

doi:10.13756/j.gtxyj.2020.01.006

光电器件研究与应用

一种改进的高精度光谱寻峰算法研究

江 虹,郭宇龙,郑晓丹,刘鹏辉,周上清

(长春工业大学 电气与工程学院,长春 130012)

摘要:针对被采样的超弱光纤光栅(FBG)反射光谱含有干扰噪声的问题,提出一种应用于大容量超弱传感网络的高速寻峰算法。该算法引入权重因子加入到最小二乘拟合算法实现加权最小二乘拟合(WLS)算法,对高斯曲线拟合系数进行优化,定位出中心波长,然后再通过非对称高斯修正(AG)对定位的中心波长进行修正,提出 WLS 结合 AG(WLS-AG)的算法,实现抗噪声干扰高精度寻峰。通过实验,对比分析最小二乘拟合算法、质心算法、WLS 算法及文章提出的 WLS-AG 算法分别在不同噪声下的峰值误差平均值,以及变温环境下误差平均值。实验结果表明,在高信噪比的情况下,WLS-AG 算法连续 20 次重复性实验平均误差 $<1\text{ pm}$,在低信噪比的情况下,平均误差约为 10 pm ;在不同温度下的检测误差在 1 pm 内,且最为稳定,满足超弱 FBG 传感系统精度解调的要求。

关键词:超弱光纤光栅;加权最小二乘拟合结合非对称高斯修正算法;寻峰算法;大容量超弱传感网络

中图分类号:TP212 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-8788(2020)01-0033-05

Research on an Improved Spectral Peak Seeking Algorithm with High Precision

JIANG Hong, GUO Yu-long, ZHENG Xiao-dan, LIU Peng-hui, ZHOU Shang-qing

(School of Electrical & Electronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: Aiming at the interference of the sampled ultra-weak Fiber Bragg Grating (FBG) reflectance spectrum, a high-speed peak seeking algorithm for large capacity ultra-weak sensor networks is proposed. In this algorithm, weight factors are introduced into the least squares fitting method to realize the Weighted Least Squares fitting (WLS) algorithm with optimized fitting coefficient of gaussian curve to locate the center wavelength. Then the central wavelength is modified by Asymmetric Gaussian correction (AG) to achieve high-precision peak location against noise interference. We propose WLS combined with AG (WLS-AG) algorithm. Through experiments, the peak error averages of the least square fitting algorithm, centroid algorithm, WLS algorithm and the WLS-AG algorithm proposed in this paper are compared and analyzed under different noises. The experimental results show that the WLS-AG algorithm works with high Signal-to-Noise Ratio (SNR). The average error of 20 consecutive repetitive experiments is less than 1 pm , and the mean error is about 10 pm at low SNR. The detection error at different temperatures is within 1 pm , which is the most stable and meets the requirements of ultra-weak FBG sensor system for precision demodulation.

Key words: ultra-weak FBG; WLS-AG algorithm; peak seeking algorithm; large capacity ultra-weak sensor network

0 引 言

超弱光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器作为现今发展起来的新型光纤传感器,其基本原理^[1]是当 FBG 元件受到外界应变、温度、压力和磁场改变时,其反射光谱的中心波长会发生偏移,通过中心波长的微小变化^[2-3]检测到被测量的变化,具有灵敏度高、抗干扰能力强、抗腐蚀、可靠性高、使用寿命长和复用能力强等优点,因此,其被广泛应用于建筑工程、航空航天、电力工程和石油领域的结构应变以及温度变化监测中^[4]。

由于超弱 FBG 的反射在光谱中心波长处的幅值最大,因此,可以通过定位超弱 FBG 的反射光谱曲线的峰值来确定中心波长的值。目前使用 FBG 的寻峰算法有最小二乘拟合算法、质心算法、直接寻

峰算法、遗传算法以及蚂蚁算法等。最小二乘拟合算法寻峰精度有限;质心算法虽然运行快且误差相对较小,但受噪声影响较大,在噪声大(信噪比低)的情况下达不到理想的寻峰效果;直接寻峰算法精度低,且受噪声的影响很大;遗传算法和蚂蚁算法虽然能够达到很好的精度,但计算量大,求解需耗费较长时间,不能满足解调要求。

