

## 基于遗传算法的光纤光栅交叉敏感解调研究

刘超明, 娄淑琴

(北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 光纤光栅在现代传感领域应用广泛, 但交叉敏感特性严重制约了其发展。针对光纤光栅在传感领域应用中存在温度与应力交叉敏感的问题, 提出了一种基于遗传算法的解调方案, 建立了遗传算法的快速解调模型, 经过数学分析得到遗传算法目标方程、适应度函数, 系统讨论了参考光纤光栅与传感光栅的反射中心波长不同、反射峰值不同情况下的解调结果。数值研究结果表明, 提出的基于遗传算法的解调方案可以有效地解调出参考光纤光栅与传感光栅参数不同情况下的温度与应变变化, 有效地区分出温度与应力的影响, 温度检测精度为  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 应力检测精度为  $1.5\text{ }\mu\text{e}$ 。打破了传统参考光纤光栅法要求传感光栅与参考光栅一致的要求, 降低了系统的组建难度。

**关键词:** 光纤光栅; 交叉敏感性; 遗传算法

**中图分类号:** TP212.1   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1007-2276(2015)06-1859-06

## Application of the genetic algorithm in the demodulation of the FBG cross-sensitivity characteristics

Liu Chaoming, Lou Shuqin

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Fiber Bragg gratings (FBGs) have been widely used in the modern sensing field, but the cross-sensitivity characteristics between temperature and strain greatly confine its application in optical fiber sensing system. In this paper, a demodulation scheme was proposed based on genetic algorithm. A fast demodulation model of genetic algorithm was established. According to the mathematical analysis, the genetic algorithm fitness function and target equation were determined. With the proposed scheme, the demodulation results for different center wavelengths and peak reflections of the two FBGs were discussed. Numerical results demonstrate that the proposed demodulation scheme based on genetic algorithm can effectively demodulate the change of the temperature and strain separately without the requirement of two same fiber grating in the method of the traditional reference fiber grating. The accuracy of temperature and strain measurement are  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $1.5\text{ }\mu\text{e}$ , respectively. This scheme can make the construction of fiber sensing system easier.

**Key words:** FBG; cross-sensitivity characteristics; genetic algorithm

收稿日期: 2014-10-05; 修订日期: 2014-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(61177082); 北京市自然科学基金(4122063)

作者简介: 刘超明(1989-), 男, 硕士生, 主要从事光纤传感方面的研究。Email: 12120107@bjtu.edu.cn

导师简介: 娄淑琴(1965-), 女, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光纤传感、全光网络关键技术方面的研究。Email: shqlou@bjtu.edu.cn

## 0 引言

光纤光栅由于体积小、成本低、不受电磁干扰等优点被广泛应用在传感领域。但是温度、应力都能引起布拉格光栅中心波长漂移,传感时出现温度与应力交叉敏感问题。为了解决温度与应力交叉敏感问题,常用的解决策略有参考光栅法、双波长光栅法、长周期光栅法等。参考光栅法<sup>[1]</sup>是通过引入一个仅获取温度信息的参考光栅,将两个光栅中心波长移动量相减,以消除温度对 FBG 反射波长的影响,从而获得仅有应力引起的波长偏移;但该方法需要一对参数完全相同光纤光栅,实际上很难制做出参数完全相同的光纤光栅。双波长光栅法<sup>[2]</sup>采用中心波长在不同“窗口”的温度与应力灵敏度不同的光纤光栅,通过建立方程组求解出温度与应力变化,从而实现温度与应力的同时测量,但是需要两套工作于不同“窗口”的实验装置。由于长周期光栅具有比 FBG 高的温度灵敏度和略小的应力灵敏度,因此,采用 Bragg 光栅与长周期光栅组合法<sup>[3]</sup>,用其组成混合型传感系统,可实现应力与温度同时测量;但该方法存在空间分辨率问题,测量精度不高,且传感器复用数量也受限。

