

# 基于互相关-LM 法的布里渊峰值拟合算法

高树国<sup>1</sup>, 刘云鹏<sup>2</sup>, 李欢<sup>2</sup>, 田源<sup>2</sup>, 范晓舟<sup>2\*</sup>, 孙路<sup>1</sup>, 孟令明<sup>1</sup>

<sup>1</sup>国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021;

<sup>2</sup>华北电力大学, 河北 保定 071000

**摘要** 基于互相关法和 Levenberg-Marquardt(LM)算法,提出了互相关-LM 算法以拟合布里渊频谱的中心频率。此方法发挥互相关法无需给定初值且对噪声不敏感的优点,将其用来寻找迭代初值,得到精度较低结果作为初值输入 LM 算法中进行迭代,最终得出布里渊散射频谱的精确信息。同时提出了新的双峰布里渊谱的拟合方法和出现双峰时的布里渊峰值选择原则。此算法有效提高了拟合精度和拟合效率,使得单峰拟合误差在 1 MHz 以内,双峰拟合误差在 2 MHz 以内,拟合度达 0.9988。为了检验其实用性,将其应用于变压器绕组变形检测。对改造过的外表面敷设光纤的绕组施加两处应变,互相关-LM 算法能精确提取中心频率,解耦出应变信息,平行测试误差在 3 MHz 以内,拟合度可达 0.9964,均方根误差约 0.005,并能实现应变的精确定位,充分证明了此方法的优越性和实用性。

**关键词** 光纤光学; 布里渊散射; 互相关 Levenberg-Marquardt 法; 双峰拟合; 分布式光纤传感; 绕组变形检测

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.010602

## Brillouin Peak Fitting Algorithm Based on Correlation-LM Method

Gao Shuguo<sup>1</sup>, Liu Yunpeng<sup>2</sup>, Li Huan<sup>2</sup>, Tian Yuan<sup>2</sup>, Fan Xiaozhou<sup>2\*</sup>,  
Sun Lu<sup>1</sup>, Meng Lingming<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Electric Power Research Institute, State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei 050021, China;

<sup>2</sup>North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071000, China

**Abstract** Based on the correlation method and the Levenberg-Marquardt (LM) algorithm, this study proposes a correlation-LM algorithm for fitting the central frequency of the Brillouin spectrum. The proposed algorithm exploits the correlation method because it does not require an initial value and is insensitive to noise. Therefore, the correlation method is used to determine the iterative initial value. Inputting the initial value into the LM algorithm for iteration yields less-accurate results. Accurate information of the Brillouin scattering spectrum is finally obtained. Thus, overcoming the problem of iteration using the LM method is necessary as it has the disadvantage of being extremely sensitive to the initial value. Therefore, this study also proposes a new bimodal Brillouin spectrum fitting method and the Brillouin peak selection principle with double peaks. This algorithm can effectively improve the fitting accuracy and the fitting efficiency, making the single-peak fitting error within 1 MHz, the double-peak fitting error within 2 MHz, and the fitting degree to be 0.9988. To test the practicability of the algorithm, it is used to detect the transformer winding deformation. Two strains are applied to the modified winding. The correlation-LM algorithm could extract the central frequency accurately and decouple the strain information. The parallel test error is within 3 MHz, the fitting degree reaches 0.9964, and the strain is accurately located, thereby proving the superiority and practicality of this method.

**Key words** fiber optics; Brillouin scattering; correlation Levenberg-Marquardt method; bimodal fitting; distributed fiber sensing; winding deformation detection

**OCIS codes** 060.2310; 060.2370; 290.5830

收稿日期: 2018-05-21; 修回日期: 2018-06-23; 录用日期: 2018-07-18

基金项目: 国家电网总部科技项目(5204BB1600CQ)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(2016XS93,2017MS102)

\* E-mail: fxz@ncepu.edu.cn

## 1 引言

布里渊光时域反射技术(BOTDR)是最近十几年新兴的一项传感技术。其分布式测量、测量范围广和动态范围高等优点使得其在桥梁变形监测、铁路温度检测<sup>[1]</sup>等方面得到了广泛的应用。同时其绝缘性能好和电磁兼容性能优等优点,使得其在电力工业中的应用亦有光明前景。

BOTDR 技术的原理在于光纤中后向布里渊散射光的频谱峰值与温度和应变线性相关。通过拟合来提取布里渊频谱的特征参量是常用的方法,应用最多的是基于最小二乘原理的高斯-牛顿(GN)法、Levenberg-Marquardt(LM)和粒子群寻优(PSO)算法。其中 GN 法使用雅克比矩阵实现在函数梯度最大处下降,容易陷入局部最优解,文献[2]使用 GN 法配合传统法确定了迭代参数的初始值,在较高信噪比下取得了比较好的成果。LM 算法通过引入步长因子  $\mu$  实现了变步长的迭代,对初值的依赖性有所降低。文献[2]中还介绍了传统 LM 法,即直接从图形中得到初值,此方法在信噪比较高时可以达到较好效果,但是当信噪比较低时,噪声会使数值设定偏离正确值,从而使算法收敛到局部最优解。PSO 算法则通过随机初始化使粒子群遍历整个空间,随着粒子群规模的增大,陷入局部最优解的几率大大降低,但同时也会使运算效率下降<sup>[3]</sup>。在基本算法的基础上又发展出了如布谷鸟搜索-差分演化(CS-IDE)算法<sup>[4]</sup>和布谷鸟牛顿搜索(CNS)算法<sup>[5-6]</sup>等优化算法,但其原理大同小异。