目前光栅传感技术正朝着大容量、长距离和网络化发展,传感器数目可达成百上千个^[5],因此,研究适合实际工程应用的高精度解调寻峰算法极其重要。本文针对上述方法存在的不足,分析发现在超弱 FBG 数据的采集过程中,由于噪声的干扰^[6],导致超弱 FBG 的反射光谱曲线不是标准的高斯型,波峰附近区域呈不对称形状^[7],峰值位置偏向左或偏向右。为了在受噪声干扰的情况下保证寻峰精度,

收稿日期:2019-06-25

基金项目:吉林省科技发展规划资助项目(20190302085GX)

作者简介:江虹(1969—),女,吉林长春人。教授,博士,主要研究方向为智能仪器与智能控制系统,弱信号处理及分析技术。

通信作者:江虹,教授。E-mail:jianghong@ccut.edu.cn

提出加权最小二乘拟合结合非对称高斯修正(Weighted Least Squares-Asymmetric Gaussian correction, WLS-AG)算法,该算法利用加权最小二乘拟合(Weighted Least Squares, WLS)算法,其具有快速精确地定位中心波长和抗噪声干扰的优点,然后结合非对称高斯修正(Asymmetric Gaussian Correction, AG)进一步提高寻峰精度。该算法克服了传统寻峰算法^[8]的局限性,并保证了波长的解调精度。

1 超弱 FBG 传感器解调系统及原理

超弱 FBG 解调系统的实验平台由宽带光源、光环行器和光谱分析仪组成。宽带光源发出的光经过光环行器入射到超弱 FBG 传感器阵列中,超弱 FBG 具有选择透过性,符合该超弱 FBG 中心波长的光被返回,其他波长的光将透过。经调制后的反射波又经光环行器到光谱分析仪,观测其反射光谱。光源参数波长为 500 ~ 2 400 nm,输出功率 100 mW;光谱仪选择横河 AQ6370D-12-L1H/FC/RFC 光谱分析仪,波长扫描范围:1 550 nm 波段的中心波长,波长精度 0.02 nm。实验系统框图如图 1 所示。

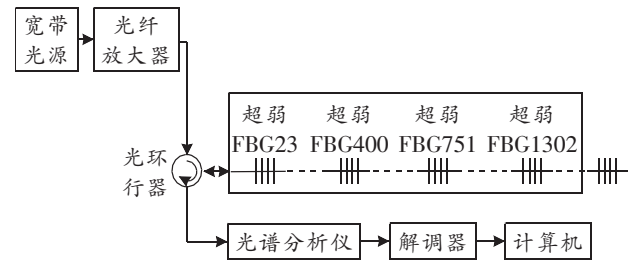


图 1 实验系统框图

当超弱 FBG 传感器受到外界温度变化、压力或应力时,FBG 的栅距会发生变化,从而引起反射波长的变化,解调系统就是通过检测波长的变化来计算外界温度变化、压力或应力的,所以解调系统中高精度光谱寻峰算法至关重要。

2 算法与原理设计

2.1 高斯函数最小二乘拟合原理及其改进算法

超弱 FBG 反射光谱曲线与高斯曲线模型相似,用高斯函数近似表示超弱 FBG 反射光谱的功率密度谱为

$$F(x) = \exp[-x^2/\sigma^2 + 2\mu x/\sigma^2 + \ln(y_0) - \mu^2/\sigma^2], \quad (1)$$

式中: x 为超弱 FBG 波长; σ 为对应反射光谱的带宽; μ 为中心波长值; y_0 为真实超弱 FBG 反射光谱的

波峰强度。实际中, y_0 、 μ 和 σ 这 3 个参数是未知量,受仪器中噪声和环境噪声的干扰,传统寻峰算法拟合得到的 y_0 、 μ 和 σ 的系数会受噪声的影响产生较大的误差,因此,本文采用 WLS 算法。

对高斯函数最小二乘拟合算法进行详细推导,并对 $F(x)$ 取对数,得到

$$s = c_1 x^2 + c_2 x + c_3, \quad (2)$$

式中, c_1 、 c_2 和 c_3 为中间变量,分别为简化后 x^2 、 x^1 和 x^0 的系数。

通过上式把超越函数变换成简单的二次函数,将高斯函数拟合变换成二次多项式函数的最小二乘拟合问题。解出中间变量 c_1 、 c_2 和 c_3 ,由式(2)可知,中间变量在数据处理过程中未发生任何中间变换,依然保留下实际测量的各个数据采集点的原始数据,可以最大程度地保证实际数据的拟合精度,而且使用中间变量简化了中间处理的运算过程,求出高斯函数的参数。接下来对中间变量 c_1 、 c_2 和 c_3 的求解进行推导。其实际上是一个超定方程组,

$$\text{令 } A = \begin{bmatrix} x_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_m^2 & x_m & 1 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix}, \quad S = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_m \end{bmatrix}, \quad AC = S, \quad (3)$$