随着 FBG 在传感领域应用的广泛,出现一些新的利用光纤光栅实现温度与应变同时测量方法。Cheng 等<sup>[4]</sup>使用两对光栅组对温度和应变的同时测量,每对光栅组均由一个 FBG 和一个啁啾 FBG 组成。一个光栅对用于测量温度和应变,另一个仅用于测量温度。用算法对两个光栅对的反射波长结果进行处理,得到了温度和应变的变化量。宋韵等<sup>[5]</sup>提出基于旋转折变型长周期光纤光栅实现应变和温度同时测量的新方法。胡兴柳等<sup>[6]</sup>利用长周期光纤光栅的不同损耗峰具有不同温度和应变传感灵敏度的特性,提出了一种使用单个 LPG 对温度和应变两参数进行同时区分测量的新方案。Song 等<sup>[7]</sup>提出一个新颖的 FBG-in-SMS 结构来实现温度与应变测量。S Triollet 等<sup>[8]</sup>提出在光纤相同位置分别写入 FBG 与 LPG 来测量温度与应变变化。

上面这些新方法都是经传统基本方法发展演变而来的,所以带有传统方案的缺点。文中从基础出发,提出了一种基于遗传算法<sup>[9-10]</sup>的解调方案,应用

提出的方案,可以快速精确地识别逼近光谱,求出温度与应力变化量,突破了传统方法对传感光栅与参考光栅结构与参数限制要求,提高了解调精度。数值分析结果表明遗传算法解调出光纤光栅交叉敏感最大温度误差小于 0.1 °C,最大应力误差小于 1.5 με。

## 1 理论基础

### 1.1 FBG 传感原理

光纤光栅反射中心波长满足布拉格条件:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中:  $\lambda_B$  为中心波长;  $n_{\text{eff}}$  为纤芯折射率;  $\Lambda$  为光栅周期。温度和应变都可以引起  $n_{\text{eff}}$  和  $\Lambda$  的变化,所以 FBG 对温度与应变都敏感。温度通过热光效应与热膨胀效应使  $\lambda_B$  漂移,应变对  $\lambda_B$  影响是因为弹光效应与光纤光栅周期。设  $n=2n_{\text{eff}}$ , 则公式(1)为  $\lambda_B(\varepsilon, T)=n(\varepsilon, T)\Lambda(\varepsilon, T)$ 。对其 Taylor 展开得:

$$\begin{aligned} \lambda_B = & n(\varepsilon_0, T_0)\Lambda(\varepsilon_0, T_0) + \left[ \Lambda \frac{\partial n}{\partial \varepsilon} + n \frac{\partial \Lambda}{\partial \varepsilon} \right]_{T=T_0, \varepsilon=\varepsilon_0} \Delta \varepsilon + \\ & \left[ \Lambda \frac{\partial n}{\partial T} + n \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right]_{T=T_0, \varepsilon=\varepsilon_0} \Delta T + \\ & \left[ \Lambda \frac{\partial^2 n}{\partial \varepsilon \partial T} + n \frac{\partial^2 T}{\partial \varepsilon \partial T} + \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \frac{\partial n}{\partial \varepsilon} + \frac{\partial \Lambda}{\partial \varepsilon} \frac{\partial n}{\partial T} \right]_{T=T_0, \varepsilon=\varepsilon_0} \Delta \varepsilon \Delta T + \\ & \left[ \Lambda \frac{\partial^2 n}{\partial \varepsilon^2} + n \frac{\partial^2 \Lambda}{\partial \varepsilon^2} \right]_{T=T_0, \varepsilon=\varepsilon_0} (\Delta \varepsilon)^2 + \\ & \left[ \Lambda \frac{\partial^2 n}{\partial T^2} + n \frac{\partial^2 \Lambda}{\partial T^2} \right]_{T=T_0, \varepsilon=\varepsilon_0} (\Delta T)^2 + \dots \quad (2) \end{aligned}$$

由公式(2)可以看出,  $\Delta \varepsilon$ 、 $\Delta T$  及其交叉项与高次项都可以引起  $\Delta \lambda_B$  漂移。当  $\Delta \varepsilon$ 、 $\Delta T$  变化不大时, 2 次方以上的高次项及交叉项可以忽略不计。所以公式(2)变为:

$$\Delta \lambda_B(\varepsilon, T) = K_\varepsilon \Delta \varepsilon + K_T \Delta T \quad (3)$$

