

分布式光纤温度传感系统的布里渊频移提取方法

王婷, 田凤*, 汤文青, 崔岩松

北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876

摘要 基于布里渊光时域分析(BOTDA)的分布式光纤传感系统被广泛用于测量外界环境的温度、应力等信息。为了进一步提高分布式光纤传感系统的测量精度与速度,提出一种基于自适应梯度下降算法的布里渊频移提取方法,搭建了 24.4 km 基于 BOTDA 的分布式温度传感系统,并进行实验验证。结果表明,与传统莱文伯-马奈特洛伦兹拟合法相比,本文方法能够快速、准确地提取出布里渊频移,对提高基于 BOTDA 的分布式温度传感系统的测量精度具有重要意义。

关键词 光纤光学; 光纤传感; 布里渊光时域分析; 自适应梯度下降算法; 布里渊频移

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.170631

Brillouin Frequency Shift Extraction Method for Distributed Optical Fiber Temperature Sensing System

Wang Ting, Tian Feng*, Tang Wenqing, Cui Yansong

School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract The distributed optical fiber sensing system based on Brillouin optical time domain analysis (BOTDA) can be used to measure temperature, stress, and other information in the external environment. In order to further improve the measurement accuracy and speed of distributed optical fiber sensing system, a Brillouin frequency shift extraction method based on adaptive gradient descent algorithm is proposed, and a 24.4 km distributed temperature sensing system based on BOTDA is setup. The results show that, compared with the traditional Levenberg-Marquardt Lorentz fitting algorithm, the proposed method can extract Brillouin frequency shift spectrum quickly and accurately, which is of great significance to improve the measurement accuracy of BOTDA distributed temperature sensing system.

Key words fiber optics; optical fiber sensing; Brillouin optical time domain analysis; adaptive gradient descent algorithm; Brillouin frequency shift

OCIS codes 060.2370; 290.0290; 070.4790; 150.1135

1 引言

随着物联网、互联网等新兴技术的蓬勃发展,光纤传感技术因具有重量轻、安全性好、分辨率高、传感距离长,以及定位精确度高等优点,被广泛应用于结构健康监测、电力系统及国防安全等诸多领域^[1-3]。其中,基于布里渊光时域分析(BOTDA)的分布式光纤传感技术利用光纤的受激布里渊散射(SBS)原理进行温度、应力等参数的测量。当注入

光纤的抽运脉冲光达到阈值功率,并且与连续探测光之间的频差等于光纤固有的布里渊频移(BFS)时,会产生 SBS 效应^[4-6]。根据 BFS 与温度、应力的线性关系,可获得对应的温度或应力信息^[7-8]。近年来,研究学者对 BOTDA 系统中 BFS 的提取方法进行了很多研究,如人工神经网络法^[9]、交叉互相关卷积法(XCM)^[10]、高斯牛顿法、莱文伯-马奈特洛伦兹拟合法(LM-LCF)等^[10-11]。其中,LM-LCF 相较于高斯牛顿法等非线性算法需要更少的初始值,被广

收稿日期: 2019-04-15; 修回日期: 2019-05-20; 录用日期: 2019-05-27

基金项目: 大学生创新基金(201802017)、国家自然科学基金(61605013)

* E-mail: tianfeng@bupt.edu.cn

泛应用于布里渊增益谱(BGS)的BFS提取,但是算法计算复杂度高;XCM利用交叉互相关卷积方法得到洛伦兹曲线的中心频率,从而实现了对温度、应力的动态测量,但该方法的时间扫描步长增大会导致其对温度、应力等测量精确度的降低。因此,研究能够提高基于BOTDA的光纤温度传感系统的BFS提取精度、降低计算复杂度、节省提取时间的方法具有重要的现实意义。

本文提出一种基于自适应梯度下降算法(AdaGrad)的BFS提取方法,分析了该方法提取BGS中BFS的原理,搭建了24.4 km的基于BOTDA的温度传感系统,并进行实验验证,结果表明,与常规梯度下降算法相比,AdaGrad对于初始值的依赖程度更低,收敛速度更快,并且具有较高的BFS测量精度。

