

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2007005

基于 BOTDR 散射谱的应变提取方法研究*

陈刚,段洁,衣文索,巩楠楠,林家楷
(长春理工大学光电工程学院 长春 130012)

摘要:针对布里渊后向散射原理的应变传感系统信号检测方法进行研究,目前该领域信号检测方法普遍存在计算量大,精度不高,耗时大等诸多问题,提出了一种自适应梯度下降算法(Adam 算法)对布里渊散射信号进行拟合计算,同时搭建了外差干涉检测的布里渊应变测量系统。实验结果表明,用 Adam 算法拟合散射谱曲线后解调的平均应变误差为 24.89 $\mu\epsilon$,是高斯-牛顿算法拟合曲线最大应变误差的 51.96%,是列文伯格-马夸尔特算法拟合曲线最大应变误差的 57.42%;Adam 算法拟合散射谱曲线的拟合度佳(0.998 9),均方根误差小(0.110 5)拟合测量的精密度高,而且信号处理时间仅为 18.5 ms。研究结果对布里渊散射传感技术高精度数据特征提取提供了理论和实验依据。

关键词:分布式光纤传感;布里渊散射;布里渊光时域反射系统;应变检测;曲线拟合

中图分类号: TH741 TN247 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research on the strain extraction method based on BOTDR scattering spectrum

Chen Gang, Duan Jie, Yi Wensuo, Gong Nannan, Lin Jiakai

(School of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: The signal detection method of stress-strain sensing system based on the principle of Brillouin backscattering is studied. At present, the signal detection method in this field generally has many problems, such as large amount of calculation, low accuracy, and poor consistency. This paper proposes an adaptive gradient descent algorithm (Adam algorithm), which can be used to fit the Brillouin scattering signal. Meanwhile, a Brillouin strain measurement system for heterodyne coherent detection is established. Experimental results show that the average strain error demodulated after fitting the scattering spectrum curve with the Adam algorithm is 24.89 $\mu\epsilon$, which is 51.96% of the maximum strain error of the Gauss-Newton algorithm fitting curve. This value is Levenberg-Marquardt LM algorithm fits 57.42% of the maximum strain error of the curve. When Adam algorithm is used to fit the scattering spectrum curve, the good fit is 0.998 9 and small root mean square error is 0.110 5. These results indicate high precision of fitting measurement and signal processing. In addition, the signal processing time is only 18.5 ms. Research results of this study provide theoretical and experimental basis for the high-precision data feature extraction of Brillouin scattering sensing technology.

Keywords: distributed fiber optic sensing; Brillouin scattering; Brillouin optical times domain reflectometry; strain detection; curve fitting

0 引言

分布式光纤传感器与传统的机械类或化学类传感器相比,它具有耐腐蚀、抗电磁干扰、防水防潮等特点,可以在恶劣条件下(如强辐射、易燃易爆的场所)使用,在大

型结构工程监控领域发挥着重要作用。布里渊光时域反射系统(Brillouin optical times domain reflectometry, BOTDR)与布里渊光时域分析技术(Brillouin optical time domain analysis, BOTDA)相比具有单端入射、结构简单等特点更适用于工程应用中^[1-8]。

布里渊频移与温度和应变都呈线性关系^[9],如何快

收稿日期:2020-10-15 Received Date:2020-10-15

* 基金项目:吉林省科技计划发展项目(20150520094JH)资助

速提取并准确计算出布里渊频移是实现参量分析、长距离定位的关键。近年来,国内外的研究学者提出了许多布里渊散射谱的拟合方案,如高斯-牛顿算法(Gauss-Newton)^[10]、互相关算法^[11]、列文伯格-马夸尔特算法(Levenberg-Marquardt, L-M)^[12]、人工神经网络算法等。人工神经网络算法计算能力突出,但要训练神经网络耗时巨大,复杂度较高。互相关算法通过与理想布里渊散射谱的互相关系数来确定中心频率,提升了对极微弱布里渊散射信号应变分析的能力,但这种方法精确度被采样频率所限制且布里渊散射谱的对称性会对结果造成一定影响。在基本算法的基础上又发展出了如互相关-LM法、布谷鸟牛顿搜索(CNS)算法^[13]、遗传-粒子群(GA-QPSO)算法^[14],也取得了较好的效果,但是这些算法原理都大同小异,在提高运算能力的同时不能降低复杂度或者减少运算时间。因此,对于研究一种能准确提取布里渊频移兼具降低复杂度又节约计算时间的算法是非常有价值的。