式中: A 为各个波长 x 组成的矩阵; C 为求解系数的列向量; S 为各个波长的功率密度谱强度测量值的向量。

引入权重因子 W ,对最小二乘拟合算法进行改进,

$$\begin{aligned} \rho &= \|z\|_2^2 = \|W(S - AC)\|_2^2 = \\ &= (S - AC)^T W^T W (S - AC) = \\ &= S^T W^T W S - S^T W^T W AC - C^T A W^T W S + \\ &= C^T A^T W AC, \end{aligned} \quad (4)$$

式中: ρ 为残差向量的二范数的平方; z 为残差向量。

根据最小二乘法原则,要使向量 ρ 的值最小,则要求 $\frac{\partial \rho}{\partial C} = 0$,

$$\frac{\partial \rho}{\partial C} = -2A^T W^T W S + 2A^T W^T W AC = 0$$

$$A^T W^T W AC = A^T W^T W S. \quad (5)$$

式(5)为求解 C 的公式,为了达到简化运算,采取规避掉矩阵求逆运算,达到缩短运算时间的目的,令

$\mathbf{M} = \mathbf{A}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{A}$, $\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{S}$, 可推导出:

$$\mathbf{M} \mathbf{C} = \mathbf{N}, \quad (6)$$

式中: $\mathbf{M}$ 为求解向量 $\mathbf{C}$ 系数矩阵; $\mathbf{N}$ 为使得 ρ 最小密度函数的向量。

根据式 $\mathbf{M} = \mathbf{A}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{A}$, $\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{S}$ 求解三元一次方程组, 求出中间变量 c_1 、 c_2 和 c_3 , 再由式(6)解得 y_0 、 μ 和 σ , 则可快速得到加权的高斯拟合函数, 其中心波长 μ 为 $-c_2/(2c_1)$ 。

取一个超弱 FBG 反射光谱曲线, 其曲线模型符合高斯函数 $y = 500 \exp[-(x - 60)^2/250]$ 的曲线形状, 在超弱 FBG 反射光谱中加入高斯白噪声, 如图 2 所示。然后采用上述步骤对加入噪声后的反射光谱曲线分别进行最小二乘拟合和 WLS 算法, 用 Matlab 软件仿真, 仿真结果如图 2 和 3 所示。

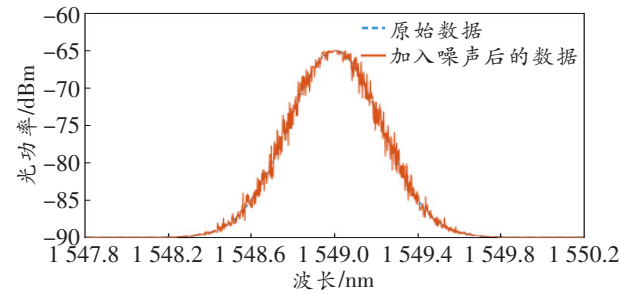


图 2 加入白噪声的高斯函数

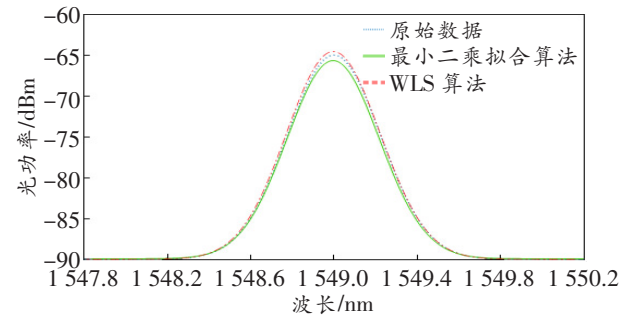


图 3 最小二乘拟合和 WLS 算法对比结果

由图 2 和 3 可知, 用最小二乘拟合加噪声的高斯函数的效果没有 WLS 算法的效果好, 峰值附近的残差矢量很大。通过实验分析发现: 峰值处数值受噪声影响较小, 距离峰值越远, 受噪声的影响越大。将数值进行对数变换后, 其趋势以指数衰减, 而且数值的权重随着数值的增加呈指数衰减。在加入噪声的情况下, 离峰值越远, 数值的权重增大, 导致更多的权重分往峰位的两边。高斯拟合的原理是对数变换后的残差向量的 2 范数 $\|\mathbf{z}\|_2^2$, 由于把大部分的权重分往峰值的两边, 导致 $\|\mathbf{z}\|_2^2$ 受到峰位两侧的数值影响变大。因此, 在拟合变换回高斯函数后, 反而使峰值处的残差向量变大, 寻峰精度满足不