2 基本原理

2.1 基于BOTDA的光纤温度传感系统的基本原理

图1为基于BOTDA的光纤温度传感系统的原理图。首先,激光源通过上下两支路分别输入到两个调制器产生脉冲抽运光和连续探测光,当相向传输的抽运光和探测光频差处于BGS范围内时,两束光就会在传感光纤区域内发生SBS效应^[12-13]。连续改变两束光的频差可获得传感光纤长度的BGS,对获得的布里渊谱进行数据拟合,可得光纤沿线的BFS分布,根据BFS与温度变化的线性关系可实现分布式温度传感^[14-15]。SBS为光纤中脉冲光、探测光与声波发生的非线性效应。由于声波在光纤中会按照指数形式衰减,布里渊散射信号呈现出洛伦兹形态,其表达式为

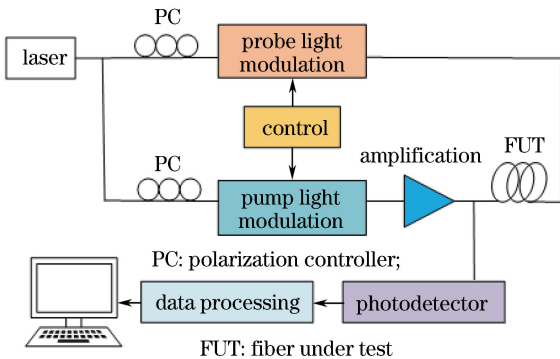


图1 基于BOTDA的光纤温度传感系统原理图
Fig. 1 Diagram of optical fiber temperature sensing system based on BOTDA

$$g_B(\nu) = g_0 \frac{\left(\frac{\Delta\nu_B}{2}\right)^2}{(\nu - \nu_B)^2 + \left(\frac{\Delta\nu_B}{2}\right)^2}, \quad (1)$$

式中: g_0 表示布里渊散射信号增益峰值; $\Delta\nu_B$ 表示BGS的半峰全宽; ν_B 为布里渊频移; ν 为扫描频率。当 $\nu = \nu_B$ 时,布里渊增益会达到峰值 g_0 。理想布里渊散射信号如图2所示。

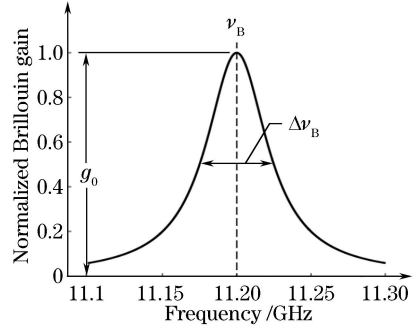


图2 布里渊散射信号示意图

Fig. 2 Diagram of Brillouin scattering signal

当光信号受外界因素影响时, ν_B 可表示为

$$\nu_B = 2nV_a\omega_p \sin(\theta/2)/c, \quad (2)$$

式中: n 为介质折射率; c 为光速; θ 为抽运光与探测光的夹角; ω_p 为抽运波频率; V_a 为声速,可表示为

$$V_a = \sqrt{\frac{(1-k)E}{(1+k)(1-2k)\rho}}, \quad (3)$$

式中: k 、 E 、 ρ 分别表示泊松比、杨氏模量、光纤介质的密度。由(2)式和(3)式可知,任何能直接或间接引起参数 V_a 和 n 改变的外界因素都会对 ν_B 产生影响^[14-15]。