式中:  $K_\varepsilon$  为应力灵敏度;  $K_T$  为温度灵敏度。

### 1.2 基于遗传算法的解调模型

文中采用的装置结构与参考光栅法的结构类似,如图 1 所示。结构包括一个光源、一个 50/50 耦合器、一个参考光纤光栅和一个传感光纤光栅。参考光纤光栅只用于测量温度的变化而不受应变作用,传感光纤光栅可以同时感应温度和应变作用,二者放在相同温度环境中。但与参考光纤光栅法不同,两个光纤光栅的参数不再要求完全一致,其反射波长和反射强度可以不一致,系统的适用性更强。

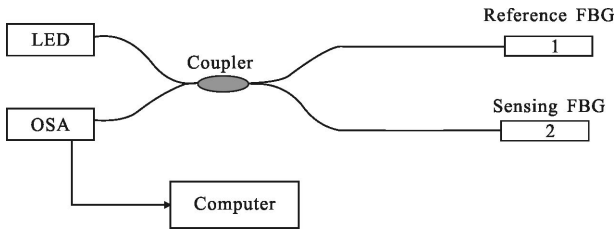


图 1 改进型参考光纤光栅结构示意图

Fig.1 Modified reference fiber Bragg grating structure diagram

由于温度和应力的变化引起两个光栅的谐振波长产生偏移<sup>[11]</sup>, 偏移量  $\Delta\lambda_1$ 、 $\Delta\lambda_2$  可以用下式来表示:

$$\begin{cases} \Delta\lambda_1=K_{T1}\Delta T \\ \Delta\lambda_2=K_{\varepsilon 2}\Delta\varepsilon+K_{T2}\Delta T \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $K_{T1}$ 、 $K_{T2}$  为两个光栅温度灵敏度;  $K_{\varepsilon 2}$  为传感光栅的应力灵敏度;  $\Delta T$  为监测点温度变化值;  $\Delta\varepsilon$  为监测点应力变化值。

设两个光栅反射谱为  $g_i(\lambda)$  ( $0 \leq g_i(\lambda) \leq 1, i=1, 2$ ), 合成后的光谱可以表示为:

$$R(\lambda)=R_{10}g_1(\lambda-\lambda_{B1})+R_{20}g_2(\lambda-\lambda_{B2})+N(\lambda) \quad (5)$$

式中:  $\lambda_{B1}$ 、 $\lambda_{B2}$  为 Bragg 光纤光栅的中心谐振波长;  $R_{10}$ 、 $R_{20}$  为传感臂峰值反射率;  $N(\lambda)$  为噪声产生的光谱波动。

因此, 理想条件下两个光栅合成光谱表达式可以用一个通式表达为:

$$R_V(\lambda, s_1, s_2)=R_{10}g_1(\lambda-s_1)+R_{20}g_2(\lambda-s_2) \quad (6)$$

通过变换不同的  $s_1, s_2$  值, 可以得到由  $R_{10}g_1(\lambda)$  和  $R_{20}g_2(\lambda)$  组成任何光谱。由此可以得到误差方程为:

$$g(s)=\int_0^\infty [R(\lambda)-R_V(\lambda, s_1, s_2)]^2 d\lambda \quad (7)$$

当  $s_1=\lambda_{B1}, s_2=\lambda_{B2}$ , 公式(7)值最小。

采取遗传算法<sup>[12]</sup>来计算  $s_1, s_2$  值。公式(7)作为目标函数, 设  $s=\{s_1, s_2\}$ , 所有系数组合构成目标函数的解空间。通过将  $s_i, i=1, 2$  的范围除以最小测量精度, 得到其最大值  $M$ 。这样每一个阈值内  $s_i$  都与一个  $0 \sim M$  之间数  $t$  对应, 再将  $t$  转换为一串二进制数。把解空间中每一组解变为一条  $n$  位二进制“染色体”, 且二者一一对应。

$$\text{设: } f(s)=g_{\max}-g(s) \quad (8)$$

为适应度函数, 其中  $g_{\max}$  是  $g(s)$  的最大值。从整个解空间中随机取样形成一个种群  $P(t)$ , 其中染色体个数称为种群规模  $N$ 。将种群中每一个染色体对应自变量  $\{s_1, s_2\}$  代入公式(8), 函数值  $f(s)$  越大说明