除了进行最小二乘拟合,Horiguchi 等<sup>[7-8]</sup>提出利用二次函数拟合峰值中间区域并多次迭代从而达到较高精确度的二次拟合法,但其要求布里渊峰值严格对称,中心频率必须在区间的中心位置,这些条件限制了二次拟合法的应用。最大似然法<sup>[9]</sup>也是曲线参数估计中常用的方法,但精度不高,可以用来估计谱型参数的初值。相似度检测法<sup>[10]</sup>和互相关算法<sup>[11]</sup>无需进行拟合和迭代,可以提高运算效率。互相关法通过求取谱线与标准谱线的互相关系数来确定中心频率,文献[12]指出在低信噪比下,互相关法可以获得比传统 LM 法等最小二乘拟合更精确的结果,相似度检验法通过寻找待测谱线与已知中心频率的谱线族的最大相似度来确定中心频率,此方法需要提前存储或生成与布里渊频谱对应的标准曲线,这无疑增大了数据存储的压力。同时这两种方法精确度被采样频率限制。为提高精确度,文

献[13]进一步发展了互相关法,计算互相关曲线的高阶矩并提取质心,获得亚采样点的精确度。但是,通过对实验数据的拟合发现,在使用互相关法以及互相关质心法时,布里渊频谱的对称性会对结果造成一定的影响,而如何消除这种影响还没有一个公认可靠的方法。

本文结合互相关法和 LM 法,将互相关法无需设定初值的优点和 LM 法精确度高的优点相结合提出了一种新的布里渊频谱峰值拟合算法,即互相关-LM 法。该方法提高了算法的精确度和稳健性,并使用仿真数据和实验数据对其进行了校验和比较,发现其在拟合精度和收敛速度上均强于其他算法。

## 2 布里渊散射模型和拟合算法

在理想状况下,布里渊散射频谱符合洛伦兹函数<sup>[14]</sup>。但是在实际应用中,由于电光调制器消光比有限,在光脉冲发射的边缘处存在泄露光,同时光脉冲长度过短可能会导致声子激发不充分,这使得布里渊频谱由洛伦兹曲线向高斯曲线过渡。文献[15]提出了一种洛伦兹谱和高斯谱线性组合,即 Pseudo-Voigt 型谱作为布里渊频谱拟合的标准函数。在此基础上,文献[16-17]对这三种模型进行了详细推导和比较,证明了实际的布里渊频谱更接近 Pseudo-Voigt 型谱,即

$$g_b(\nu) = k \cdot g_0 \frac{(\Delta\nu_{bl}/2)^2}{(\nu - \nu_b)^2 + (\Delta\nu_{bl})^2} + (1 - k) \cdot g_0 \cdot \exp\left[-2.773 \left(\frac{\nu - \nu_b}{\Delta\nu_{bg}}\right)^2\right], \quad (1)$$

式中  $g_b(\nu)$  为布里渊散射谱,  $k$  为线性权重系数,  $g_0$  为最大布里渊增益,  $\nu_b$  为布里渊谱峰值频率,  $\Delta\nu_{bl}$ 、 $\Delta\nu_{bg}$  分别为洛伦兹谱和高斯谱的半峰全宽。

## 3 算法设计

### 3.1 数据预处理

图 1 为仪器实测的布里渊频谱数据,所有信号底部形状基本一致且非零,可见所有信号都可以看作一个仪器自身的固有信号和光纤后向反射谱的叠加。测量范围超出光纤后,光纤后向反射谱为零,仪器检测到的信号全部为仪器的固有信号,其值相对较为稳定(标准差仅为 0.02 MHz),且不随实验条件变化而变化,很容易从每条扫频曲线中去除。图 2 所示为经此处理前后的曲线对比,可见处理后的数据更符合 Pseudo-Voigt 型谱。去除仪器固有信号后,光纤范围之外的信号幅值已经降到了零值附近,

