

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

尚秋峰, 胡雨婷*, 刘 薇

华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003

摘要 针对目前布里渊光时域分析(BOTDA)分布式光纤传感系统存在的实时性较差的问题,为了缩短测量时间,提出一种基于互相关卷积与高阶矩质心计算相结合的布里渊散射谱特征提取方法。首先将布里渊散射谱沿光纤的扫频数据与理想 Lorentz 曲线作互相关卷积,然后利用卷积结果峰值附近的理想 Lorentz 线型特征进行高阶矩质心提取,并将提取结果作为布里渊频移(BFS)的估计值;其次,搭建 1.5 km 的瑞利 BOTDA 温度传感系统对所提算法进行可行性验证。结果表明:不同于常用的 Lorentz 拟合(LCF),所提算法避免了复杂的迭代求解所造成的测量时间延长,具有良好的实时性与测量精度,选取恰当的数据点数与阶数可将误差控制在小于 1 MHz;当进行长距离高分辨率的动态测量而不得不加大扫频间隔以减少测量时间时,所提算法的测量误差远小于基于莱文伯-马奈特(LM)算法的 LCF 的测量误差。

关键词 散射; 布里渊光时域分析; 互相关卷积; 布里渊散射谱; 质心计算; 高阶矩

中图分类号 TN247 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201744.1106011

Feature Extraction of Brillouin Scattering Spectrum Based on Cross-Correlation Convolution and High-Order Centroid Calculation

Shang Qiufeng, Hu Yuting, Liu Wei

*School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University,
Baoding, Hebei 071003, China*

Abstract Aiming at the problem of poor real-time performance of Brillouin optical time domain analysis (BOTDA) distributed optical fiber sensing system, we propose a extraction method of Brillouin scattering spectrum feature based on the cross-correlation convolution and high-order centroid calculation to reduce measuring time. Firstly, the sweep data of the Brillouin scattering spectrum along the optical fiber is convoluted with the ideal Lorentz curve, and the convolution result has a nearly ideal Lorentzian distribution around its peak. Then we carry out high-order centroid extraction, and take the extracted result as an estimated value of Brillouin frequency shift (BFS). A 1.5 km Rayleigh BOTDA temperature sensing experiment is designed to verify the feasibility of the proposed algorithm. The results show that the proposed algorithm is different from the conventional Lorentz curve fitting (LCF), it avoids extension of measuring time caused by the complex iterative process, and has good real-time performance and measurement accuracy. The proper selection of data point numbers and calculation orders can control the error within 1 MHz. When the sweep interval has to be increased to reduce the measurement time in long-range and high-resolution dynamic measurement, the proposed algorithm has a smaller measurement error than the LCF based on the Levenberg-Marquardt (LM) algorithm.

Key words scattering; Brillouin optical time domain analysis; cross-correlation convolution; centroid calculation; Brillouin scattering spectrum; high-order centroid

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 060.4370

收稿日期: 2017-07-10; **收到修改稿日期:** 2017-07-23

基金项目: 国家自然科学基金(61377088)、河北省自然科学基金(F2014502098)

作者简介: 尚秋峰(1968—),女,博士,教授,主要从事现代测量与传感技术方面的研究。E-mail: lindashqf@126.com

* **通信联系人.** E-mail: 18330215180@163.com

1 引 言

布里渊光时域分析(BOTDA)是目前研究和使用的较多的一种分布式光纤传感技术。该技术依据应力和温度的变化能线性改变散射光的布里渊频移(BFS)这一原理来实现应变和温度的长距离连续传感^[1-2],具有动态范围大、空间分辨率高、定位准确、传感距离长等优势,因此广泛应用于电力通信线缆、桥梁、隧道,以及大型工程设施的健康检测、故障诊断和定位领域^[3]。

通过拟合布里渊散射谱中光纤各位置处的离散扫频数据来获取 BFS 量是一种普遍使用的方法,但这种方法需要反复迭代才能求出参数向量的最小二乘解,实时性差,还容易出现欠拟合现象,导致测量误差增大,不能满足动态测量的要求^[4]。当前,国内外学者针对动态测量提出了布里渊增益谱(BGS)斜坡法^[5]、多波长光源探测技术^[6]和布里渊相移谱与射频解调技术^[7],这些方法或技术都旨在缩短系统的测量时间。BGS 斜坡法将脉冲光与探测光的频差固定在 BGS 斜坡中心处,当 BGS 受应变的影响而发生移动时,通过检测探测光强度随时间的变化即可得到固定位置点的应变随时间的变化曲线。多波长光源探测技术利用同一个多波长光源产生脉冲光和探测光,通过设置波长间隔和连续光的频移产生不同波长的成对脉冲光、连续光而进行快速传感。布里渊相移谱与射频解调技术采用相位调制的探测光与脉冲光相互作用,对探测信号进行射频解调,实现相移谱与散射谱的动态测量。以上技术方案避免了传统的一对一扫频过程,能实现快速的动态布里渊传感。然而,其实际应用范围有限,目前绝大多数传感方案仍然使用扫频法来探测布里渊散射谱,并用 Lorentz 拟合(LCF)进行谱分析,致使测量时间至少需要十几分钟。为了改善 BOTDA 系统的实时性,本文结合互相关卷积与高阶矩质心计算,提出了一种新的布里渊散射谱特征提取方案。