本文提出了基于Adam的布里渊散射谱拟合算法并建立模型,搭建基于BOTDR的应变传感系统进行实验,结果表明Adam算法与Gauss-Newton算法、L-M算法相比,使用Adam算法不仅降低了复杂度节约了运算时间,而且还提高了布里渊散射谱拟合结果的精密度。

1 原理

1.1 布里渊散射模型

布里渊散射是非弹性光散射现象^[15-16],光纤中光的传输特性使布里渊增益谱(Brillouin gain spectrum, BGS)服从洛伦兹分布,频率 ν 处的功率增益 $g(\nu)$ 可以表示为:

$$g(\nu) = \frac{g_0(\Delta\nu_B/2)^2}{(\nu - \nu_B)^2 + (\Delta\nu_B/2)^2} \quad (1)$$

式中: ν_B 为布里渊增益谱增益的峰值频率,即布里渊频移; g_0 和 $\Delta\nu_B$ 分别为布里渊增益系数峰值和布里渊谱的半峰全宽;当 $\nu = \nu_B$ 时布里渊增益最大,如图1所示。

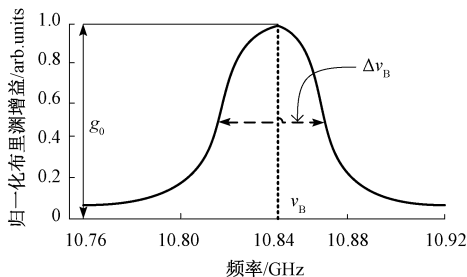


图1 布里渊散射增益谱

Fig. 1 Brillouin scattering gain spectrum

当信号受外界因素影响时, ν_B 可以表示为:

$$\nu_B = V_p - V_s = \frac{2nV_a w_p}{c} \sin(\theta/2) \quad (2)$$

式中: V_p 是斯托克斯光频率; V_s 是泵浦光频率; V_a 是光纤中的声速; n 为介质折射率; c 为光速; θ 为抽运光与探测光的夹角; w_p 为抽运波频率。

由于存在热光效应和弹光效应,应力 ε 和温度 T 的变化会使 n 、 V_a 等光纤自身参数发生变化,这些参量和折射率 n 都是 T 、 ε 的函数,分别记为 $n(T, \varepsilon)$ 、 $E(T, \varepsilon)$ 、 $k(T, \varepsilon)$ 、 $\rho(T, \varepsilon)$,其中 E 为杨氏模量; k 为泊松比; ρ 为光纤介质的密度。将其代入式(2)可得布里渊频移量:

$$\nu_B(T, \varepsilon) = \frac{2w_p}{c} \sqrt{\frac{[1 - k(T, \varepsilon)]E(T, \varepsilon)}{[1 + k(T, \varepsilon)][1 - 2K(T, \varepsilon)]\rho(T, \varepsilon)}} n(T, \varepsilon) \quad (3)$$

当参考温度为 T_0 ,光纤受到挤压、拉伸,应变发生交变时^[17],代入式(3)有:

$$\nu_B(T_0, \varepsilon) = \nu_B(T_0, 0) + C_{\varepsilon, \nu} \varepsilon \quad (4)$$

零应变时布里渊频移与温度的变化关系为:

$$\nu_B(T, 0) = \nu_B(T_0, 0) [1 + C_T(T - T_0)] \quad (5)$$

式中: T 为温度; T_0 为参考温度; C_T 为温度系数; ε 为应力; $C_{\varepsilon, \nu}$ 为布里渊频移应力系数。从式(4)和式(5)可以看出 T 、 ε 呈线性关系。为了分离温度对应变检测交叉的影响,假设应变传感器处于恒温条件下,对光纤施加应变,再对布里渊散射谱拟合寻峰,根据式(4)解得应变。

1.2 基于Adam算法的布里渊频移提取方法

一般使用梯度下降法、L-M、Gauss-Newton算法求解非线性最小二乘拟合问题。其中Gauss-Newton算法求解过程中正规方程可能不可逆导致结果不收敛,而L-M算法虽然初值要求少但是收敛速度慢。Adam算法是Momentum算法和RMSProp算法结合起来使用的一阶梯度下降算法。它具有动量累积梯度,在收敛速度变快时还能保证波动幅度稳定,并且只需极少量的参数调整。Adam算法还能纠正其他优化算法如学习率消失、损失函数波动较大等问题^[18-20]。