可以很明显地与光纤散射信号分离,从而提取整条光纤的后向散射谱,将无用数据删除,以提高运算效率和节约存储空间。布里渊散射谱的峰值与应变和

温度呈线性关系,所以各处曲线峰值高度并不一致。为了后续数据处理方便,将每一采样点的扫频曲线映射到[0,1]区间内。

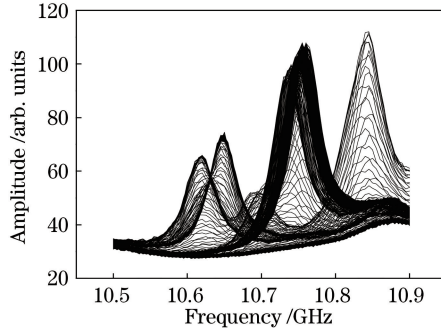


图1 原始布里渊频谱示意图

Fig. 1 Illustration of original Brillouin spectrum

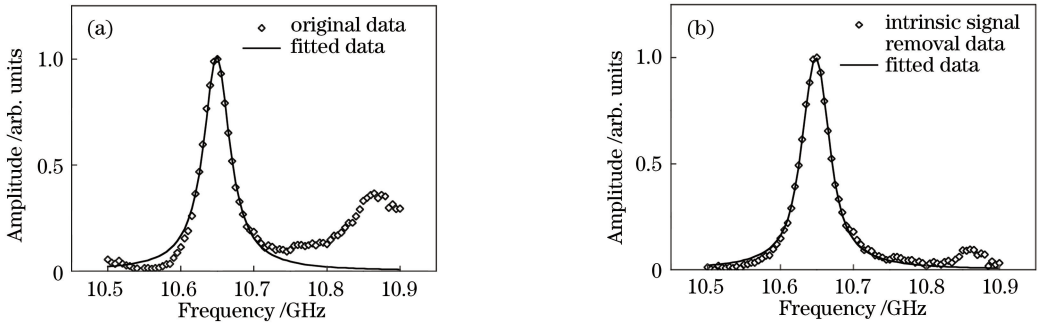


图2 互相关-LM法拟合。(a)未去除固有信号;(b)去除固有信号后

Fig. 2 Fitted by the cross-correlation-LM method. (a) Before and (b) after removing intrinsic signals

### 3.2 初值选取及迭代

首先生成标准曲线,标准曲线频率范围、频率间隔与测量数据一致,其中心频率为测量数据扫频范围的中心,洛伦兹谱宽等于预处理后的测量数据半峰处对应的频宽,洛伦兹谱和高斯谱的分配系数定义为1。将预处理后的数据与标准曲线进行互相关运算,所得结果设置一个阈值 $\lambda$ 来截断。根据实验结果令 $\lambda=0.15$ ,将互相关函数幅值小于阈值 $\lambda$ 的点置零,对截断后的有限长序列求取高阶矩并计算其质心,质心坐标为

$$\nu_{b0} = \frac{\sum_i \nu_i I_i^\gamma}{\sum_i I_i^\gamma}, \quad (2)$$

式中 $I_i$ 为归一化的互相关函数值在 $\nu_i$ 处的幅值, $\gamma$ 为设置的高阶矩阶次。在文献[13]中 $\gamma=60$ ,这样会使得除互相关函数峰值附近几个点外,其余点权值被置零,质心只受中心附近数个点的影响,其余点的信息被人为忽略。本文将阶数设置为 $\gamma=6$ ,以保证尽可能多的保留所有点的信息,同时赋予中心附近点较高的权值。经互相关质心法后估计得出的中

心频率值已比较接近真实的峰值,但其余参数误差仍较大。将 $\nu_{b0}$ 作为频率的初值,其他参数初值设置与互相关标准曲线参数相同,使用LM法进行迭代。在迭代过程中实时检查各参数范围,对发生越限的参数及时拉回正常范围内,以保证迭代收敛到所需的最值点。

### 3.3 双峰曲线处理

某一点处的布里渊散射谱是其BOTDR光脉冲宽度的1/2距离内所有散射谱的叠加<sup>[18]</sup>,如果光脉冲覆盖的范围内存在温度或应变突变点,突变点前后的布里渊频移分别对应突变点前后的温度和应变,由此附近的布里渊散射谱会产生双峰现象。此时如仍按单纯的互相关-LM法拟合,如图3(a)所示会造成较大误差。而之前的研究<sup>[9,18]</sup>对双峰拟合只是单纯的划分了峰值区间,对两个区间内分别拟合,这一方法忽略了双峰布里渊谱是两个单峰布里渊谱的叠加这一物理事实,把两个峰值简单地割裂开,这会造成峰值拟合的误差。文献[19]提出了混合蛙跳算法-最小二乘支持向量机(SFLA-LSSVM)算法来拟合双峰曲线,虽然拟合效果很好但是其运行时间过