2 常用拟合算法

在布里渊散射谱特征提取方面,常用于非线性最小二乘求解的方法有莱文伯-马奈特(LM)法^[8]、高斯-牛顿(GN)法^[9]、最速下降(SD)法^[10]和粒子群寻优(PSO)算法^[11]等非线性参数估计方法。其中,LM 法在 GN 法的基础上引入阻尼因子,兼具 GN 法局部收敛和 SD 法全局收敛的优点。通过每次迭代求解出使目标函数减小的寻找步长,可以看作是引入信赖域的高斯-牛顿法。相比于 GN 法和 SD 法,LM 法有更好的收敛性和稳健性,更少地依赖于初始条件的设定^[12]。因此,基于 LM 非线性最小二乘的 LCF 被广泛应用于 BFS 的提取。

假设 BFS 参数估计模型为 $y = f(x, \boldsymbol{\theta})$,其中 $\boldsymbol{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m)$ 为参数向量,实际采集 N 个数据点 $(x_i, y_i), i \in [1, N]$,其一般呈有噪 Lorentz 线型分布。从而可将非线性最小二乘拟合问题转化为求均方误差 e_{MSE} 极小值点的向量解 $\boldsymbol{\theta}$,即

$$\min_{\boldsymbol{\theta}} [e_{\text{MSE}}(\boldsymbol{\theta})] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i - f(x_i, \boldsymbol{\theta})]^2. \quad (1)$$

基于 LM 算法的迭代模型为

$$\boldsymbol{\theta}_{k+1} = \boldsymbol{\theta}_k - (\mathbf{J}\mathbf{J}^T + \lambda\mathbf{I})^{-1} \mathbf{J}e_{\text{MSE}}(\boldsymbol{\theta}_k), \quad (2)$$

$$\mathbf{J}_i = \frac{\partial f(x_i, \boldsymbol{\theta}_k)}{\partial \boldsymbol{\theta}_k}, \quad (3)$$

式中 λ 为阻尼因子; \mathbf{I} 为单位矩阵; \mathbf{J} 为偏微分 Jacobian 矩阵,其第 i 行为 f 对 $\boldsymbol{\theta}_k$ 的梯度向量 \mathbf{J}_i 。每次迭代后通过调整因子 $v(v > 1)$ 计算新的 λ ,将 λ/v 作为下一次的迭代参数,如果能减小均方误差,则按该计算方式继续处理;否则连续作 $\lambda \times v$ 运算,直至得到使均方误差减小的 λ ,当满足终止控制条件时,停止迭代。

LM 算法需要对每一个待估参数求偏导,Jacobian 矩阵的求解十分复杂,其计算复杂度至少在 $O(rN^2)$ 量级,其中 r 为迭代次数。因此,采用拟合的方式来处理扫频布里渊散射谱不具有实时性。

3 互相关算法与高阶矩质心算法

3.1 互相关算法原理

互相关算法(XCM)是将服从 Lorentz 分布的有噪原始信号与理想的 Lorentz 信号作互相关卷积,从而

使结果信号在峰值周围呈几近理想的 Lorentz 线型,并使信噪比显著改善的方法^[13]。

假设有噪原始信号 $g_n(v) = g_m(v) + n(v)$,其中 $g_m(v)$ 为理想 Lorentz 成分, $n(v)$ 为高斯白噪声。 $n(v)$ 与理想 Lorentz 信号 $g_r(v)$ 作互相关卷积的过程为

$$g(v) = g_r(v) * [g_m(v) + n(v)] = g_r(v) * g_m(v) + g_r(v) * n(v) = g_c(v) + N_c, \quad (4)$$

式中 N_c 为理想 Lorentz 曲线与高斯白噪声的卷积,如果 $g_r(v)$ 左右对称,那么它在峰值附近将大幅减小; $g_c(v)$ 为 2 条理想 Lorentz 曲线的卷积,其中心频率 v_c 、线宽 Δv_c 近似满足

$$v_c = v_r + v_m, \quad (5)$$

$$\Delta v_c = \Delta v_r + \Delta v_m, \quad (6)$$

式中 v_r 、 v_m 分别为 $g_r(v)$ 、 $g_m(v)$ 的中心频率, Δv_r 、 Δv_m 分别为 $g_r(v)$ 、 $g_m(v)$ 的线宽。

由此可知,将布里渊散射谱沿光纤的扫频数据作互相关计算,再将卷积结果的中心频率减去 v_r 就能近似得到沿光纤的 BFS。但局限性在于扫频数据服从 Lorentz 分布的程度直接影响计算结果的准确度,因此还需要对服从 Lorentz 分布不理想的含噪信号进行提取。