1) Adam算法原理

假设目标函数为 $J(\theta)$,常规的梯度下降法的更新公式为:

$$\theta'_k = \theta_k + \Delta\theta_k = \theta_k - \alpha \frac{\partial}{\partial \theta_k} J(\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_m) \quad (6)$$

式中: θ_k 表示第 k 个参数; α 为学习率,是一个常数; $\Delta\theta_k$ 为参数 θ_k 的变换量; m 为参数总量; $\frac{\partial}{\partial \theta_k} J(\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_m)$ 表示目标函数 $J(\theta)$ 在方向 θ_k 上的梯度。

常规的下坡法保持着固定学习率 α 对参数 θ_k 进行更新权重。而Adam算法通过计算下降梯度的一阶矩估计和二阶矩估计而为不同的参数 θ_k 设计独立的自适应性

学习率,还保持了先前梯度的指数衰减平均值,让每一次迭代学习率都有一个范围,使波动范围较小,使参数 θ_k 更平稳。对目标函数中参数的更新公式为:

$$\theta_{i,k} = \theta_{i-1,k} + \Delta\theta_{i,k} = \theta_{i-1} - \frac{\eta}{\sqrt{\frac{v_i}{1-\beta_2'} + \varepsilon}} \frac{m_i}{1-\beta_1'} \quad (7)$$

式中: η 为学习率; ε 不为0,取 10^{-8} ; $\beta_1, \beta_2 \in [0, 1)$ 分别为第一次矩估计的指数衰减率,第二次矩估计的指数衰减率; v_i 为梯度的第二时刻非中心方差值; m_i 为梯度的第一时刻平均值。

Adam 算法的迭代过程可由图 2 所示,先设置参数 $\eta, \varepsilon, \beta_1, \beta_2$,再初始化参数向量一阶矩向量(m_0)、二阶矩向量(v_0)和时间步(t),当参数 θ 没有收敛时,循环迭代更新各个部分,达到设定的迭代次数或者残差平方和达到精度要求就停止迭代并输出参数 θ 。

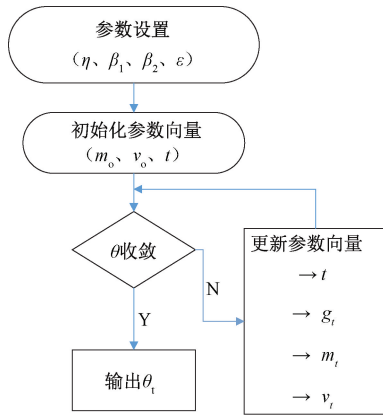


图 2 Adam 算法流程

Fig. 2 Flowchart of Adam algorithm

2) 使用 Adam 算法进行布里渊频移提取

在基于 BOTDR 的应变传感系统中,实测的 BGS 表示为离散点 $(x_i, y_i), i = 0, 1, \dots, N, N$ 为传感系统上的点数; x 为扫描频率; y 为布里渊信号强度; g 为理想的洛伦兹曲线。用函数 g 对实测离散点 (x_i, y_i) 进行拟合,调整 g 函数的参数使其不断逼近 (x_i, y_i) 。用均方误差衡量两数据的差异程度:

$$J(g_0, \Delta\nu_B, \nu_B) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (g|_{x=x_i} - y_i)^2 \quad (8)$$

使用图 2 的算法流程求解目标函数 $J(g_0, \Delta\nu_B, \nu_B)$ 的最优解,当到达迭代次数或者均方根误差最小时,函数 g 与离散点 (x_i, y_i) 的拟合程度最佳,这时函数 g 最高值 g_0 所对应的频率就是布里渊频移。

2 实验系统

微波外差相干探测的 BOTDR 系统如图 3 所示。窄线宽激光器发出 1 550.12 nm, 线宽为 186 kHz 的连续光,经过 90/10 耦合器分为的两路信号。其中 90% 一路为探测光,经过脉冲光调制器调制成 10 ns, 周期为 160 μ s 的探测脉冲光,然后被脉冲光放大器放大并通过扰偏器(PS)消除偏振态对拍频信号的影响并通过光隔离器防止回光,再进入 10 km 的传感光纤;另一路 10% 为参考光,并经由偏振控制器(PC)调整偏振角度,测试光纤末端加一个高反射镜以减少菲涅尔反射。光纤的回光经掺铒光纤放大器(EDFA)放大功率然后进入耦合器与本地参考光拍频,然后经平衡探测器(带宽 600 MHz)转化为电频信号,实现相干探测,用示波器采集数据,利用 Adam 算法对采集信号进行布里渊频移提取。