了要求。

为了解决这一问题, 本文通过在最小二乘法拟合算法的残差向量 $\mathbf{r}$ 中加入一个权重因子 W 来改进最小二乘拟合算法。加入 W 后使其数据权重削弱趋势与取对数运算后相反或者与数据本身相同, 使峰值附近的残差向量减小, 达到改善拟合效果的目的。图 4 所示为两种算法的拟合结果, 可以看出, 采用 WLS 拟合后的效果得到了明显的改善, 说明引入 W 后, 降低了噪声对信号的干扰, 提高了寻峰精度。

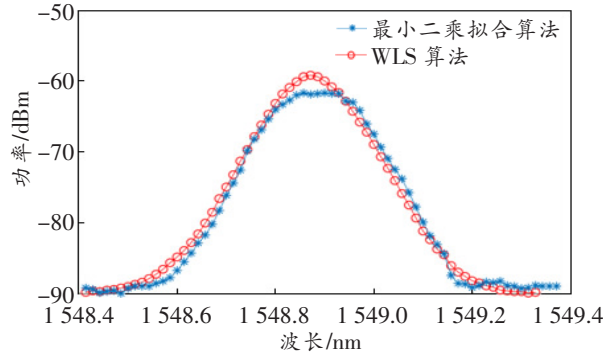


图 4 最小二乘拟合和 WLS 算法拟合对比

根据实验系统图, 在高噪声的环境采集的超弱 FBG₁ 光谱数据经最小二乘拟合算法拟合的效果并不理想, 波形出现了明显的波动, 光谱出现了明显的失真, 最小二乘拟合算法的光谱数据受噪声影响较大, WLS 算法拟合对比最小二乘拟合算法拟合效果明显改善, 受噪声的影响小, 如图 4 所示。

2.2 AG 算法

由于实际环境和仪器的限制, 受到多种因素的影响, 采集的发射光谱信号波长并不是标准的高斯函数模型, 呈非对称形态, 非对称特性对确定中心波长的位置带来误差影响。为更进一步达到精确寻峰, 需对非对称高斯模型寻峰结果进行修正。

对超弱 FBG 反射光谱曲线上的点做切线, 切线的斜率为 k , 标准高斯函数每两对应的点对应相同的纵坐标值, 这两个点的斜率关系为 $k_A = -k_B$, 但非对称高斯函数模型, 纵坐标相同的点对应两个点的斜率不全满足 $k_A = -k_B$, $k_A > 0$ 为峰值左侧点的斜率; $k_0 = 0$ 为峰值点的斜率; $k_B < 0$ 为峰值右侧点的斜率。非对称高斯函数的修正可用左右侧两个部分的方差的二阶参数 ξ_A^2 和 ξ_B^2 确定。

$$A = \xi_A^2 = \frac{1}{N_A - 1} \sum_{x < x_0}^{N_A} [f(x) - f(\mu)]^2, \\ B = \xi_B^2 = \frac{1}{N_B - 1} \sum_{x > x_0}^{N_B} [f(x) - f(\mu)]^2, \quad (7)$$

式中： A 为超弱 FBG 反射光谱在中心波长处左侧部分方差的二阶参数； B 为超弱 FBG 反射光谱在中心波长右侧部分方差的二阶参数； N_A 为 $k_A > 0$ 的样本数量； N_B 为 $k_B < 0$ 的样本数量； x 为峰值区域内的采样点； $f(x)$ 为超弱 FBG 反射光谱功率大小； x_0 为斜率 $k_0 = 0$ 时所对应的点； $f(\mu)$ 为超弱 FBG 反射光谱在中心波长处的幅值； μ 为高斯拟合获得峰值的位置。

非对称高斯模型的方差与函数形状偏移量间的关系可推导出峰值修正函数为

$$\mu' = \begin{cases} \mu - \frac{B/A}{1 + \frac{B}{A}} \Delta H, & B/A > 1 \\ \mu, & B/A = 1 \\ \mu - \frac{B/A}{1 + \frac{B}{A}} \Delta H, & B/A < 1 \end{cases}, \quad (8)$$