3.2 高阶矩质心算法

由于光纤中声波以指数的形式衰减,光在光纤中的传输特性使布里渊散射谱以布里渊频移 v_B 为中心呈 Lorentz 线型扩展。即使是考虑了消光比不足造成的连续光泄漏以及光的自然展宽、多普勒展宽等现象的 Pseudo-Voigt(P-V)模型,也都满足关于峰值频率点对称^[14]。由于互相关算法的卷积结果在峰值附近呈近似理想的 Lorentz 分布,因此可以采用质心计算来估计其中心频率,该算法的计算复杂度远小于 LCF 的计算复杂度^[15]。

通常利用一阶矩求解质心,即

$$v_c = \sum_j (v_j I_j) / \sum_j I_j, \quad (7)$$

式中 v_c 为亚像素级的质心频率估计, v_j 和 I_j 分别为点 j 处的频率和变化强度。但是这样求得的 v_c 误差很大,主要原因是一阶质心计算对远离中心点的噪声十分敏感,并且实际测量数据并非理想的对称形状。鉴于此,本课题组提出利用高阶矩方法计算质心,即

$$v_c = \sum_j (v_j I_j^\gamma) / \sum_j I_j^\gamma, \quad (8)$$

式中 $\gamma = 1, 2, \dots, k$ 为计算阶数。将强度变化量幅值归一化后得到 $I \in [0, 1]$, γ 阶计算实质上如同权重优化,越接近卷积结果的最大值,权重越大。由于 v_c 位于实际的峰值频率处,接近卷积结果最大值所对应的频率,因此,当 γ 在一定范围内逐渐增大时,得到的质心频率越接近 BFS。且该方法的计算复杂度为 $O(\gamma N)$,实时性较好。

4 结合算法设计

针对通过扫频方式获取布里渊散射谱的 BOTDA 传感系统,提出结合互相关卷积与高阶矩质心计算来进行 BFS 提取的方案:1) 对采集的布里渊散射谱进行二维小波阈值降噪,根据降噪后沿光纤的扫频数据服从 Lorentz 分布的程度,决定是否进行峰值对称截取;2) 按照实验设置的扫频范围和步长,取相应的理想 Lorentz 数据点,其中心频率和线宽分别取扫频范围和线宽范围(通常介于 30~50 MHz)的中间值;3) 将沿光纤各处的扫频数据幅值归一化后与理想 Lorentz 数据作互相关卷积;4) 取卷积结果最大值两侧一定范围内的数据进行 γ 阶矩计算,提取质心频率坐标 v_c ,由 $v_B = v_c - v_r$ 得出沿光纤的 BFS。

5 实验设计与验证

为了验证算法的可行性,搭建 1.5 km 的瑞利 BOTDA 传感系统进行常温与加温测试,整体实验系统如图 1 所示。先采用 2 个电光调制器(EOM)按 3 dB(50:50 OC)光纤耦合的并联结构产生含脉冲基底的脉冲光,其中上支路的 MBC1 控制 EOM1 将分布反馈激光器(DFB-LD)发出的光调制成 0 阶脉冲光,下支路的 MBC2 控制 EOM2 工作在传输曲线的谷点,调制得到抑制载波对称的 1 阶双边带连续光。合成光信号经可

变光衰减器 (VOA) 衰减、掺铒光纤放大器 (EDFA) 放大、光栅 FBG1 滤除自发辐射噪声 (ASE) 后进入传感光纤。脉冲基底的 1 阶上下边带产生后向瑞利散射光, 该光作为探测光与 0 阶脉冲光发生受激布里渊散射 (SBS) 作用, 最后经过光栅滤波器滤除基带和 1 阶上边带后送入光电检测端 (PD), 通过示波器 (OSC) 进行数据采集与处理后, 提取 Stokes 边带的温度传感信息。当 1 阶边带连续光与 0 阶脉冲光的频差等于光纤某处的 BFS (即 ν_B) 时, 能量转移最大。通过扫描微波频率得到不同频差时的强度变化曲线, 再对光纤每个位置的二维数据进行 BFS 提取, 即可得到沿光纤的连续传感信息。