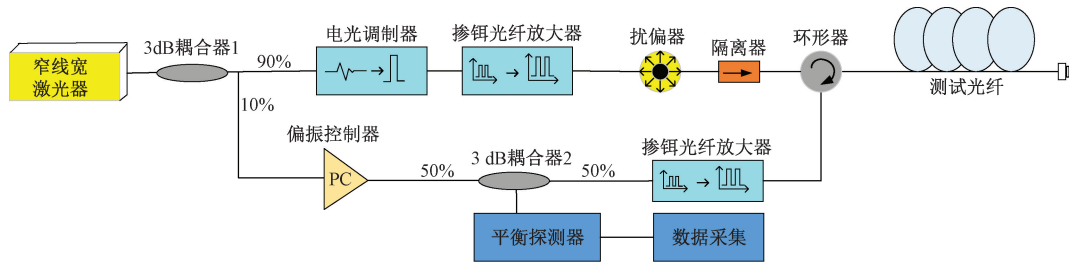


图 3 微波外差相干检测的 BOTDR 系统

Fig. 3 BOTDR system of microwave heterodyne coherent detection

3 实验结果和分析

布里渊散射信号非常微弱,难以直接探测。本实验系统选择型号 EDFA-BA-GF 进行增益,增益系数 25 dB,最大输出功率 23 dBm,增益平坦度为 0.8。它的泵浦波长为 1 480 nm,这个波长没有自发辐射放大(ASE)噪声

而且吸收面积和泵浦带宽都比较大。实验中用示波器采集信号并用 MATLAB 绘出了如图 4 所示的室温下的外差信号三维布里渊散射谱。从图 4 中可以看出布里渊散射谱受众多因素影响,会影响提取布里渊频移的精度,所以研究 BOTDR 散射谱的应变的提取方法,对提高分布式光纤传感系统的应变测量精度有很大意义。

将总长约为 10 km 的普通单模光纤置于 23℃ 的室温

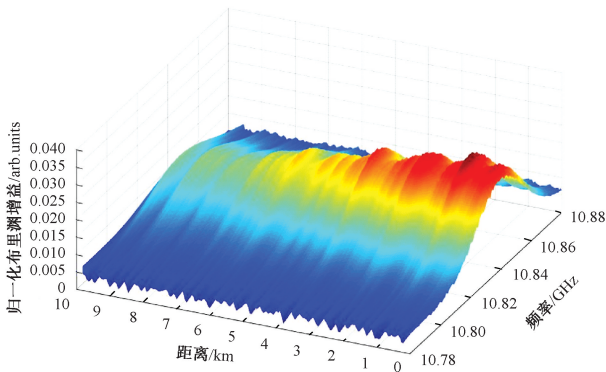


图4 布里渊散射谱三维图

Fig. 4 Three-dimensional image of Brillouin scattering spectrum

环境中,一端接环形器。将其中尾端大约 1 m 长的光纤固定于精密位移台 (ECSx3070) 上拉伸,施加应变并多次测量。选取其中一组布里渊散射频移离散点数据进行实验,结果如图 5 所示。