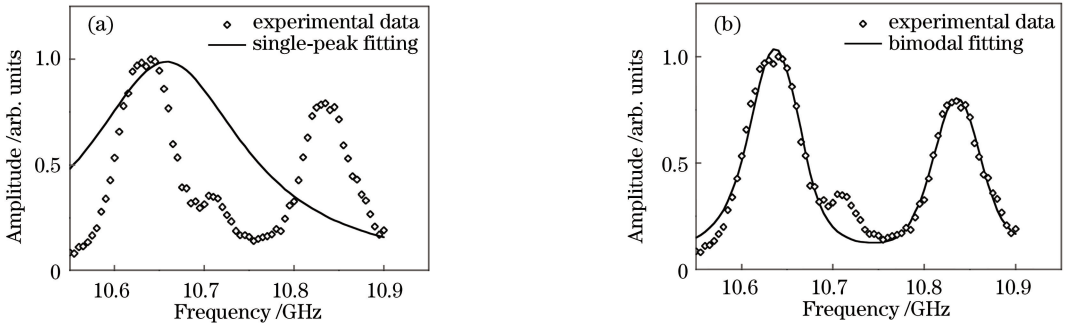


图3 双峰拟合示意图。(a)单纯互相关-LM法；(b)按多峰拟合算法

Fig. 3 Bimodal fitting. (a) Correlation-LM method; (b) bimodal fitting algorithm

长,效率较低。由此,本文提出了新的双峰拟合算法。

设待拟合数据为  $G(\nu)$ , 双峰模型可以表示为

$$g(\nu) = g_{b1}(\nu) + g_{b2}(\nu), \quad (3)$$

$$g_{b1}(\nu) = k_1 \cdot g_{o1} \frac{(\Delta\nu_{bl1}/2)^2}{(\nu - \nu_{bl1})^2 + (\Delta\nu_{bl1})^2} + (1 - k_1) \cdot g_{o1} \cdot \exp\left[-2.773 \left(\frac{\nu - \nu_{bl1}}{\Delta\nu_{bg1}}\right)^2\right], \quad (4)$$

$$g_{b2}(\nu) = k_2 \cdot g_{o2} \frac{(\Delta\nu_{bl2}/2)^2}{(\nu - \nu_{bl2})^2 + (\Delta\nu_{bl2})^2} + (1 - k_2) \cdot g_{o2} \cdot \exp\left[-2.773 \left(\frac{\nu - \nu_{bl2}}{\Delta\nu_{bg2}}\right)^2\right]. \quad (5)$$

具体拟合过程为

1) 使用移动平均法对待拟合数据  $G(\nu)$  进行平滑处理。

2) 通过一阶和二阶差分配合,找出曲线的驻点和其中的峰值点,并配合峰值高度检测,将不同峰值区间划分开来,两个峰值区间数据分别记为  $G_1(\nu_1)$ 、 $G_2(\nu_2)$ , 所对应的频率范围记为  $\nu_1$ 、 $\nu_2$ , 其中  $G_1(\nu_1)$  为峰值最高的区间;对  $G_1(\nu_1)$  进行互相关-LM 拟合,拟合结果记为  $g_1(\nu)$ 。

3) 由前分析,另一峰值信号应为  $G(\nu) - g_1(\nu)$ , 对此信号采取互相关-LM 算法进行拟合,拟合结果记为  $g_2(\nu)$ , 但是在  $g_1(\nu)$  拟合过程中,实际待拟合信号  $G_1(\nu_1)$  中叠加了  $G_2(\nu_1)$  这一信号,为了去除这一影响,对  $G(\nu) - g_2(\nu)$  进行拟合。

4) 按此方法多次迭代,直至曲线拟合误差(本文中取均方误差)小于设定的  $\epsilon$  阈值,此时  $g_1(\nu)$ 、 $g_2(\nu)$  的参数即为最后拟合结果。

## 4 数据分析

### 4.1 仿真数据分析

按照真实实验数据,扫频范围设置为 10.6 ~ 10.9 GHz,扫频间隔为 0.005 GHz,中心频率分别设

为 10.7, 10.75, 10.8 GHz, 布里渊半峰全宽根据经验值设为 0.06 GHz, 信噪比为 25 dB, 使用标准布里渊谱生成 3 组仿真数据, 使用 PSO 法、传统 LM 法、互相关法和互相关-LM 法分别进行拟合。图 4 为中心频率为 10.75 GHz 时的拟合对比图。

可以看出,互相关-LM 法能准确地拟合峰值。PSO 算法当粒子群规模较小时,可能会发生收敛到局部最优解的情况,但粒子群规模的增加又会导致运算时间大幅增长,效率降低。传统 LM 法易受初值设置的影响,如初值距离真实值较远,则其容易收敛至局部最优解,这种情况在信噪比较低或实验曲线并非标准的 Pseudo-Voigt 型谱或测量有一定误差时尤为明显。互相关法一般能较准确拟合中心频率,受噪声影响也较小,但问题在于其对谱宽和峰值的拟合误差较大。此问题也同样存在于传统 LM 法和 PSO 法拟合过程中,而谱宽和峰值通常包含了必要的信息,比如声子激发程度、激光器消光比以及部分的应变和温度信息等。同时,其精确度受到质心计算时阶数和进行计算的数据点数影响,这些数值的确定受经验影响较为明显,使得其实用性降低,如图 4(d) 所示,互相关拟合中心频率就出现了一定的偏移。

表 1 所示为 4 种算法对应的评价指标的比较,分别为中心频率拟合值、频率偏差、均方误差和运行时间,通过表 1 也可得出相同的结论,互相关-LM 算法有效提高了拟合的精度,同时保持了良好的运算效率。同时还可以看到,对于传统 LM 法,虽然其峰值拟合精度与互相关-LM 法相似,但其均方误差要高出一个数量级。当峰值不在扫频范围中心时,PSO 法和互相关法中心频率拟合精度都会出现不同程度下降,互相关法虽然中心频率误差较小,但其拟合均方误差要比互相关-LM 法高出近 10 倍,说明其拟合精度还无法与之相比。互相关法的另一