由于存在弹光效应和热光效应,光纤所受温度 T 和应力 ϵ 的变化会使 n 、 V_a 等光纤自身参数发生变化。根据文献[16], ν_B 可表示为

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

$$\nu_B(T_0, \epsilon) = \nu_B(T_0, 0) + C_{\epsilon,\nu}\epsilon, \quad (5)$$

式中: T 为温度; T_0 为参考温度; $C_{T,\nu}$ 为光纤的布里渊频移温度系数; ϵ 为应力; $C_{\epsilon,\nu}$ 为光纤布里渊频移应力系数。从(4)式和(5)式可以看出, ν_B 和 T 、 ϵ 呈线性关系。(4)式表示光纤所受应力为0时(即光纤处于松弛状态),光纤中 ν_B 与 T 的关系;(5)式表示当光纤处于参考温度为 T_0 的环境中时受应力 ϵ 的情况下,光纤 ν_B 与 ϵ 的关系。综上所述, ν_B 的变化可以反映光纤所受温度或应力的大小。为了分离应力对温度的影响,假设光纤不受应力影响,即保持传感光纤处于松弛状态,观察 ν_B 与温度变化的关系。

2.2 基于 AdaGrad 的布里渊频移提取方法

针对布里渊散射信号增益谱,可将其转换为求解非线性最小二乘最优解的问题对其进行拟合,从而获取 BFS。求解非线性最小二乘的常用方法有高斯牛顿法、LM-LCF 和梯度下降法。其中,LM-LCF 相较于高斯牛顿法等非线性算法需要更少的初始值,被广泛用于 BFS 的提取,但是算法计算复杂度高。AdaGrad 在参数更新过程可以自适应地为各个参数分配不同的学习率,使得各参数的学习率随着历史梯度变化而进行调整^[17]。

2.2.1 AdaGrad 原理

假设目标函数为 $J(\theta)$,未经优化的梯度下降法使用固定的学习率 α 对参数 θ_k 进行更新,其更新公式为

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

式中: θ_k 表示第 k 个参数; $\Delta\theta_k$ 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; α 为学习率,是一个常数。

AdaGrad 在对参数更新的过程中,根据各个参数的历史梯度信息进行参数更新量的计算,其目标函数中参数的更新公式为

$$\begin{aligned} \theta_{t,k} &= \theta_{t-1,k} + \Delta\theta_{t,k} = \\ & \theta_{t-1,k} - \alpha_t \frac{\partial}{\partial\theta_k} J(\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_m), \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $\alpha_t = \frac{\eta}{\sigma + \sqrt{v_t}}$ (η 为常数,表示学习率; σ 为常数,其作用是使分母不为 0; v_t 为参数 θ_k 的历史梯度平方和); $\theta_{t,k}$ 为第 k 个参数在 t 时刻的状态; $\Delta\theta_{t,k}$ 为第 k 个参数在 t 时刻的变化量。

AdaGrad 的迭代过程可由图 3 描述^[17]。其中,迭代停止条件为达到一定的迭代次数或目标函数值

[(7) 式]。

AdaGrad 在对目标函数求解最优解的过程中,可根据目标函数中各个参数的历史梯度平方和对参数进行更新。当参数的历史梯度平方和较小时,可加快更新速度,使对目标函数的优化更快进入查找最优解的阶段。然而,使用历史梯度对参数进行更新也会导致待更新参数的整体学习率 ($\frac{\eta}{\sigma + \sqrt{v_t}}$) 逐渐减小至零,使得迭代后期参数的更新进入缓慢状态。

2.2.2 使用 AdaGrad 进行布里渊频移提取

在基于 BOTDA 的光纤温度传感系统中,实测的 BGS 表示为离散点 (x_i, y_i) , $i=0, 1, \dots, N$, N 为整根光纤上的点数, x 为扫频频率, y 为布里渊信号强度。建立理想的洛伦兹曲线,即

$$g = \frac{h}{1 + [(x - x_0)/(\omega/2)]^2}, \quad (8)$$

式中: g 为关于变量 x 的洛伦兹曲线函数; h 为该洛伦兹曲线的峰值; x_0 为中心频率; ω 为 3 dB 带宽。用函数 g 对实测离散点 (x_i, y_i) 进行拟合,调整 g 的参数使其不断逼近 (x_i, y_i) 。使用均方误差衡量函数 g 与实测数据之间的差异程度:

$$J(h, \omega, x_0) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (g|_{x=x_i} - y_i)^2. \quad (9)$$