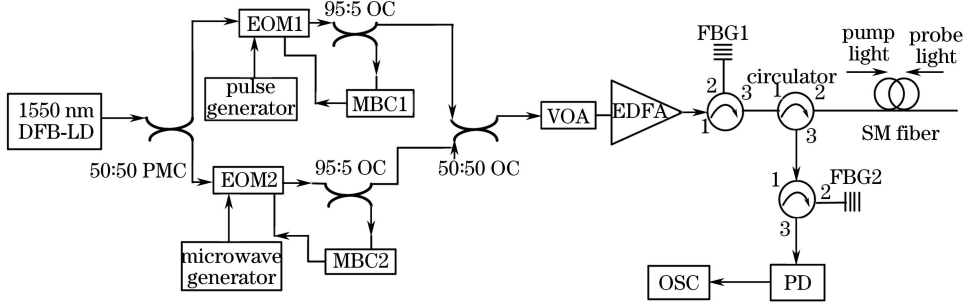


图 1 瑞利 BOTDA 传感实验系统

Fig. 1 Experimental setup for Rayleigh BOTDA sensing system

5.1 常温测试

在常温 (25 °C) 下, 设置脉宽为 100 ns, 扫频范围为 10.81~10.92 GHz, 步长为 5 MHz, 信号叠加平均次数为 10000, 小波去噪后的三维布里渊增益谱如图 2(a) 所示。将沿光纤的扫频数据与图 2(b) 所示的理想 Lorentz 数据点作离散卷积, 其中 ν_r 取 10.865 GHz, $\Delta\nu_r$ 取 40 MHz, 卷积结果如图 2(c) 所示。由图 2(c) 可知, Lorentz 线型特征十分明显, 峰值两侧近似对称, 由此提取的质心频率点更接近实际的 BFS, 即 ν_B 。

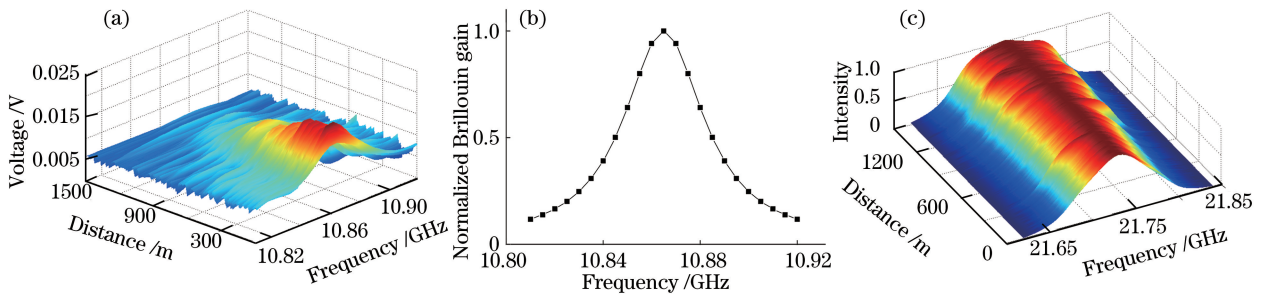


图 2 互相关卷积过程。(a) 布里渊增益谱; (b) 理想 Lorentz 曲线; (c) 互相关卷积结果

Fig. 2 Process of cross-correlation convolution. (a) Brillouin gain spectrum; (b) ideal Lorentz curve; (c) cross-correlation convolution result

直接由卷积结果的全部数据点提取 1 阶质心频率坐标再减去 ν_r 得到 ν_B , 与基于 LM 算法最高 400 次迭代的 LCF 结果进行对比, 结果如图 3 所示。由图 3 可知: 在光纤始端, 2 种方式提取的 ν_B 有相似的变化规律, 证明了所提算法是可行的; 而在光纤末端, 采用 LCF 方式的欠拟合现象十分严重, 导致传感信息难以提取。在某些欠拟合情况下, 2 种方式的提取结果如图 4 所示。由图 4 可知, 所提算法确定的 ν_B 比 LCF 确定的 ν_B 更可靠, 并且所提算法得到的结果的波动幅度更小, 更有利于沿光纤的温度提取。

将卷积结果数据点全部用于质心提取会增加计算量。为了满足实时性的要求, 可以在卷积结果最大值附近提取一定范围的数据点参与计算, 以实现温度变化范围的快速提取。分别提取最大值对称两侧数据点个数分别为 30、20、10、4 的点和最大值点共同参与 1 阶质心计算, 结果如图 5 所示。由图 5 可知, 随着选取数据点个数的减少, 波动幅度减小, BFS 变化范围更明显。对于某些实时性要求较高的场合, 该方法可以快速提取 BFS 的变化范围。