式中： μ' 为应用 WLS-AG 算法得到的中心波长； ΔH 为一半的波峰间隔。

3 实验结果分析

3.1 不同噪声下寻峰误差比较

本节将研究不同程度噪声对最小二乘拟合算法、质心算法、WLS 算法及 WLS-AG 算法寻峰误差的影响。实验中首先以图 1 中的超弱 FBG23 传感器作为研究对象，在恒定 20 ℃ 的环境下，加入高斯白噪声来模拟反射光谱，在噪声干扰下进行反复性光谱数据采集，加入的噪声幅度/信号幅度为 0.01~0.10 之间，做 20 次重复性实验，取其平均值作为最终的实验结果，如图 5 所示。4 种寻峰算法平均误差的详细结果如表 1 所示。

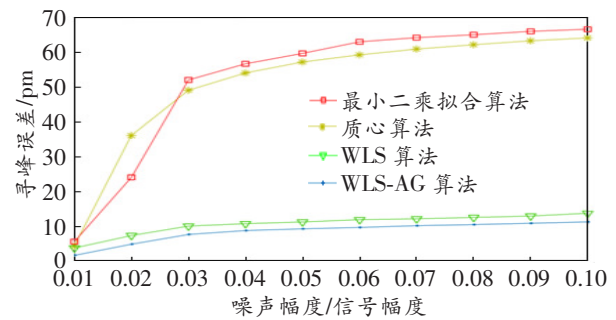


图 5 不同噪声下不同算法的误差图

由图 5 及表 1 可知，随着噪声在信号中按比例增大，实验用寻峰算法的精度都受到了不同程度的影响，其中高斯拟合和质心算法受噪声影响较大，质心算法的误差小于高斯拟合算法，但在噪声刚开始增加时，质心算法的误差受噪声的影响最为明显；

WLS-AG 算法检测误差受噪声的影响明显小于其他算法，由此可见 WLS-AG 算法可以有效抵制噪声的干扰。

表 1 4 种寻峰算法平均误差详细结果

噪声幅度/ 信号幅度	寻峰误差			
	最小二乘拟 合算法/pm	质心算 法/pm	WLS 算 法/pm	WLS-AG 算法/pm
0.01	5.510	4.20	3.80	1.70
0.02	24.020	36.60	7.40	4.90
0.03	52.010	49.05	10.01	7.70
0.04	56.640	53.98	10.75	8.80
0.05	59.640	57.13	11.23	9.30
0.06	62.978	59.20	11.48	9.70
0.07	64.160	60.85	11.70	10.20
0.08	65.010	62.11	11.94	10.52
0.09	65.973	63.23	12.00	10.90
0.10	66.594	64.07	12.18	11.30

3.2 不同温度下寻峰误差比较

将 4 个不同中心波长的超弱 FBG 传感器放入 5~50 ℃ 的温控试验箱中，保证噪声等其他参数稳定，用光谱分析仪采集超弱 FBG 的理论中心波长，用上述 4 种算法分别在 5、10、15、20、25、30、35、40、45 和 50 ℃ 温度下采集中心波长数据，做 20 次重复性实验取其平均峰值，对比其峰值误差，结果如图 6~图 9 所示，各算法的平均误差如表 2 所示。