使用图 3 所示的算法流程求解非线性目标函数 $J(h, \omega, x_0)$ 的最优解,当达到终止条件时,返回函数 g 与实测数据的拟合程度最佳,该时刻函数 g 最高值所对应的频率即为 BFS。

使用 AdaGrad 对布里渊增益谱进行 BFS 提取的流程如图 4 所示。

3 基于 BOTDA 的光纤温度传感系统

基于 BOTDA 的光纤温度传感系统实验平台如图 5 所示。中心频率为 1550.124 nm、线宽为 100 KHz 的连续光经过光耦合器分成两束:上支路光束经过调制器 MZM1 及可调谐微波源调制,输出上下移频为 10.78~10.89 GHz 的连续探测光(CW probe),可调谐步长为 5 MHz,光束经隔离器后进入 24.4 km 的待测光纤;下支路光信号经放大器的放大后,进入 MZM2 调制器,受到抽运脉冲信号的调制,产生周期为 500 μ s、宽度为 300 ns 的脉冲光,将 MZM2 的输出信号从光纤的另一端输入待测光纤。实验过程中,为使待测光纤不受应力影响,使光纤处于松弛状态,室温保持在 30 $^{\circ}$ C。在接收

AdaGrad

1. Require: initialization constant σ , learning rate η and parameters θ
2. Require: initialization gradient cumulant $v=0$
3. While unsatisfied "stop condition" do:
Give measured discrete point samples (x_i, y_i)
Calculate sample gradient $l_i \leftarrow -\Delta_{\theta_{i-1}} J[g(x_i; \theta_{i-1}), y_i]$
Cumulative square of historical gradient: $v_i \leftarrow v_{i-1} + l_i \cdot l_i$
- Calculate the update amount: $\Delta\theta_i \leftarrow -\frac{\eta}{\sigma + \sqrt{v_i}} l_i$
- Parameter update: $\theta_i \leftarrow \theta_{i-1} + \Delta\theta_i$
- End
4. Return θ

图 3 AdaGrad 的算法流程

Fig. 3 Algorithm flow of AdaGrad

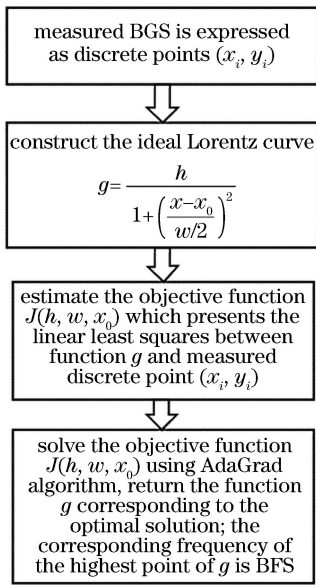


图 4 AdaGrad 提取 BFS 的流程图

Fig. 4 Flowchart of extracting BFS by AdaGrad

端,采用可调谐带通滤波器滤出光纤传输的布里渊散射信号,利用带宽 200 MHz 的光电探测器进行光电转换,并通过示波器实现数据采集,利用 AdaGrad 对采集信号进行 BFS 提取。

在基于 BOTDA 的光纤传感系统中,通过增大入射光功率可提高布里渊散射信号强度,但是传感系统的信噪比也会随之增加。因此,入纤脉冲光的功率测量与精确控制是搭建系统的重要前提。图 6 为基于 BOTDA 传感系统的脉冲光峰值功率测量示意图。