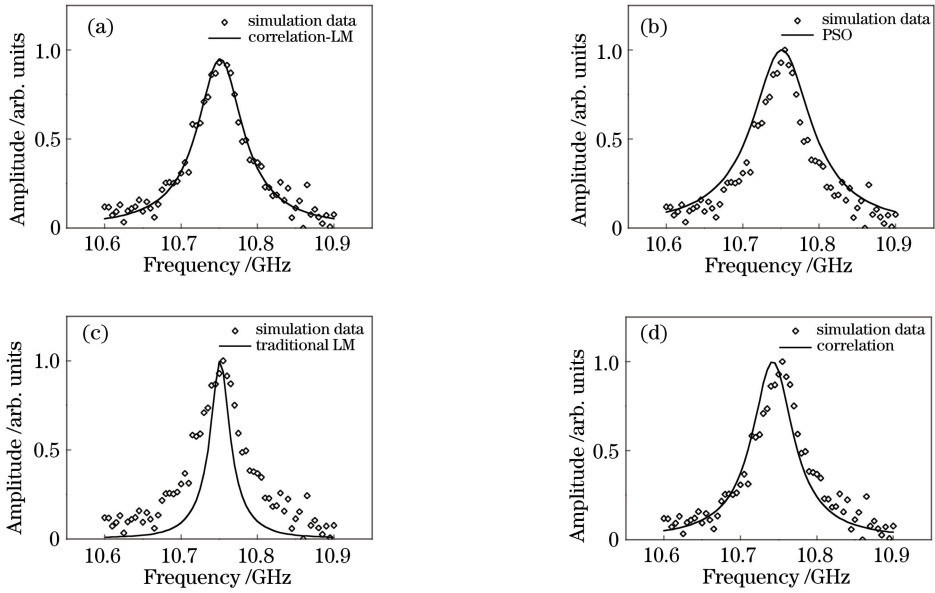


图 4 中心频率为 10.75 GHz 时不同算法的拟合仿真数据比较。  
Fig. 4 Comparison of different algorithms for fitting simulation data with the central frequency 10.75 GHz.

(a) Correlation-LM method; (b) PSO method; (c) traditional LM method; (d) correlation method

表 1 不同中心频率下拟合算法评价指标比较

Table 1 Comparison of evaluation index of different fitting algorithm at different central frequencies

10.70 GHz/25 dB				
Fitting method	Central frequency /GHz	Frequency deviation /GHz	Mean square error /GHz	Runtime /s
Traditional LM method	10.7003	+0.0003	0.0393	0.0215
PSO method	10.7011	+0.0011	0.0265	0.0790
Correlation method	10.6998	-0.0002	0.0051	0.0249
Correlation-LM	10.7003	+0.0003	0.0037	0.0205
10.75 GHz/25 dB				
Fitting method	Central frequency /GHz	Frequency deviation /GHz	Mean square error /GHz	Runtime /s
Traditional LM method	10.7513	+0.0013	0.0352	0.0843
PSO method	10.7511	+0.0011	0.0128	0.0763
Correlation method	10.7423	-0.0077	0.0102	0.0264
Correlation-LM	10.7510	+0.0010	0.0032	0.0188
10.80 GHz/25 dB				
Fitting method	Central frequency /GHz	Frequency deviation /GHz	Mean square error /GHz	Runtime /s
Traditional LM method	10.7999	-0.0001	0.0415	0.0222
PSO method	10.7984	-0.0016	0.0303	0.0814
Correlation method	10.8029	+0.0029	0.0084	0.0228
Correlation-LM	10.7999	-0.0001	0.0057	0.0170

问题在于截断阈值的选择,如选择不合适,频率拟合会出现较大的误差,这一问题的原因主要在于实验中测得的布里渊谱不一定完全对称,这会造成质心的偏移。

在较低信噪比条件下互相关-LM 算法仍取得

了较好的结果,因为其吸收了互相关法对噪声低敏感度的优点,同时在高信噪比下,频率估计误差几乎可以忽略,说明此方法不存在系统误差。在较低信噪比(15 dB)条件下,其误差亦在 1 MHz 之内,对应温度误差为  $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ ,应变误差为  $\pm 20.83\text{ }\mu\epsilon$ ,误差远

小于其他 3 种方法。

对双峰算法,仿真得到了数十组双峰实验数据,采用与实验数据相似的参数,主峰峰值设定为 10.75 GHz,布里渊半峰谱宽为 0.06 GHz,信噪比 30 dB。使用双峰互相关-LM 算法进行拟合,分别对两峰值之间距离和两峰值高度比与拟合精确度之间关系进行了研究。双峰拟合峰值误差在

0.002 GHz 以内时,则认为双峰可以被分辨。通过仿真数据的分析,在布里渊半峰全宽为 0.06 GHz 时,使用双峰互相关-LM 算法较难分辨峰值高度小于主峰值 0.15 倍的第二峰值,而对峰值高度大于主峰值 0.15 倍的双峰曲线,最小分辨频率差为 0.07 GHz。当布里渊谱展宽即半峰全宽增大时,最小分辨频率会进一步下降。

