANG Y, XIE Y, et al. Non-contact crack detection of high-speed blades based on principal component analysis and Euclidian angles using optical-fiber sensors [J]. Sensors & Actuators A Physical, 2013, 201(10): 66-72.
- [7] LAMBERTI A, LUYCKX G, PAEPEGEM W V, et al. Detection, Localization and Quantification of Impact Events on a Stiffened Composite Panel with Embedded Fiber Bragg Grating Sensor Networks [J]. Sensors, 2017, 17(4): 743-746.
- [8] ZHOU Q, NING T, PEI L, et al. Temperature-insensitive fiber Bragg grating strain sensor [J]. Optoelectronics Letters, 2012, 8(6): 414-417.
- [9] 鲍吉龙,章献民,陈抗生,等. 双波长光纤光栅的矩阵分析[J]. 光子学报,2000(1):87-90.
- [10] 吴薇,陈婷. 一种消除交叉敏感影响的修正双波长矩阵算法[J]. 半导体光电,2010,31(2):217-219.
- [11] ZHOU Kaiming, MYKHAYLO D, MOU Chengbo, et al. Line-by-Line Fiber Bragg Grating Made by Femtosecond Laser [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(16): 1190-1192.
- [12] 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.
- [13] WEI Shiming, MA Ruiyong, LI Baofu, et al. Study on the monitoring method of three-dimensional stress with FBG in surrounding rock and the similar experiment [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015(1): 138-140.
- [14] 万里冰,王殿富. 基于参考光栅的光纤光栅应变传感器温度补偿[J]. 光子·激光,2006(1):50-53.
- [15] BHOWMIK K, PENG G, LUO Y, et al. High intrinsic sensitivity etched polymer fiber Bragg grating pair for simultaneous strain and temperature measurements[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(8): 2453-2459.
- [16] SAMPATH U, KIM D, KIM H, et al. Fiber-optic sensor for simultaneous strain and temperature monitoring in composite materials at cryogenic condition [C]//25th International Conference on Optical Fibre Sensors, April 24-28, 2017, Jeju Island, Korea. New York: IEEE, 2017.