首先,脉冲光信号经过衰减器(衰减倍数为 A),光电探测器的增益为 RV/W ,其中: R 为电阻, V 为光电探测器输出脉冲信号的峰值电压, W 为光电探测器输入光的功率。用示波器观测脉冲光的脉冲周期及脉冲宽度,得到脉冲电压值为 V_0 ,则脉冲信号的峰值功率为

$$P_{in} = \frac{V_0 \cdot A}{R} \quad (10)$$

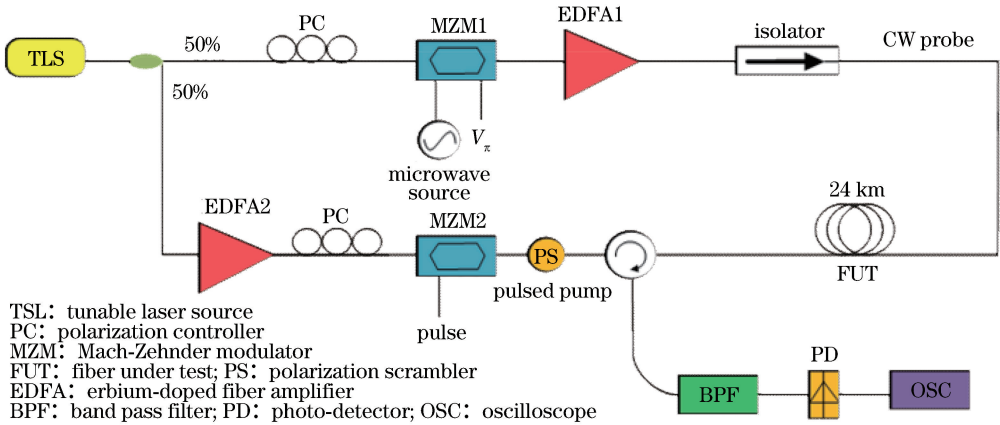


图 5 基于 BOTDA 的光纤温度传感系统实验框图

Fig. 5 Experimental block diagram of fiber optical temperature sensing system based on BOTDA

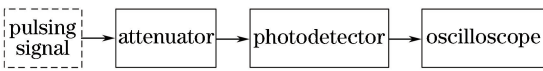


图 6 脉冲光峰值功率测量示意图

Fig. 6 Diagram of pulse peak power measurement

图 7(a)和(b)分别表示入纤脉冲光功率(P_s)为 17.3 dBm、14.5 dBm 时布里渊散射信号时域图。由图 7 可以看出,当入纤光功率低于阈值门限时,不会产生布里渊效应;通过增加入纤光功率可以获得更大的布里渊散射信号强度,但当入射脉冲光峰值功率过大时,会引起布里渊散射信号的失真,进而影响光纤温度测量精度。

4 仿真结果及分析

实验中采集的三维布里渊散射谱如图 8 所示,

该图反映了布里渊增益、布里渊频移及传感距离的相互关系。从图 8 可以看出,布里渊散射谱受噪声等因素影响,毛刺较多,洛伦兹型特征不明显。这些因素会削弱布里渊频移提取时的精度。这也说明,研究分布式光纤传感系统中布里渊频移的提取方法,对于提升分布式传感系统的温度测量精度^[18]具有重要意义。

根据图 4 所示的算法流程,需要对拟合函数 $g = \frac{h}{1 + [(x-x_0)/(w/2)]^2}$ 的 h, x_0, w 设置初始值。采用两种赋值方法分别对 AdaGrad 赋初值,并分析不同赋值情况下 AdaGrad 提取 BFS 的结果。

1)理想洛伦兹曲线 g 初始值接近真实值

采用传统方法来进行理想洛伦兹曲线初始值贴

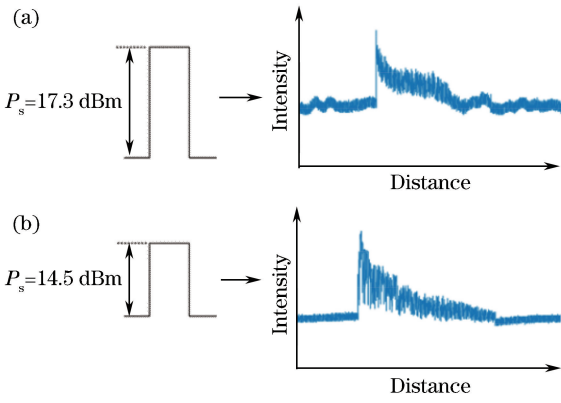


图 7 脉冲光峰值功率与布里渊散射信号的关系图。

(a) $P_s = 17.3$ dBm; (b) $P_s = 14.5$ dBm

Fig. 7 Relationship between pulse peak power and Brillouin scattering signal. (a) $P_s = 17.3$ dBm; (b) $P_s = 14.5$ dBm