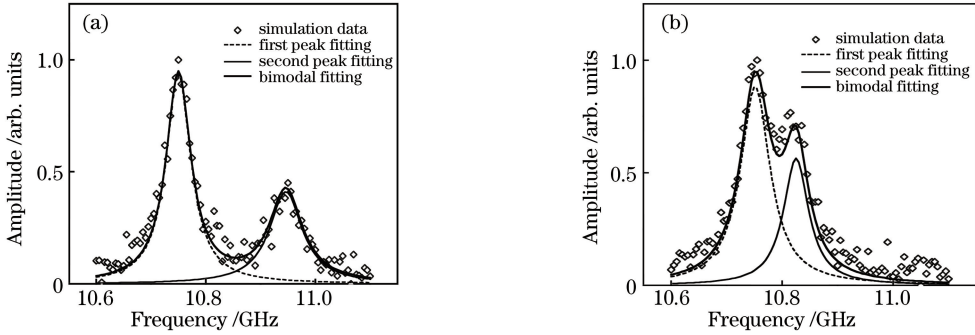


图 5 双峰拟合示意图。(a)双峰相距 0.2 GHz,次峰高度为 0.4;(b)双峰相距 0.075 GHz,次峰高度为 0.7  
Fig. 5 Schematic of bimodal fitting. (a) Bimodal distance 0.2 GHz, second peak height of 0.4;  
(b) bimodal distance 0.075 GHz, second peak height of 0.7

#### 4.2 实验数据分析

为了检验此算法实际效果,将其应用在变压器绕组的变形检测中。在保定市天威保变集团的协助下,对变压器绕组进行了改造。根据之前研究<sup>[20]</sup>,乙烯四氟乙烯共聚物(ETFE)紧套光纤对于油纸绝缘兼容性最好,其稳定性足以应付变压器内部复杂环境。所以本实验铺设光纤采用 ETFE 紧套光纤。如图 6 所示沿着铝导线外表面铺设传感光纤,再用此导线绕制了 40 饼,每饼 5 匝共 200 匝的绕组,同时在绕组的首尾两端各保留了数十米松弛光纤作为参考光纤,整体系统光路图如图 7 所示。使用威海北洋光电信息技术股份公司分布式光纤应力监控系统对铺设的光纤进行 BOTDR 测试。测试参数如下:采样分辨率为 0.2 m,脉宽为 50 ns,平均次数为  $2^{13}$ 。



图 6 改造变压器绕组  
Fig. 6 Adapted transformer windings

部分的光纤后向布里渊散射谱使用 4 种不同算法进行特征提取,拟合曲线如图 8 所示。互相关-LM 算法结合双峰拟合算法可以准确拟合出布里渊频谱的峰值,拟合度明显高于其他算法。其他算法在实验数据拟合中对谱宽等参数拟合误差尤为明显。