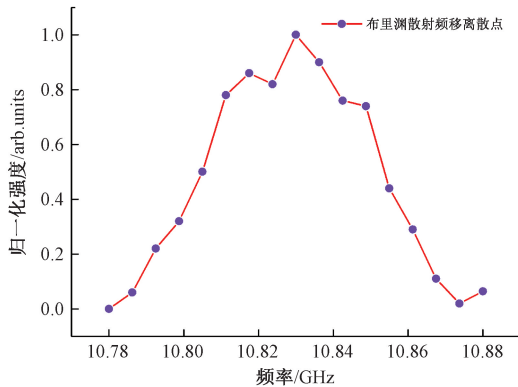


图5 布里渊散射信号的测量结果

Fig. 5 Measurement results of Brillouin scattering signal

图 6 所示为 Adam 算法、Gauss-Newton 算法、L-M 算法拟合布里渊散射谱二维图的曲线,拟合相似度分别为

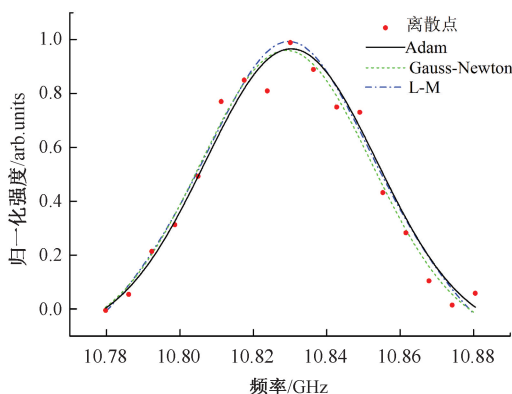
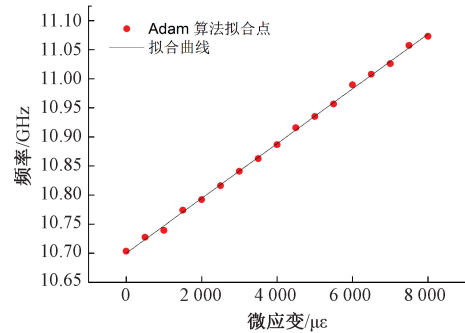


图6 3种算法的布里渊散射谱拟合曲线

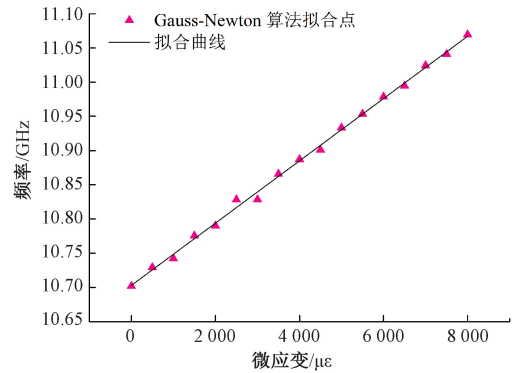
Fig. 6 Fitting curves of Brillouin scattering spectra of three algorithms

0.970 32、0.959 52、0.963 13,可以看出在拟合散射谱精度方面 Adam 算法具有优势。使用精密位移台 (ECSx3070) 拉伸尾端约 1 m 的光纤,以 500 $\mu\epsilon$ 为步进,拉伸应变范围为 [0, 8 000] $\mu\epsilon$,进行数据采集,分别使用 Adam 算法、Gauss-Newton 算法、L-M 算法进行数据处理得到 3 组离散点,并做线性拟合分析,结果如图 7 所示。



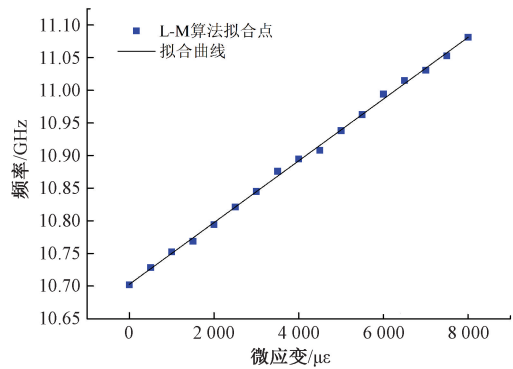
(a) Adam算法的拟合点和应变

(a) Fitting points and strains of Adam algorithm



(b) Gauss-Newton算法的拟合点和应变

(b) Fitting point and strain of Gauss-Newton algorithm



(c) L-M算法的拟合点和应变

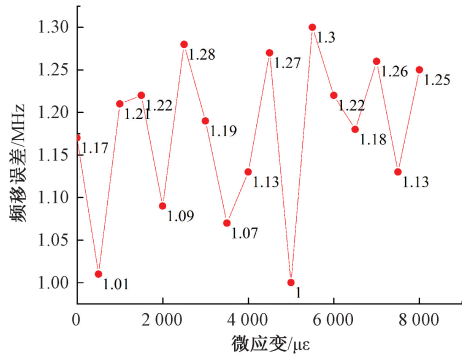
(c) Fitting point and strain of L-M algorithm

图7 布里渊频移量与应变改变量的拟合曲线

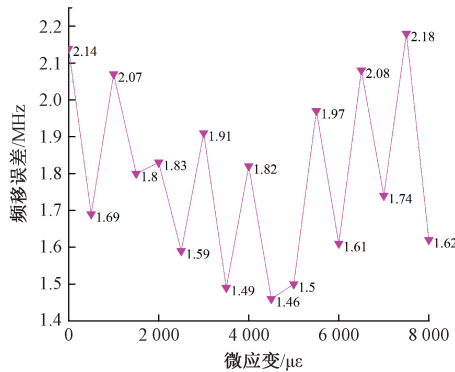
Fig. 7 Fitting curves of Brillouin frequency shift and strain change