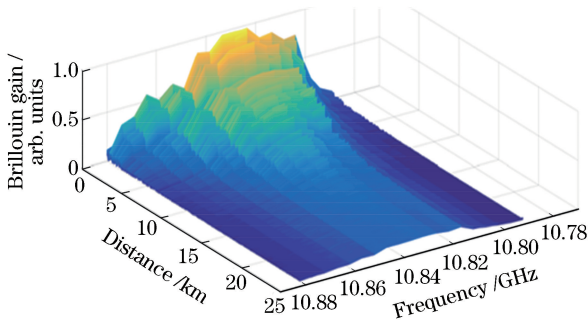


图 8 布里渊散射谱三维图

Fig. 8 Three dimensional map of Brillouin scattering spectrum

近真实值范围的赋值; h 设置为实测布里渊散射点的最大值; x_0 为布里渊散射点中谱线峰值所对应的频率值;对于 ω , 从离散点中找出最接近 $h/2$ 的两个点, 根据两点之间的 x 轴距离设定初始 ω 值。

采用该方法赋予的初值与实测数据接近, 可以在更少的迭代次数中达到最优解, 提升运算速度。

2) 理想洛伦兹曲线 g 初始值偏离真实值

为了衡量 AdaGrad 是否依赖于初始值的设定, 采用赋予参数偏离真实值的方法进行对比分析。 h 设置为实测布里渊散射点的最大值加 0.2; x_0 为布里渊散射点中达到峰值时所对应的频率值向右偏移 4 个离散点; 根据上述初始值接近真实值的赋值方法, 通过在根据上述初始值接近真实值的赋值方法确定的 ω 值的基础上乘以 0.8 对 ω 进行赋值。

为分析不同赋值情况下 AdaGrad 提取 BFS 的结果, 选用同一组实测布里渊散射频移离散点数据进行实验, 如图 9 所示。利用初始值接近真实值及

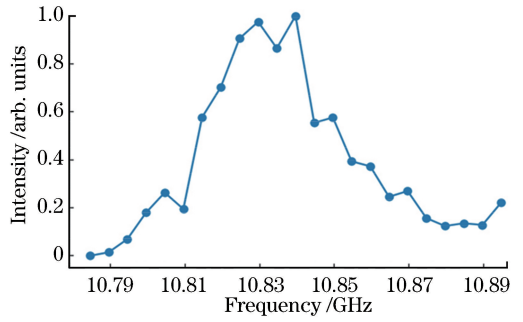


图 9 布里渊散射信号二维图

Fig. 9 Two dimensional map of Brillouin scattering signal 偏离真实值的 AdaGrad 和常规梯度下降法进行 BFS 提取, 结果如图 10 和图 11 所示。

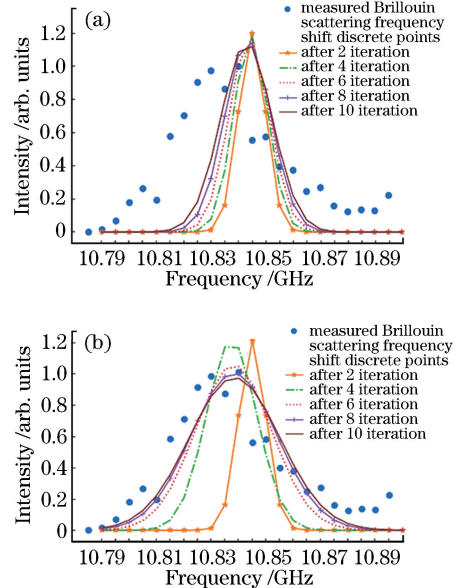


图 10 初始值偏离真实值赋值的布里渊散射谱拟合曲线。(a) 常规梯度下降法; (b) AdaGrad

Fig. 10 Brillouin scattering spectrum fitting curves with assignment of initial value deviating from real value. (a) General gradient descent method; (b) AdaGrad