高阶计算可以提高 BFS 提取的准确度, 但同时也会增加计算量, 不利于工程的实时性。在选取少量数

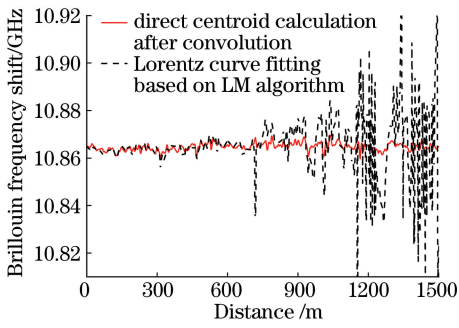


图 3 2 种方式提取的 BFS 对比

Fig. 3 Comparison of BFS extracted by two ways

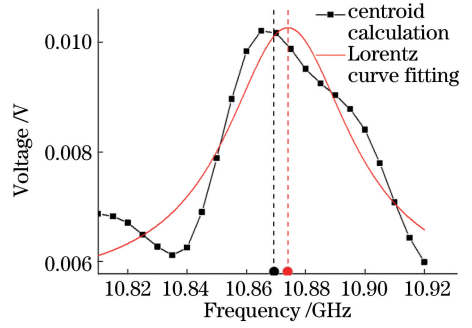


图 4 欠拟合情况下 2 种方式提取的 BFS 对比

Fig. 4 Comparison of BFS extracted by two ways in case of under-fitting

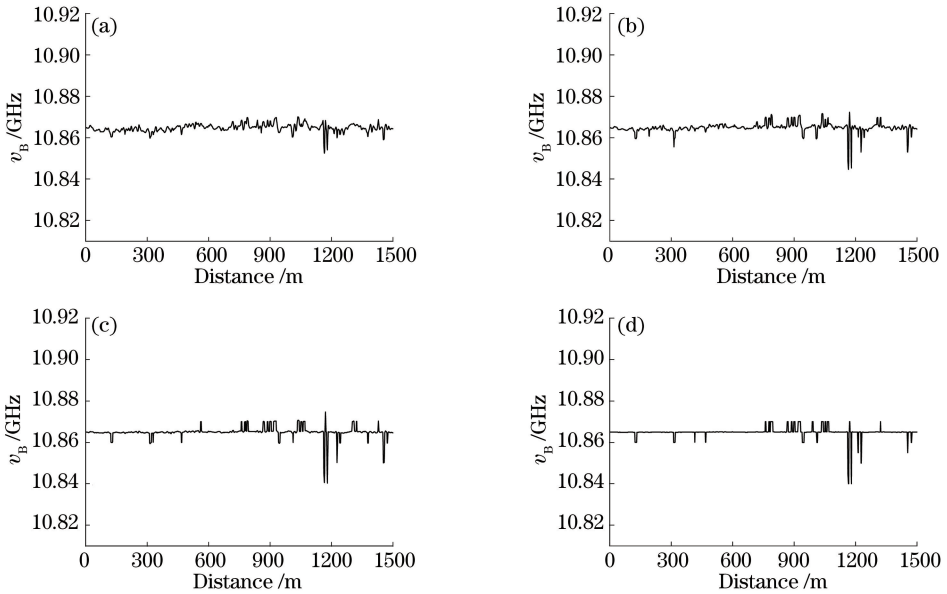


图 5 不同数量数据点对应的 BFS 提取结果。(a) 30;(b) 20;(c) 10;(d) 4

Fig. 5 BFS extraction results corresponding to different point numbers.

(a) 30 points; (b) 20 points; (c) 10 points; (d) 4 points

据点的情况下,采用高阶矩计算也能满足实时性的要求。对图 5(d)中选取的数据进行 γ 阶质心提取,结果如图 6(a)和图 6(b)所示。当阶数控制在小于 1000 时,取拟合度良好的前 800 m 距离,对高阶所提算法的提取结果与基于 LM 算法最高 400 次迭代的 LCF 计算结果求均方误差,结果如图 6(c)所示。由图 6(c)可知,当 γ 约为 60 时,均方误差 MSE 最小,约为 6.73×10^{-7} ,标准差约为 0.82 MHz,此时与 LCF 的结果对比如图 6(d)所示。由图 6(d)可知,两者在光纤前端的变化趋势基本重合,因此高阶计算具有良好的提取精度和更稳定的波动范围。由此可知,在一定范围内增大阶数,能有效还原各处的 BFS;当 γ 超过一定范围后, v_B 向卷积结果最大值对应的频率处继续偏移,最后在该处来回振荡;MSE 先增大,然后增大幅度放缓,直至几乎不变。

为了比较所提算法与基于 LM 算法的 LCF 在扫频间隔较大时的差错性能,采用 2 种方式分别对扫频间隔为 10 MHz 和 20 MHz 的布里渊散射谱进行 BFS 提取,仍然取拟合度良好的前 800 m 距离参与计算。当间隔为 10 MHz 时,比较结果如图 7(a)所示。由图 7(a)可知,LCF 的标准差约为 2.49 MHz,取卷积结果最大值两侧对称的 4 个点与最大值点进行 60 阶质心提取的标准差约为 1.52 MHz。当间隔为 20 MHz 时,比较结果如 7(b)所示。由图 7(b)可知,LCF 的标准差约为 13.04 MHz,高阶所提算法的标准差约为 4.12 MHz。可见,如果加大扫频间隔,那么所提算法比基于 LM 算法的 LCF 具有更高的测量精度。