经过数据预处理去除仪器固有信号后,对绕组

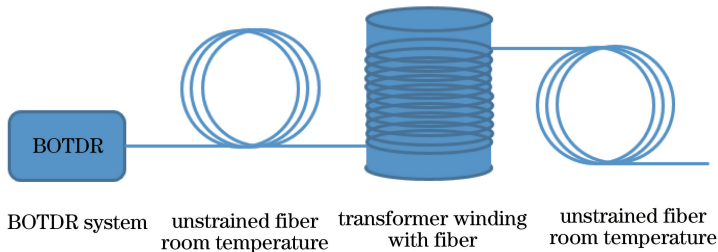


图 7 变压器绕组变形检测光路图

Fig. 7 Optical diagram of transformer winding deformation detection

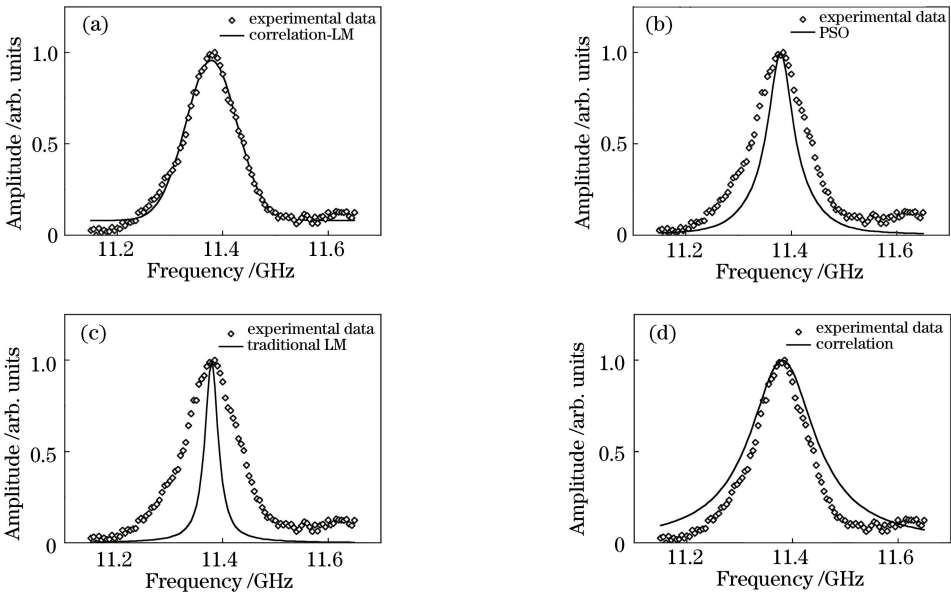


图 8 实验数据拟合比较图。(a)互相关-LM法;(b) PSO法;(c)传统 LM法;(d)互相关法  
Fig. 8 Comparison of experimental data fitting. (a) Correlation-LM method; (b) PSO method;  
(c) traditional LM method; (d) correlation method

经过对实验数据的对比分析,还提出了布里渊频谱峰值的处理原则,即布里渊频谱只有单一峰值的区间,每一点处布里渊中心频率即为最终结果。对出现双峰的区间,考虑到 BOTDR 每一采样点反映的是单一光脉冲长度内(一般为 1~5 m)的温度应变情况的共同作用,一般不会发生突变,且变压器绕组具有一定刚性,可以近似为样条曲线。因此,以双峰区间两侧确定的频率为给定点进行样条曲线插值,选取双峰中频率与此样条曲线更为接近的峰值作为最终结果。

图 9 为整条绕组中心频率曲线。由于实验室在测量时保持恒温,中心频率只与应变值有关。此时绕组尚未发生变形,但在绕制过程中对光纤施加的预应力并不均匀,这使得原始曲线并不平整。同时由于光纤铺设于绕组外表面,受到的预应力较大,所以初始布里渊中心频率较高,约为 11.4 GHz。通过多次测量结果比较,平行测量结果之间误差在 3 MHz以内。

在实验室内对此改造过的绕组第 5 饼和第 10 饼分别施加了外凸应变,再次对光纤进行 BOTDR 测试,得到了图 10 中的变形后中心频率曲线,与原始中心频率对比后可以发现,在 50~75 m 和 120~150 m 范围内,曲线形状出现明显变化,其位置显示了绕组变形的位。而在无应变区域,曲线重合性很好。和其他算法比较之后,互相关-LM 算法结合 BOTDR 技术可以对绕组变形实现更准确的监测。

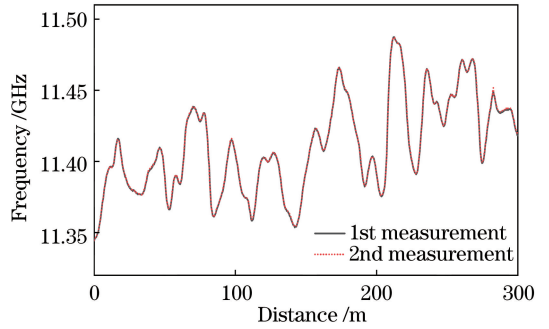


图 9 原始绕组布里渊中心频率  
Fig. 9 Brillouin central frequency of original winding

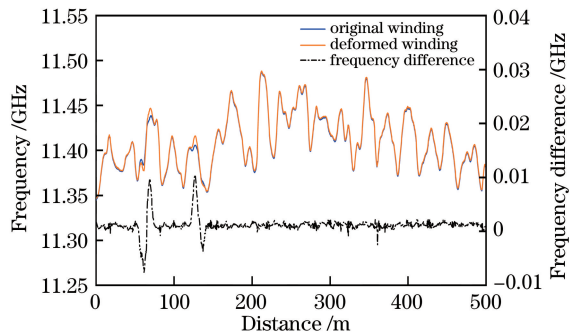


图 10 绕组变形后布里渊中心频率与原始对比  
Fig. 10 Comparison of the Brillouin central frequency between the deformed and original winding

## 5 结 论

分布式光纤传感是近年新兴的一种传感方式, BOTDR 技术就是其中一种。与传统传感器相比,

其分布式测量、耐高温和电磁兼容性能好等优点使得其在电力行业有着光明的应用前景。为了进一步提高 BOTDR 的精度,通过对现有布里渊峰值提取算法的分析和综合,结合互相关法与初值选取无关、对噪声水平不敏感和 LM 法精度高的优点,提出了互相关-LM 算法。此算法使用互相关法确定初值,再代入 LM 法拟合 Pseudo-Voigt 型谱。经过与布里渊拟合常用的传统 LM 法、PSO 法、互相关法对比,新算法在拟合精度和拟合时间上都优于现有算法,并且其在低信噪比下的优异表现使得其能以更高速度进行监测。同时提出了新的双峰拟合算法,使用拟合-迭代的方式分离两个峰值,使双峰拟合更符合物理模型。使用这一算法,可以准确分辨次峰峰值高度在主峰值 0.15 以上,两峰之间间隔 0.07 GHz 的双峰谱,拟合误差在 0.002 GHz 以内。