图 10 (a) 和 (b) 分别为常规梯度下降法与 AdaGrad 在初始值偏离真实值赋值条件下的布里渊散射信号拟合曲线, 相比普通梯度下降法, AdaGrad 可以在有限的迭代次数中达到更好的拟合效果; 图 11 (a) 和 (b) 分别为常规梯度下降法与 AdaGrad 在初始值接近真实值赋值条件下的布里渊散射信号拟合曲线, 当理想洛伦兹曲线初始值贴近真实值时, 由于参数的初始值本身靠近真实值, 两种算法的拟合结果相差不多。综合图 10 和图 11 分析可知, 相比于常规梯度下降算法, AdaGrad 对于初始值的依赖程度低, 且收敛速度更快。

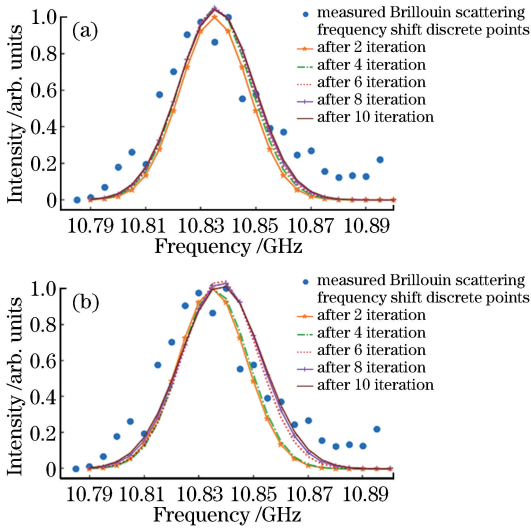


图 11 采用初始值接近真实值赋值的布里渊散射谱拟合曲线。(a)常规梯度下降法;(b) AdaGrad

Fig. 11 Brillouin scattering spectrum fitting curves with assignment of initial value close to real value.
(a) General gradient descent method;
(b) AdaGrad

为了进一步衡量 AdaGrad 提取 BFS 的速度性能,比较了 LM-LCF 及 AdaGrad 提取 BFS 的实验

表 1 LM-LCF 与 AdaGrad 的算法性能对比

Table 1 Comparison between LM-LCF and AdaGrad

Method	Average number of iterations per group of data	Average time per set of data /s	Average frequency shift error /(10^4 MHz)
LM-LCF	20	0.065	5.120
AdaGrad	20	0.042	4.879

参 考 文 献

[1] Ma J, Yu H H, Xiong J G, *et al.* Research progress of photonic crystal fiber sensors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(7): 070006.
马健, 余海湖, 熊家国, 等. 光子晶体光纤传感器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(7): 070006.

[2] Liao Y B, Yuan L B, Tian Q. The 40 years of optical fiber sensors in China[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328001.
廖延彪, 苑立波, 田芊. 中国光纤传感 40 年[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328001.

[3] Zhang Z L, Gao L, Sun Y Y, *et al.* Strain transfer law of distributed optical fiber sensor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(4): 0410001.
章征林, 高磊, 孙阳阳, 等. 分布式光纤传感器应变传递规律研究[J]. *中国激光*, 2019, 46(4): 0410001.

结果。采集的 BGS 信息表示为 23×14917 的矩阵。取相同的初始值,分别使用 LM-LCF 及 AdaGrad 对布里渊散射谱进行 BFS 提取,相应的每组数据(光纤上每个位置点对应的布里渊散射频率-强度数据,即 23×1 的矩阵)耗时、迭代次数、平均频移误差如表 1 所示。

结果表明,在相同的迭代次数和初始值赋值条件下,基于 AdaGrad 的 BFS 提取误差比 LM-LCF 降低 0.241×10^{-4} MHz。在信号处理速度上,AdaGrad 比 LM-LCF 每组数据平均节省 0.023 s,总耗时节省 5.7 min。这说明,AdaGrad 的实时性效果更佳。