该个体有较高的适应度。照一定概率从种群  $P(t)$  中选出个体, 作为双亲用于繁殖后代, 产生新个体加入到下一代种群  $P(t+1)$  中。每个个体被选择的概率为  $f_i/(\sum_{k=1}^N f_k)$ , 其中  $N$  为种群大小,  $f_i$  由公式(8)评估得到。

这样给予优良个体更多繁殖后代机会, 从而使优良特性得以遗传。如图 2 所示, 最初种群通过不断地选择、交叉、变异过程, 择优汰劣, 最终种群中适应度最大的染色体对应的解  $\{s_1, s_2\}$  为两个光纤光栅中心谐振波长最优近似解。

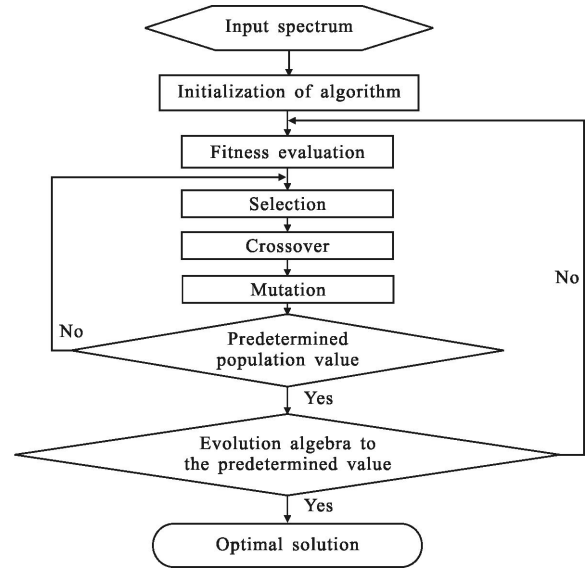


图 2 流程图

Fig.2 Flow chart

但是还需要种群数量  $m$ , 染色体长度  $n$ , 交叉率  $P_c$ , 变异率  $P_m$ , 及进化代数  $t$ , 通过用单一变量仿真方法分别求出这些参数。首先, 令  $t=400, n=18, P_c=0.7, P_m=0.1$ 。取不同  $m$  值, 每个  $m$  值运算 10 遍, 然后计算平均值和标准差, 得到最佳种群值。种群值仿真误差如图 3 所示。

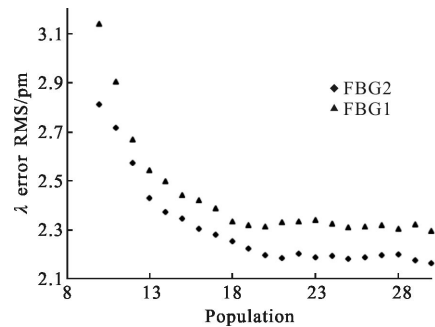


图 3 种群值仿真误差

Fig.3 Population value simulation error

从图 3 中得到,  $m$  值在 20 以后时, 算法的精度基本不变, 仅是算法时间增加。因此, 可选取  $m=20$  作为运算参数。同理可得, 染色体长度  $n=20$ , 进化代数  $t=400$ , 交叉率  $P_c=0.6$  时, 变异率  $P_m=0.1$  时最佳。

## 2 数值仿真结果与讨论

仿真中假设光纤光栅的波长变化量与温度、应力呈线性关系, 反射谱为高斯曲线。设  $K_{T1}=10.8 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ,  $K_{T2}=10.82 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ,  $K_{\sigma}=1.21 \text{ pm}/\mu\text{E}$ 。

首先研究两个光纤光栅的反射峰值波长不同且反射率也不同时的情况, 温度不变, 只改变应力的解调结果。设  $\lambda_{B1}=1550.2 \text{ nm}$ ,  $\lambda_{B2}=1550 \text{ nm}$ ,  $R_{10}=0.45$ ,  $R_{20}=0.9$ , 传感系统只感应应变, 应变值从 0 增大到  $300 \mu\text{E}$ , 步长为  $5 \mu\text{E}$ , 每组运算 10 次, 运算结果取均值。这个过程中参考光栅中心波长不变, 仅传感光栅中心波长增大。图 4 给出几个特征步的两个光纤光栅的反射合成光谱, 从图 4 可以看出, 在 step70 两反射谱开始重合, 在 step125 处两者完全重合, 随后开始分离, 如在 step250 处, 实现完全分离。在此过程中, 传统解调系统中光电检测无法判断中心波长, 即无法解调。应用遗传算法解调出的应力值如图 5 所示, 方形点为解调出的应力值, 其拟合曲线方程为  $y=0.99886x+0.43138$ , 线性拟合参数  $R_2$  为 0.9998, 压