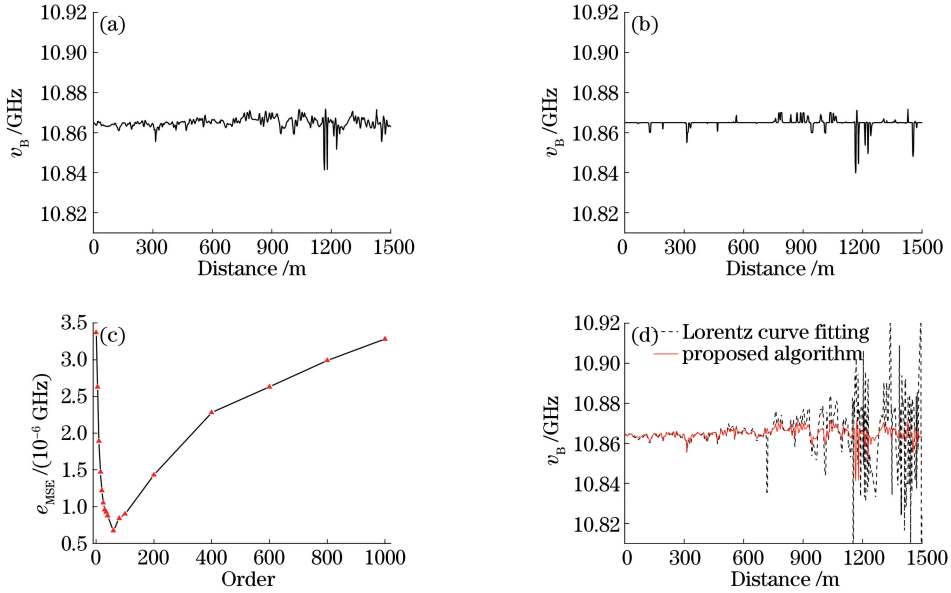


图 6 BFS 的高阶提取。(a) $\gamma=60$; (b) $\gamma=1000$; (c) e_{MSE} ; (d) 所提算法与 LCF 提取结果的对比
 Fig. 6 High-order extraction of BFS. (a) $\gamma=60$; (b) $\gamma=1000$; (c) e_{MSE} ; (d) comparison of extracted BFS of LCF and the proposed algorithm

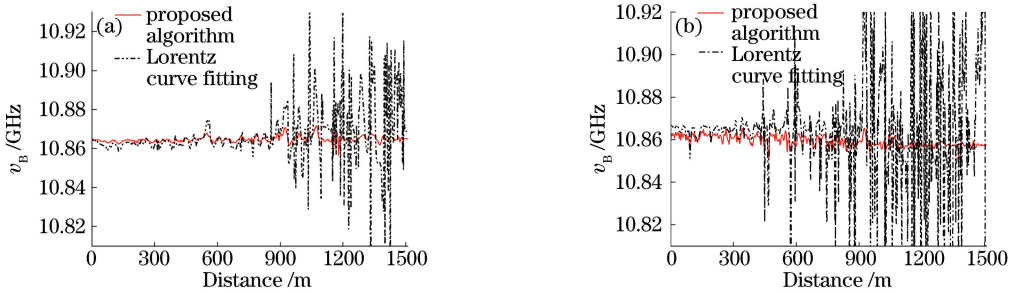


图 7 扫频间隔为 (a) 10 MHz 和 (b) 20 MHz 时 2 种方式的 BFS 提取结果比较

Fig. 7 Comparison of BFS extraction results in two ways at scanning frequency intervals of (a) 10 MHz and (b) 20 MHz

5.2 加温测试

选取另一种型号的单模测试光纤,将长度约为 70 m 的中段放入温度为 60 °C 的恒温箱中(室温为 22 °C),小波去噪后的三维布里渊增益谱如图 8(a)所示,降噪后该信号服从 Lorentz 分布,但仍然不够理想,互相关卷积结果如图 8(b)所示。由该图可知,卷积结果在峰值附近并非理想的 Lorentz 分布。对某处的卷积数据进行 LCF,结果如图 8(c)所示,由于分布不理想,这样的数据不能直接参与质心计算。鉴于此,对布里渊散射谱进行峰值对称截取,在尽量保留多数扫频点的条件下,截取峰值两侧幅度相近的数据点集,截取后的散射谱如图 8(d)所示。该方法在保留了峰值信息的同时,减小了参与计算的数据量。

将截取后的布里渊散射谱与理想 Lorentz 数据点作互相关卷积,结果如图 9(a)所示。再对某处的卷积数据进行洛伦兹拟合,结果如图 9(b)所示。由该图可知,将布里渊散射谱截取后再进行卷积,结果就具有十分理想的 Lorentz 分布。取卷积结果最大值两侧对称的 4 个点与最大值点共同参与 20 阶质心计算,提取结果与 LCF 结果的对比如图 9(c)所示。在拟合度良好的前 1 km 距离内,均方误差约为 3.58×10^{-6} 。图 9(d)所示为采用所提算法对 60 °C 与 30 °C 下布里渊散射谱特征提取结果的对比。由该图可知,60 °C、30 °C 和 22 °C 时的光纤局部平均 BFS 分别约为 10.8404 Hz、10.8357 Hz 和 10.8346 GHz,按照线性关系将前两者转换成对应的温差,结果约为 34.2 °C,测量误差在可接受范围内。此外,对于布里渊散射谱的二维数据矩阵,所提算法处理 1 行扫频数据,MATLAB 程序的平均运行时间在毫秒级以下,而 LCF 至少在秒级。可见,对于高分辨率的长距离测量,所提算法的处理时间极短,在实时性方面,其性能远优于传统谱分析方式。