从图 7 可知布里渊频移量与应变改变量之间都有较好的线性关系,在图 7(a) 中 Adam 算法拟合度为 0.998 9 (1 为最佳值),线性系数为 4.708 6 MHz/100 $\mu\epsilon$;

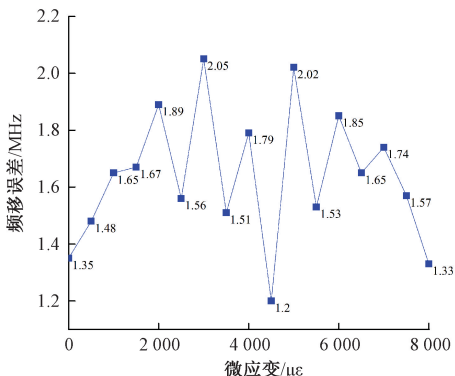
图 7(b)中 Gauss-Newton 拟合度为 0.9976,线性系数为 4.551 1 MHz/100 $\mu\epsilon$;图 7(c)中 L-M 拟合度为 0.998 6,线性系数为 4.727 9 MHz/100 $\mu\epsilon$;都与理论值(4.50 MHz/100 $\mu\epsilon$)^[21]较接近,证明搭建的应变传感系统具有良好性能,同时也说明使用 Adam 算法拟合曲线取得了较为准确的值。图 8 所示为 3 种拟合算法的拟合点在 [0,8 000] $\mu\epsilon$ 下的频移误差,误差分析如下:



(a) Adam算法的拟合曲线频移误差
(a) The frequency shift error of the fitting curve of the Adam algorithm



(b) Gauss-Newton算法的拟合曲线频移误差
(b) The frequency shift error of the fitting curve of the Gauss-Newton algorithm



(c) L-M算法的拟合曲线频移误差
(c) The frequency shift error of the fitting curve of the L-M algorithm

图 8 3 种算法在不同应变下的频移误差

Fig. 8 Frequency shift errors of three algorithms under different strains

由图 8(a)可知,Adam 算法拟合布里渊散射谱曲线的最大频移误差为 1.30 MHz;最小频移误差为 1 MHz,根据应变系数 4.708 6 MHz/100 $\mu\epsilon$ 可得最大应变测量误差为 27.60 $\mu\epsilon$;最小应变测量误差为 21.24 $\mu\epsilon$;平均应变测量误差为 24.89 $\mu\epsilon$;由图 8(b)可知,Gauss-Newton 算法拟合布里渊散射谱曲线的最大频移误差为 2.18 MHz;最小频移误差为 1.46 MHz,根据应变系数 4.551 1 MHz/100 $\mu\epsilon$ 可得最大应变测量误差为 47.90 $\mu\epsilon$;最小应变测量误差为 32.08 $\mu\epsilon$;平均应变测量误差为 39.40 $\mu\epsilon$;由图 8(c)可知 L-M 算法拟合布里渊散射谱曲线的最大频移误差为 2.05 MHz;最小频移误差为 1.2 MHz,根据应变系数 4.727 9 MHz/100 $\mu\epsilon$ 可得最大应变测量误差为 43.35 $\mu\epsilon$;最小应变测量误差为 25.38 $\mu\epsilon$;平均应变测量误差为 34.60 $\mu\epsilon$ 。分析知 Adam 算法拟合曲线的误差波动小,精度高。

系统的测量范围也是评价系统的关键指标,下面对搭建的应变传感系统的最大测量范围进行标定。如图 9 所示为以 500 $\mu\epsilon$ 为步进拉伸 10 000 $\mu\epsilon$ 的系统最大测量范围的误差分析。