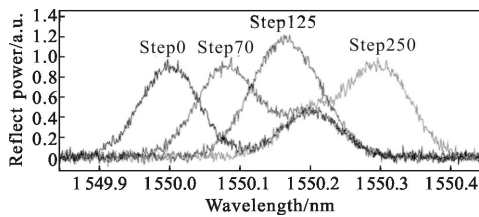


图 4 不同时刻光谱合成图

Fig.4 Spectrum at different moments

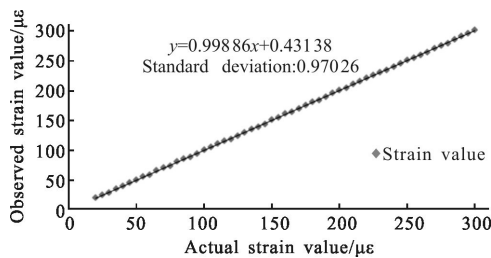


图 5 两光纤光栅反射峰值波长及反射率不同时的应变解调结果

Fig.5 Strain demodulation results when two FBG reflection peak wavelength and reflectivity are different

力解调系数为 0.99886, 解调后的压力值与施加的压力真实值相比, 应力标准差为  $0.97026 \mu\text{E}$ , 最大应力误差小于  $1.5 \mu\text{E}$ 。

接着, 讨论温度与应力同时改变的情况。采用上述的结构参数, 温度与应力变化情况如下: step0 时温度变化  $\Delta T$ 、应变变化  $\Delta \epsilon$  均为 0, step1 时为  $1^\circ\text{C}$ 、 $10 \mu\text{E}$ , step2 时为  $2^\circ\text{C}$ 、 $20 \mu\text{E}$ , 一直到 step20 时为  $20^\circ\text{C}$ 、 $200 \mu\text{E}$ 。每个 step 运算 10 次, 对解调出温度与应力求均值, 解调结果如图 6(a)所示, 左边纵轴表示应变, 右边纵轴表示温度, 横轴表示从 step1 到 step20。从图 6(a)中可以看出解调出温度、应力值与设定的理想情况一致, 线性拟合参数  $R_2$  分别为 0.9999、0.9998, 均与真实值呈线性关系。温度步长  $1^\circ\text{C}$ , 所以温度解调系数为 0.99962, 解调出的温度与所对应的真实值相比, 温度标准差为  $0.05839^\circ\text{C}$ , 最大温度误差小于  $0.08^\circ\text{C}$ 。压力拟合曲线的斜率为 10.01083, 由于每步对应的压力步长为  $10 \mu\text{E}$ , 故压力解调系数为 1.001083, 解调出的温度与所对应的真实值相比, 应力标准差为  $0.93203 \mu\text{E}$ , 最大应力误差小于  $1.4 \mu\text{E}$ 。

如果选用两个光纤光栅的反射中心波长相同, 假设  $\lambda_{B1}=\lambda_{B2}=1550.2 \text{ nm}$ , 解调结果如图 6(b)所示, 可以看出温度、应力与真实值的变化呈线性关系, 线性

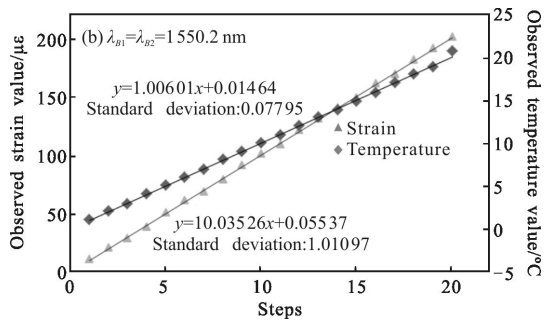
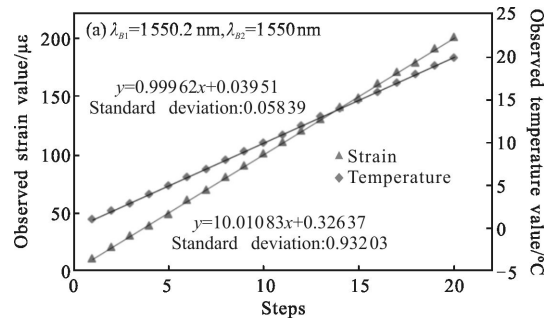