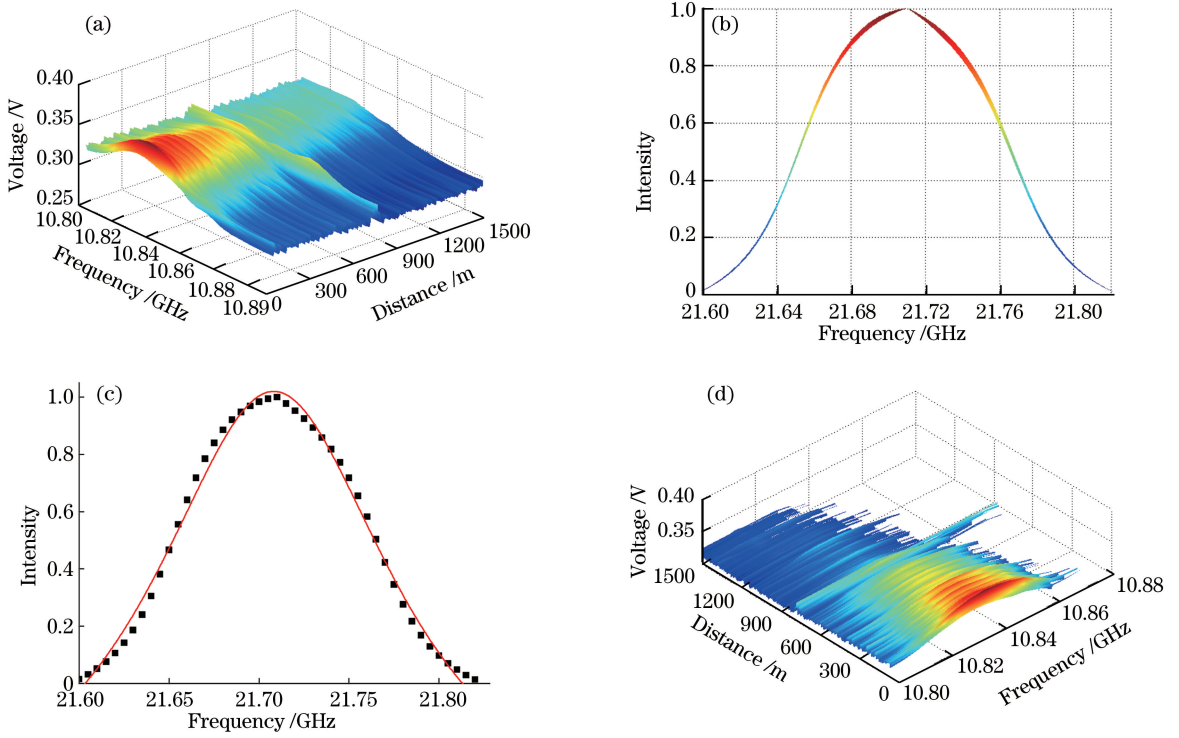


图 8 布里渊散射谱服从 Lorentz 线型不理想时的处理方式。

(a) 布里渊增益谱; (b) 互相关卷积结果; (c) LCF 结果; (d) 峰值对称截取后的布里渊增益谱

Fig. 8 Processing methods adopted with nonideal Brillouin gain spectrum. (a) Brillouin gain spectrum; (b) cross-correlation convolution result; (c) LCF result; (d) Brillouin gain spectrum after symmetric cutting