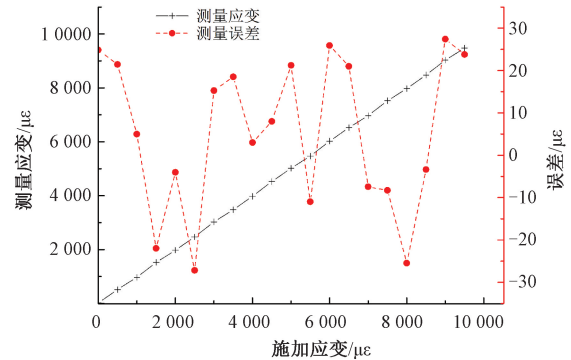


图 9 10 000 $\mu\epsilon$ 的测量结果误差分析

Fig. 9 Error analysis of 10 000 $\mu\epsilon$ measurement results

从图 9 可以看出实验刚开始的测量误差较大是因为使用精密位移台(ECSx3070)夹持光纤时的应力导致的误差,这种误差可以通过补偿进行校正。当拉伸到达 10 000 $\mu\epsilon$ 时,由于系统使用的平衡探测器的带宽限制,所以该系统的最大应变测量范围为 9 500 $\mu\epsilon$ 。同时系统的最大测量误差在 $\pm 28 \mu\epsilon$ 范围内,表明系统在 10 km 范围内能够实现较为精确的测量。

基于布里渊散射信号本质上具有洛伦兹型这一事实,对 3 种算法的准确性进行分析。表 1 所示为 3 种算法对应的评价指标的比较。 S^2 是样本总体的方差; $RMSE$ 是样本总体的均方根误差; R^2 为拟合度; $Runtime$ 为运行时间。由表 1 可得采用 Adam 算法建模的拟合效果最优,提取布里渊散射谱特征后的模型质量很高,且保持了良好的运算效率。

表1 3种拟合算法的评价指标

Table 1 Evaluation index values of three fitting algorithms

拟合算法	S^2	RMSE	R^2	Runtime/ms
Adam	0.012 9	0.110 5	0.998 9	18.5
Gauss-Newton	0.013 3	0.115 4	0.997 6	23.3
L-M	0.012 7	0.112 8	0.998 6	24.6

4 结 论

本文通过光的传输理论分析建立了布里渊光散射模型,根据散射模型对3种拟合算法进行了仿真分析,对布里渊光散射模型进行了验证。并建立了外差相干检测的布里渊应变测量系统,使用Adam算法对散射模型进行了拟合,并做误差分析。实验表明,该算法的信号处理时间仅为18.5 ms且拟合度佳(0.998 9),均方根误差小,拟合测量的精密度高。本文的研究结果对分布式布里渊光纤传感技术的数据特征提取提供了理论和实验依据。

参考文献

- [1] 孟凡勇,卢建中,闫光,等.长啁啾光纤光栅分布式双参量传感特性研究[J].仪器仪表学报,2017,38(9): 2210-2216.
MENG F Y, LU J ZH, YAN G, et al. Research on the characteristics of long-chirped fiber grating distributed dual-parameter sensing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(9): 2210-2216.
- [2] NG W P, LALAM N, DAI X W, et al. Integrating radio-over-fiber communication system and BOTDR sensor system[J]. Sensors, 2020, 20(8), DOI: 10.3390/s20082232.
- [3] 宋世德,张作才,王晓娜.光纤布拉格光栅水下钢筋腐蚀传感器[J].电子测量与仪器学报,2017,31(7): 1002-1008.
SONG SH D, ZHANG Z C, WANG X N. Fiber Bragg grating underwater rebar corrosion sensor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2017, 31(7): 1002-1008.
- [4] 饶云江.长距离分布式光纤传感技术研究进展[J].物理学报,2017,66(7): 158-176.
RAO Y J. Recent progress in ultra-long distributed fiber-optic sensing[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(7): 158-176.
- [5] KURASHIMA T, TATEDA M. Thermal effects on the Brillouin frequency shift in jacketed optical silica fibers[J]. Applied Optics, 1990, 29(15): 2219-2222.
- [6] 颜奕,黄宇,陈鸣,等.基于电容阵列I-V测试仪的光伏STC曲线拟合研究[J].电子测量与仪器学报,2017,31(2): 272-279.
- YAN Y, HUANG Y, CHEN M, et al. Study on curve fitting of photovoltaic STC based on capacitance array I-V tester [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2017, 31(2): 272-279.
- [7] HORIGUCHI T, KURASHIMA T, TATEDA M. Tensile strain dependence of Brillouin frequency dependency shift in silica optical fibres[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1989, 1(5): 107-108.
- [8] 张瑜,王东,白清,等.基于SOA脉冲调制的BOTDR应变检测系统[J].传感技术学报,2017,30(12): 1954-1958.
ZHANG Y, WANG D, BAI Q, et al. BOTDR strain detection system based on SOA pulse modulation [J]. Journal of Transducer Technology, 2017, 30(12): 1954-1958.
- [9] AZAD A K, WANG L, GUO N, et al. Signal processing using artificial neural network for BOTDA sensor system[J]. Optics Express, 2016, 24(6): 6769-6782.
- [10] 吕健刚,韦春桃.基于BOTDA布里渊背向散射光谱数据的拟合算法[J].光学技术,2015,41(4): 380-384.
LYU J G, WEI CH T. A fitting algorithm based on BOTDA Brillouin backscattering spectral data [J]. Optical Technology, 2015, 41(4): 380-384.
- [11] 尚秋峰,胡雨婷,刘薇.基于互相关卷积与高阶矩质心计算的布里渊散射谱特征提取[J].中国激光,2017,44(11): 241-248.
SHANG Q F, HU Y T, LIU W. Feature extraction of Brillouin scattering spectrum based on cross-correlation convolution and high-order centroid calculation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(11): 241-248.
- [12] 李晓娟,李永倩,胡智奇,等.多波长BOTDR系统中布里渊散射谱的特征提取[J].光子·激光,2016,27(12): 1286-1292.
LI X J, LI Y Q, HU ZH Q, et al. Feature extraction of Brillouin scattering spectrum in multi-wavelength BOTDR system [J]. Optoelectronics · Laser, 2016, 27(12): 1286-1292.
- [13] ZHANG Y J, LIU W Z, FU X H, et al. The high precision analysis research of multichannel BOTDR scattering spectral information based on the TTDF and CNS algorithm[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(7): 1802-1807.
- [14] 张燕君,徐金睿,付兴虎.基于GA-QPSO混合算法的Brillouin散射谱特征提取方法[J].中国激光,2016,43(2): 144-153.