5 结 论

提出一种基于 AdaGrad 的布里渊频移提取方法,搭建了 24.4 km 的基于 BOTDA 的光纤温度传感系统,并进行实验验证。结果表明:与常规梯度下降算法相比,AdaGrad 对于初始值的依赖程度更低,收敛速度更快;与 LM-LCF 相比,基于 AdaGrad 的 BFS 提取误差降低 0.241×10^{-4} MHz,总耗时节省 5.7 min。该算法在高精度长距离分布式光纤传感领域中具有较大的应用前景。

[4] Soto M A, Bolognini G, di Pasquale F. Analysis of pulse modulation format in coded BOTDA sensors [J]. *Optics Express*, 2010, 18(14): 14878-14892.

[5] Minardo A, Bernini R, Zeni L. Spatial resolution enhancement in preactivated BOTDA schemes by numerical processing [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(12): 1003-1005.

[6] Song M P, Bao C, Qiu C, *et al.* A distributed optical-fiber sensor combined Brillouin optical time-domain analyzer with Brillouin optical time-domain reflectometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(3): 650-654.
宋牟平, 鲍翀, 裘超, 等. 结合布里渊光时域分析和光时域反射计的分布式光纤传感器[J]. *光学学报*, 2010, 30(3): 650-654.

[7] Li Y Q, An Q, Li X J, *et al.* Optical fiber sensing technology based on loss vector Brillouin optical time domain analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(9): 0906004.

- 李永倩, 安琪, 李晓娟, 等. 损耗型矢量布里渊光时域分析光纤传感技术[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0906004.
- [8] Zhou D W, Wang B Z, Ba D X, *et al.* Fast distributed Brillouin optical fiber sensing for dynamic strain measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328005.
周登望, 王本章, 巴德欣, 等. 用于动态应变测量的快速分布式布里渊光纤传感[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328005.
- [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] Farahani M A, Castillo-Guerra E, Colpitts B G. A detailed evaluation of the correlation-based method used for estimation of the Brillouin frequency shift in BOTDA sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(12): 4589-4598.
- [11] Lü J G, Wei C T. Fitting algorithm for BOTDA Brillouin back scattered-light spectrum data [J]. Optical Technique, 2015, 41(4): 380-384.
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.
- [12] Zhou D W, Dong Y K, Wang B Z, *et al.* Slope-assisted BOTDA based on vector SBS and frequency-agile technique for wide-strain-range dynamic measurements[J]. Optics Express, 2017, 25(3): 1889-1902.
- [13] Hu J H, Xia L, Yang L, *et al.* Strain-induced vibration and temperature sensing BOTDA system combined frequency sweeping and slope-assisted techniques [J]. Optics Express, 2016, 24(12): 13610-13620.
- [14] Tao Y M. Research on distributed optical fiber sensor based on Brillouin scattering [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunication, 2017: 16-18.
陶一鸣. 基于布里渊效应的分布式光纤传感器技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2017: 16-18.
- [15] Lin W Q. Research of distributed optical fiber sensors based on Brillouin scattering [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunication, 2017: 29-32.
林文桥. 基于受激布里渊效应的分布式光纤传感器的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2017: 29-32.
- [16] Meng Z, Chen M, Chen W, *et al.* Stimulated Brillouin scattering in optical fiber sensing systems [J]. Journal of Applied Sciences, 2018, 36(1): 20-40.
孟洲, 陈默, 陈伟, 等. 光纤传感中的受激布里渊散射效应[J]. 应用科学学报, 2018, 36(1): 20-40.
- [17] Zhang H. Research and improvement of optimization algorithms in deep learning [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018: 15-28.
张慧. 深度学习中优化算法的研究与改进[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018: 15-28.
- [18] Muanenda Y S, Taki M, Nannipieri T, *et al.* Advanced coding techniques for long-range Raman/BOTDA distributed strain and temperature measurements[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(2): 342-350.