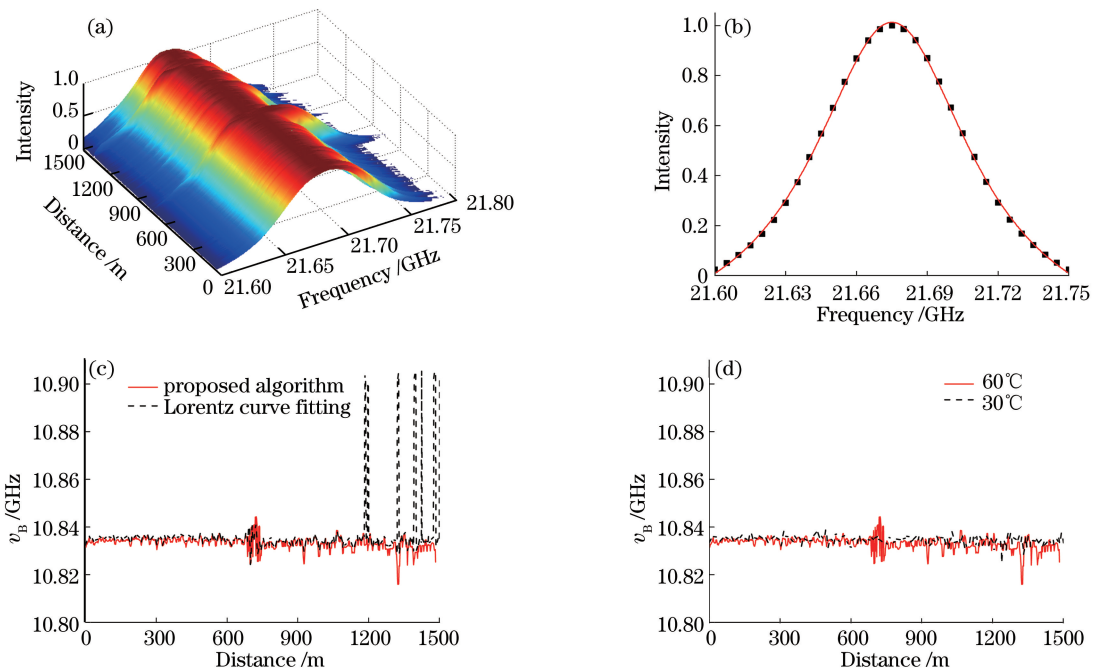


图 9 散射谱截取后的互相关卷积结果与高阶 BFS 提取。

(a) 互相关卷积结果; (b) 某位置的 LCF; (c) 2 种方式的提取结果对比; (d) 60 °C 和 30 °C 下的 BFS 计算结果对比

Fig. 9 Cross-correlation convolution results and high-order BFS extraction. (a) Cross-correlation convolution result; (b) LCF result; (c) comparison of extraction results of LCF and the proposed method; (d) comparison of calculated BFS at 60 °C and 30 °C

6 结 论

本文提出了基于互相关卷积的 BFS 高阶质心逼近算法,并搭建 1.5 km 瑞利 BOTDA 温度传感系统对算法进行了可行性验证。结果表明,所提算法具有良好的测量精度,可以快速提取光纤沿线的温度变化范围,能有效反映光纤的温度变化信息。该算法不仅没有传统拟合算法中测量结果对参数初始化和噪声非常敏感这一缺点,而且避免了迭代过程,实时性很好。当加大扫频间隔时,该算法比基于 LM 算法的 LCF 具有更小的测量误差,在长距离 BOTDA 的高分辨率测量中具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Horiguchi T, Tateda M. BOTDA-nondestructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: theory[J]. Journal of Lightwave Technology, 1989, 7(8): 1170-1176.
- [2] Li Yongqian, An Qi, Li Xiaojuan, *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.
- [3] 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.
- [4] Lu Y, Dou R, Zhang X. Wideband detection of spontaneous Brillouin scattering spectrum in Brillouin optical time-domain reflectometry[C]. SPIE, 2008, 7158: 715818.
- [5] Bernini R, Minardo A, Zeni L. Dynamic strain measurement in optical fibers by stimulated Brillouin scattering[J]. Optics Letters, 2009, 34(17): 2613-2615.
- [6] Voskoboinik A, Yilmaz O F, Willner A W, *et al.* Sweep-free distributed Brillouin time-domain analyzer (SF-BOTDA) [J]. Optics Express, 2011, 19(26): B842-B847.
- [7] Urricelqui J, Zornoza A, Sagues M, *et al.* Dynamic BOTDA measurements based on Brillouin phase-shift and RF demodulation[J]. Optics Express, 2012, 20(24): 26942-26949.
- [8] Zhang Y J, Yu C J, Fu X H, *et al.* An improved Levenberg-Marquardt algorithm for extracting the features of Brillouin scattering spectrum[J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(1): 015204.
- [9] Zhang Y J, Yu C J, Fu X H, *et al.* An improved Newton algorithm based on finite element analysis for extracting the Brillouin scattering spectrum features[J]. Measurement, 2014, 51: 310-314.
- [10] Takashi A, Takahiro K, Yoshitsugu T. On the exact steepest descent method: a new method for the description of Stokes curves[J]. Journal of Mathematical Physics, 2001, 42(8): 3691-3713.
- [11] Liu Yin, Zhang Yanjun, Li Da, *et al.* Hybrid algorithm particle swarm optimization and Levenberg-Marquardt for Brillouin scattering spectrum of distributed sensing systems[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0415001.
刘银, 张燕君, 李达, 等. 粒子群优化和拉凡格氏混合优化算法提取传感布里渊散射谱特征的方法[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0415001.
- [12] Xiao Shanghui, Li Li. New fitting method for Brillouin-based scattering spectrum of fiber-optic distributed sensing systems[J]. Optical Technique, 2009, 35(6): 897-900, 904.
肖尚辉, 李立. 一种新的光纤布里渊传感散射谱拟合方法[J]. 光学技术, 2009, 35(6): 897-900, 904.
- [13] 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.
- [14] Zhang Yanjun, Xu Jinrui, Fu Xinghu. Method of Brillouin scattering spectrum character extraction based on genetic algorithm and quantum-behaved particle swarm optimization hybrid algorithm[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(2): 0205002.
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): 0205002.
- [15] Ruiz-Lombera R, Mirapeix J, Laarossi I, *et al.* Brillouin frequency shift estimation in BOTDA via subpixel processing [C]. SPIE, 2016, 9916: 99162L.