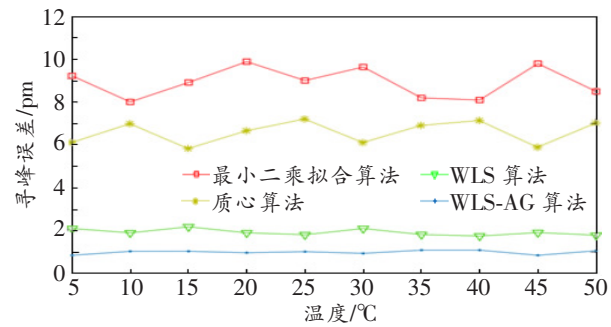


图 6 不同温度下超弱 FBG32 的峰值检测误差

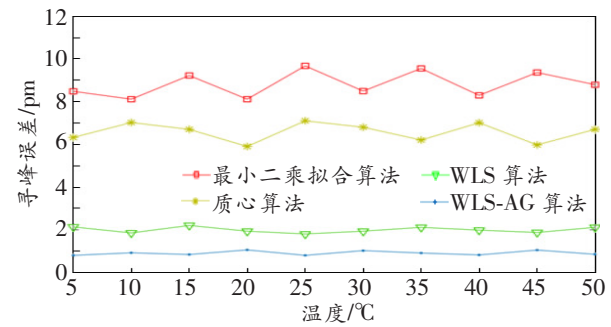


图 7 不同温度下超弱 FBG400 的峰值检测误差

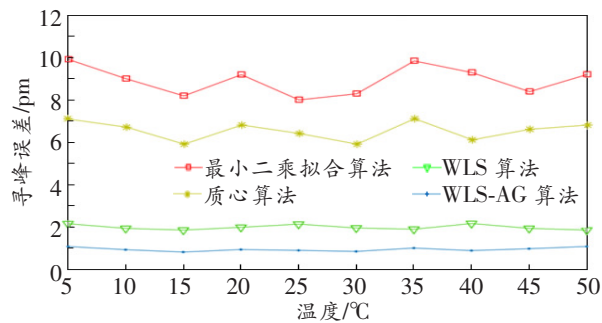


图 8 不同温度下超弱 FBG751 的峰值检测误差

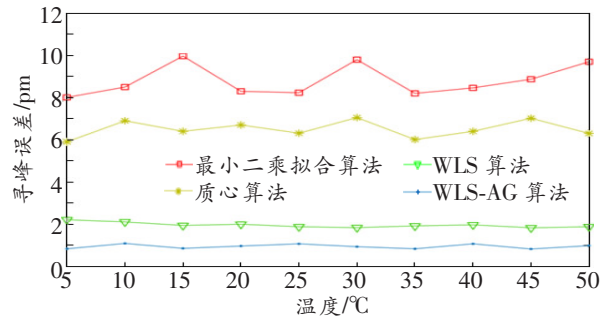


图 9 不同温度下超弱 FBG1302 的峰值检测误差

表 2 变温下各算法的平均误差

寻峰算法	平均误差/pm			
	FBG23	FBG400	FBG751	FBG1302
最小二乘拟合	8.88	8.82	8.94	8.80
质心算法	6.53	6.57	6.54	6.50
WLS 算法	1.93	1.99	1.98	1.95
WLS-AG 算法	0.99	0.92	0.95	0.94

分析图 6~图 9 及表 2 可知,不同温条件下对随机抽取的 4 个不同中心波长的超弱 FBG 传感器来说,最小二乘拟合算法检测误差波动在 7.8~10.0 pm之间;质心算法的检测误差波动在 5.5~7.5 pm之间;WLS 算法检测误差波动在 1.8~2.1 pm之间;WLS-AG 算法检测误差波动在 1 pm内。本文提出的 WLS-AG 算法与其他算法对比,其

精度受温度变化影响小,寻峰精度高,能有效提高超弱 FBG 传感网络的解调精度。

4 结束语

本文提出了一种改进的高精度光谱解调寻峰算法——WLS-AG。该算法使采样的超弱 FBG 反射光谱更精确地拟合,获得更精确的中心波长。实验结果表明,在不同的噪声环境下,将改进后的算法与最小二乘拟合算法、质心算法和 WLS 算法进行比较,本文所提算法具有良好的抵制噪声干扰的能力;在变温条件下,该算法的误差能够控制在 1 pm 以内,且具有良好的稳定性。因此,本文提出的寻峰算法对超弱 FBG 传感网络系统高精度解调具有很好的应用价值。

参考文献:

[1] 张天华,赵鸿,朱辰,等. Bragg 波长精确调控的光纤光栅刻写方法与实验[J]. 激光与红外, 2014, 44(3): 285—287.

[2] 胡元华. 基于嵌入式的光纤光栅解调系统[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2017.

[3] 陈志军,白剑,吴祖堂,等. 光纤布喇格光栅反射谱寻峰算法优化及比较[J]. 光子学报, 2015, 44(11): 83—88.

[4] 陈梓远. 光纤通信的基本原理及发展趋势[J]. 通讯世界, 2019, 26(2): 13—14.

[5] 胡宸源. 大容量光纤光栅传感网络高速解调方法及关键技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.

[6] 江虹,苏阳,李进,等. 一种小波阈值去噪在 FBG 解调中的改进方法[J]. 光通信研究, 2016(2): 40—43.

[7] 王拥军,刘永超,张靖涛. 高速高分辨率光纤布拉格光栅传感系统的解调技术[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 151—156.

[8] 胡辽林,王亚萍,王斌. 光纤光栅传感信号寻峰误差研究[J]. 西安理工大学学报, 2015, 31(4): 409—413.