图 6 温度与应力同时变化的解调结果

Fig.6 Demodulation results of changing the temperature and stress simultaneously

拟合参数  $R_2$  分别为 0.9993、0.9997。其温度和压力的解调系数分别为 1.00601、1.003526。但是由于参考臂与传感臂反射谱重叠,增大了遗传算法的解调难度,使解调精度略微下降,每组解调出应力、温度与其真实值相比,应力标准差为  $1.01097 \mu\epsilon$ ,温度标准差为  $0.07795^\circ\text{C}$ ,最大应力误差小于  $1.5 \mu\epsilon$ ,最大温度误差小于  $0.1^\circ\text{C}$ 。

上述研究表明,所提出的遗传算法解调方案适用于两个光纤光栅反射峰值波长相同和不同的情况,即对两个光纤光栅反射峰值波长无严格的要求。应用文中提出的遗传算法解调,可以有效区分由温度与应力引起的波长偏移,有效克服了参考光纤光栅法要求两个光纤光栅反射峰值波长一致的要求。且当峰值波长不同时,对两光栅中心波长差值无限制,只需在光谱仪测量范围内即可。

下面讨论基于遗传算法解调方案对参考光栅与传感光栅反射率要求。选取两光栅中心波长  $\lambda_{m1}=1550 \text{ nm}$ ,  $\lambda_{m2}=1550.2 \text{ nm}$ ,温度与应力变化情况同上,改变两个光纤光栅的反射率,解调结果如图7所示。图7为  $R_{10}=0.35$ 、 $R_{20}=0.75$  时情况。由图可得,解调出温度、应力值均与真实值变化呈线性关系,线性拟合参数  $R_2$  分别为 0.9998、0.9997。其对应的温度和压力解调分别为 0.99855 和 1.002256。每组解调出应力、温度与其真实值相比,应力标准差为  $1.12903 \mu\epsilon$ ,温度标准差为  $0.08195^\circ\text{C}$ ,最大应力误差小于  $1.5 \mu\epsilon$ ,最大温度误差小于  $0.1^\circ\text{C}$ 。

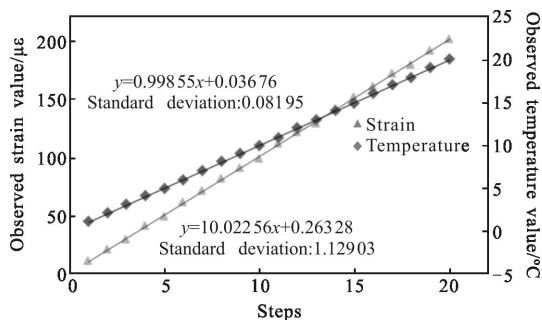


图7 当两个光纤光栅反射率  $R_{10}=0.35$  和  $R_{20}=0.75$  时温度与应力同时变化的解调结果

Fig.7 Demodulation results of changing the temperature and stress simultaneously at  $R_{10}=0.35$  and  $R_{20}=0.75$

光栅反射率过小结果易受噪声影响,并且两光栅反射率需有一定差值,这样传感与参考光栅反射谱不同,可以用遗传算法逼近、求解两光栅中心波

长。大量仿真结果得出,图7所示例子为反射率下限,即当  $R_{10} \geq 0.35$ 、 $R_{20} \geq 0.75$ ,  $|R_{20}-R_{10}| \geq 0.4$  时,最大应力误差小于  $1.5 \mu\epsilon$ ,最大温度误差小于  $0.1^\circ\text{C}$ 。相比于参考光栅法,基于遗传算法的解调方案对光栅反射率要求不高,同时解调出温度与应力值精度很高。