为了检验新算法的实际效果,使用保定市天威保变集团改造的铺设传感光纤的变压器绕组进行了实验,分别对原始绕组和人为施加应变后的变形绕组进行 BOTDR 测试,使用互相关-LM 法拟合仪器输出的布里渊散射谱,平行实验间误差在 3 MHz 以内,重复性和准确性都满足了测量要求。通过比较原始绕组和变形后绕组的布里渊中心频率曲线,可以明显看到应变部位布里渊中心频率的改变,并且位置与绕组实际变形位置相符,证明了 BOTDR 技术联合互相关-LM 算法足以准确判断变压器绕组的健康状况,也说明此算法具有较好的应用前景。

### 参 考 文 献

- [1] Cao Y L, Ye Q, Cai H W. On-line temperature monitoring in railway existing fiber cable based on Brillouin optical Time-domain reflectometry [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(8): 080602.  
曹玉龙, 叶青, 蔡海文. 基于布里渊光时域反射计的铁路既有光缆在线温度监测[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(8): 080602.
- [2] 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.
- [3] Li D. The key signal processing technology of BOTDR distributed sensing systems [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2013: 25-30.

李达. BOTDR 分布式光纤传感信号处理关键技术研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2013: 25-30.

- [4] Yu C J. Research on high accuracy extraction of BOTDR distributed sensor signal[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2015: 25-42.  
宇春娟. BOTDR 分布式光纤传感信号高精度提取研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015: 25-42.
- [5] 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.  
张燕君, 刘文哲, 付兴虎, 等. 基于 TTDF 和 CNS 算法的多路 BOTDR 散射谱信息高精度分析研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(7): 1802-1807.
- [6] Zhang Y J, Liu W Z, Fu X H, *et al.* A Brillouin scattering spectrum feature extraction based on flies optimization algorithm with adaptive mutation and generalized regression neural network [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(10): 2916-2923.  
张燕君, 刘文哲, 付兴虎, 等. 基于自适应变异果蝇优化算法和广义回归神经网络的布里渊散射谱特征提取[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(10): 2916-2923.
- [7] Horiguchi T, Shimizu K, Kurashima T, *et al.* Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, 13(7): 1296-1302.
- [8] Zheng HR, Fang Z J, Wang Z Y, *et al.* Brillouin frequency shift of fiber distributed sensors extracted from noisy signals by quadratic fitting[J]. *Sensors*, 2018, 18(2): 409.
- [9] Liang H, Zhang X P, Li X H, *et al.* Design and implementation of data fitting algorithm for Brillouin back scattered-light spectrum data [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(4): 875-879.  
梁浩, 张旭苹, 李新华, 等. 布里渊背向散射光谱数据拟合算法设计与实现[J]. *光子学报*, 2009, 38(4): 875-879.
- [10] Wang F, Zhan W W, Lu Y G, *et al.* Determining the change of Brillouin frequency shift by using the similarity matching method[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(19): 4101-4108.
- [11] Farahani M A, Castillo-Guerra E, Colpitts B G. Accurate estimation of Brillouin frequency shift in Brillouin optical time domain analysis sensors using cross correlation[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(21):



4275-4277.

- [12] 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.
- [13] 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): 1106011.  
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): 1106011.
- [14] Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics* [M]. Heidelberg: Springer, 2000: 195-211.
- [15] Xiao S H, Li L. Analytical model of Brillouin scattering spectrum measurements in fibre-optic distributed sensing systems[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2009, 44(6): 946-950.  
肖尚辉, 李立. 光纤分布式布里渊传感散射谱数据分析模型[J]. *西南交通大学学报*, 2009, 44(6): 946-950.
- [16] Xiao S H, New fitting method for Brillouin-based scattering spectrum of fibre-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.
- [16] Xiao S H, Li L. New fitting method for Brillouin-based scattering spectrum of fibre-optic distributed sensing systems [J]. *Optical Technique*, 2009, 35(6): 897-900, 904.
- [17] Ida T, Ando M, Toraya H. Extended pseudo-voigt function for approximating the voigt profile [J]. *Journal of Applied Crystallography*, 2000, 33(6): 1311-1316.
- [18] Jia W. The multi-peak spectrum feature extraction technology research of BOTDR distributed optical sensing systems [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2015: 18-31.  
贾伟. BOTDR 分布式光纤传感系统多峰谱特征提取技术研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015: 18-31.
- [19] Zhang Y J, Jin P J, Fu X H *et al.* Feature extraction of multi-peak Brillouin scattering spectrum based on SFLA-LSSVM algorithm [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(1): 0106004.  
张燕君, 金培俊, 付兴虎, 等. 基于 SFLA-LSSVM 算法的多峰 Brillouin 散射谱的特征提取 [J]. *中国激光*, 2018, 45(1): 0106004.
- [20] Liu Y P, Tian Y, Jiang S, *et al.* Effect of optical fiber sheath on thermal ageing characteristics of transformer oil [J]. *Insulating Materials*, 2017, 50(12): 54-59.  
刘云鹏, 田源, 姜烁, 等. 光纤护套材料对变压器油热老化特性影响研究 [J]. *绝缘材料*, 2017, 50(12): 54-59.