- ZHANG Y J, XU J R, FU X H. Method of Brillouin scattering spectrum character extraction based on genetic algorithm and quantum-behaved particle swarm optimization hybrid algorithm [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(2): 144-153.
- [15] 潘宇航,路元刚,彭榭钦,等. 光子晶体光纤的布里渊增益谱特性[J]. 光学学报,2019,39(6):284-291.
- PAN Y H, LU Y G, PENG J Q, et al. Brillouin gain spectrum characteristics of photonic crystal fibers [J]. Acta Optics, 2019, 39(6): 284-291.
- [16] COSCETTA A, MINARDO A, ZENI L. Distributed dynamic strain sensing based on Brillouin scattering in optical fibers[J]. Sensors, 2020, 20(19): 5629.
- [17] PARKER T R, FARHADIROUSHAN M, HANDEREK V A, et al. Temperature and strain dependence of the power level and frequency of spontaneous Brillouin scattering in optical fibers [J]. Optics Letters, 1997, 22(11): 787-789.
- [18] ZHOU, Y F, ZHANG M CH, ZHU J L, et al. A randomized block-coordinate adam online learning optimization algorithm [J] Neural Computing & Application, 2020, 32(16): 12671-12684.
- [19] AN Y, WANG X C, CHU R H, et al. Event classification for natural gas pipeline safety monitoring based on long short-term memory network and Adam algorithm [J] Structural Health Monitoring-International Journal, 2020,19(4):1151-1159.
- [20] VO N D, HONG M S, JUNG J J. Implicit stochastic

gradient descent method for cross-domain recommendation system [J]. Sensors,2020,20(9):2510.

- [21] 张旭苹. 全分布式光纤传感技术 [M]. 科学出版社, 2013:224-225.

ZHANG X P. Fully distributed optical fiber sensing technology [M]. Science Press, 2013: 224-225.

作者简介



陈刚,2014年于长春理工大学获得学士学位,现为长春理工大学硕士研究生,主要研究方向分布式光纤传感技术。

E-mail: 17808076921@163.com

Chen Gang received his B. Sc. degree from Changchun University of Science and Technology in 2014. He is currently a master student at Changchun University of Science and Technology. His main research interest is distributed optical fiber sensing technology.



段洁(通信作者),2013于长春理工大学获得博士学位,现为长春理工大学副教授兼硕士生导师,主要研究方向为智能测试技术与系统、光电精密测量及柔性装配。

E-mail: dj0321@126.com

Duan Jie (Corresponding author) received her Ph.D. degree from Changchun University of Science and Technology in 2013. She is currently an associate professor and a master advisor at Changchun University of Science and Technology. Her research interests include intelligent testing technology and systems, photoelectric precision measurement and flexible assembly.