### 3 结论

文中针对光纤光栅在传感领域应用存在温度与应力交叉敏感的问题,提出了一种基于遗传算法的解调方案,建立了遗传算法的解调模型,经过数学分析得到遗传算法目标方程、适应度函数,研究了参考光纤光栅与传感光栅的反射中心波长不同、反射峰值不同情况下解调情况。数值研究结果表明,提出的基于遗传算法的解调方案可以有效地解调出参考光纤光栅与传感光栅参数不同情况下的温度与应变变化,有效地区分出温度与应力的影响,温度检测精度  $0.1^\circ\text{C}$ ,应力检测精度为  $1.5 \mu\epsilon$ 。打破了传统参考光纤光栅法要求传感光栅与参考光栅一致的要求,降低了系统的组建难度,文中提出方法对传感系统本身要求低,并且易与 WDM、TDM 等复用方式结合,实现大规模分布式光纤传感网络<sup>[3]</sup>。

### 参考文献:

- [1] Zhao Yong, Liao Yanbiao. Discrimination methods and demodulation techniques for fiber Bragg grating sensors [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, 41(1): 1-18.
- [2] Ni Xiaohong, Gui Feifei, Wang Yutian, et al. Simultaneous measurement of temperature and strain using fiber grating [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 724-728. (in Chinese)  
倪晓红, 桂菲菲, 王玉田, 等. 温度应变双参量同时测量的光纤传感技术研究 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(7): 724-728.
- [3] Samer K, Abi Kaed Bey, Sun Tong, et al. Simultaneous measurement of temperature and strain with long period grating pairs using low resolution detection [J]. *Sensors and Actuators A*, 2008, 144: 83-89.
- [4] Cheng H C, Huang J F, Luo Y L. Simultaneous strain and temperature distribution sensing using two fiber Bragg grating pairs and a genetic algorithm [J]. *Optical Fiber Technology*, 2006, 12(4): 340-349.
- [5] Song Yun, Zhu Tao, Rao Yunjiang, et al. Simultaneous measurement of strain and temperature using a long-period

- fiber grating with rotary refractive index modulation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36 (5): 1129–1133. (in Chinese)
- 宋韵, 朱涛, 饶云江, 等. 旋转折变型长周期光纤光栅实现应变和温度的同时测量[J]. 中国激光, 2009, 36(5): 1129–1133.
- [6] Hu Xingliu, Liang Dakai, Lu Guan, et al. Simultaneous discriminating measurement of temperature and strain based on a long period grating's spectrum [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(3): 851–854. (in Chinese)
- 胡兴柳, 梁大开, 陆观, 等. 基于单长周期光纤光栅光谱特性的温度和应变同时区分测量 [J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(3): 851–854.
- [7] Song D, Chai Q, Liu Y, et al. A simultaneous strain and temperature sensing module based on FBG-in-SMS [J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(5): 5205.
- [8] Triollet S, Robert L, Marin E, et al. Discriminated measures of strain and temperature in metallic specimen with embedded superimposed long and short fibre Bragg gratings [J]. *Measurement Science and Technology*, 2011, 22(1): 015202.
- [9] Wang Qiang, Shen Guotu, Yang Baocheng, et al. Application of genetic algorithm in the design optimization of grating profile [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(4): 410–414. (in Chinese)
- 王强, 沈国土, 杨宝成, 等. 遗传算法在光栅面形优化设计中的应用[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(4): 410–414.
- [10] Zhou Xuan, Li Zhanchao, Dai Zong, et al. QSAR modeling of peptide biological activity by coupling support vector machine with particle swarm optimization algorithm and genetic algorithm [J]. *Journal of Molecular Graphics and Modelling*, 2010, 29(2): 188–196.
- [11] Chang Xinlong, Li Ming, Han Xuanzi, et al. Application of polymer optical fiber Bragg grating in large strain measurement of solid rocket motor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5): 834–839. (in Chinese)
- 常新龙, 李明, 韩玄子, 等. 聚合物光纤布拉格光栅在固体火箭发动机大应变测量中的应用 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(5): 834–839.
- [12] Teng Fengcheng, Yin Wenwen, Wu Fei, et al. Application of genetic algorithm in quasi-static fiber grating wavelength demodulation technology [J]. *Optoelectronics Letters*, 2007, 3(4): 271–274.
- [13] Zhang Xiaoli, Liang Dakai, Zeng Jie, et al. Genetic algorithm-support vector regression for high reliability SHM system based on FBG sensor network [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(2): 148–153.