

引用本文:王勇,马迅,贾旭超,等.面向变压器绕组复合光纤状态监测的 BOTDR 扫频策略研究[J].光通信技术,2024,48(6):68-74.

面向变压器绕组复合光纤状态监测的 BOTDR 扫频策略研究

王勇¹,马迅¹,贾旭超¹,刘凯¹,陈永辉²

(1.国网河北省电力有限公司 营销服务中心,石家庄 050035;2.华北电力大学 电子与通信工程系,河北 保定 071003)

摘要:为提高布里渊光时域反射计(BOTDR)在变压器绕组复合光纤状态监测中的准确性,提出了一种 BOTDR 扫频范围选择策略。该策略通过仿真生成了具有不同信噪比、扫频范围和扫频不对称系数的布里渊谱,并采用伪 Voigt 模型谱拟合算法来计算布里渊频移;同时,研究了信噪比、扫频范围和扫频不对称系数这 3 个因素对布里渊频移提取准确性的影响规律。实验结果表明:当扫频范围围绕布里渊频移对称时,误差达到最小;在扫频点数固定的情况下,随着扫频范围的增大,频移误差先减小后增大,当扫频范围比布里渊频移变化幅值大一个线宽时,误差达到最小值。

关键词:变压器;光纤;布里渊光时域反射计;温度和应变;扫频范围;布里渊频移

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)06-0068-07

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.06.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on BOTDR scanning strategy for transformer winding composite fiber state monitoring

WANG Yong¹, MA Xun¹, JIA Xuchao¹, LIU Kai¹, CHEN Yonghui²

(1. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Marketing Service Center, Shijiazhuang 050035, China;

2. Department of Electronics & Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding Hebei 071003, China)

Abstract: To improve the accuracy of Brillouin optical time domain reflectometry (BOTDR) in monitoring the state of transformer winding composite optical fibers, a BOTDR sweep range selection strategy is proposed. This strategy generates Brillouin spectra with different signal-to-noise ratios, sweep frequency ranges, and sweep frequency asymmetry coefficients through simulation, and uses the pseudo Voigt model spectral fitting algorithm to calculate the Brillouin frequency shift. Meanwhile, the influence of three factors, namely signal-to-noise ratio, sweep frequency range, and sweep frequency asymmetry coefficient, on the accuracy of Brillouin frequency shift extraction is studied. The experimental results show that when the scanning range is symmetrical around the Brillouin frequency shift, the error reaches its minimum. In the case of a fixed number of sweep frequency points, as the sweep frequency range increases, the frequency shift error first decreases and then increases. When the sweep frequency range is one linewidth larger than the amplitude of the Brillouin frequency shift change, the error reaches its minimum value.

Key words: transformer, optical fiber, Brillouin optical time-domain reflectometry, temperature and strain, frequency scanning range, Brillouin frequency shift

0 引言

电力变压器作为输变电系统中不可或缺的关键

收稿日期:2024-04-09。

基金项目:河北省自然科学基金项目(批准号:E2020502010)资助;中央高校基本科研业务费项目(批准号:2019MS090)资助。

作者简介:王勇(1982—),男,本科,高级工程师,研究方向为用电安全、反窃电及电气设备在线监测技术。主持/参与了国网公司科技项目和河北省科技厅科技项目各 1 项,获得技术创新奖励 1 项,发表论文 7 篇,其中 EI 检索论文 1 篇、中文核心期刊 3 篇,申请发明专利 6 项,其中授权专利 1 项。



设备,其价格昂贵且内部绝缘采用了无法自我修复的绝缘纸材料。因此,一旦绝缘纸发生击穿,不仅会引发长时间的停电事故,还会产生高昂的维修费用。由此可见,确保变压器的安全运行对于整个电力系统的稳定运行具有至关重要的意义。

绕组是变压器中故障易发的元件之一,其常见缺陷包括温升^[1-2]和变形^[3-4]等,这些缺陷通常表现在温度和应变的变化。因此,对绕组的温度和应变进行监测是非常必要的。早期的监测方法采用了热电阻与热电偶这类点式传感器^[5]来测量绕组的温度及应变情况。

然而,该方法易受电磁干扰影响,加之绕组较长,且所需点式传感器的数量较多,这不仅对系统性能构成了挑战,还加重了成本负担。相比之下,光纤布喇格光栅(FBG)传感器^[6-7]不仅具有体积小、抗电磁干扰能力强、耐高温以及良好的电气绝缘性等优点,还能够支持准分布式测量。但是,目前为了实现多点传感而常用的法兰盘连接方式存在显著的信号衰减问题,同时过多的光栅会增加解调的复杂度。而基于布里渊光时域反射计(BOTDR)^[8-9]的分布式光纤传感技术能够一次性获得整段光纤沿线的温度或应变数据,有效地解决了点式传感器所面临的多种问题,在绕组温度和应变监测领域展现出了广阔的应用前景。针对这些领域,人们已经从建模^[10]、故障模式识别^[11]等多个角度开展了大量研究。然而,绕组复合光纤易受温度波动和形变的影响,会导致光纤沿线布里渊频移发生变化。如果扫频范围选择不当,可能会引入显著的测量误差。目前,尚未有公开文献报道关于解决此问题的方法。为此,本文提出一种BOTDR的扫频范围选择策略。

1 布里渊谱模型及谱拟合算法

当入射到光纤中的光为方波时,布里渊谱近似满足式(1)所示的伪 Voigt 模型^[12-13]。

$$g_B(v) = g_1 \frac{(\Delta v_B/2)^2}{(v-v_B)^2 + (\Delta v_B/2)^2} + g_2 e^{-\frac{(4\ln 2)(v-v_B)^2}{(\Delta v_B)^2}} \quad (1)$$

其中, g_B 为布里渊增益, v 为频率, v_B 为布里渊频移, Δv_B 为布里渊线宽, g_1 和 g_2 分别为洛伦兹和高斯曲线布里渊增益峰值。

由于温度和应变与布里渊频移存在线性关系^[14-15],且布里渊频移具有较高的稳定性,因此它常被用作解调温度和应变的手段。一旦这种关系被精确建立,后续的关键问题便转化为如何通过测量得到的布里渊频移准确推导出对应的温度和应变值。谱拟合算法通过假设布里渊谱遵循特定模型,最小化实测布里渊增益与模型预测值间差异的平方和,来确定最优的谱模型参数集,从而获得布里渊频移的精确值。

鉴于伪 Voigt 模型在逼近布里渊谱方面的卓越性能,本文选择基于伪 Voigt 模型的谱拟合算法来实现这一过程^[16],其目标函数如式(2)所示。

$$E = \sum_{i=0}^{N-1} [g_B(v_i) - g_{B,i}]^2 \quad (2)$$

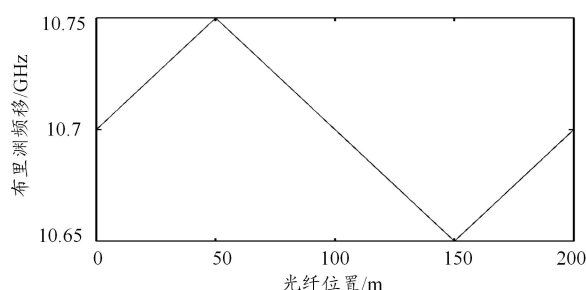
其中, E 为误差的平方和, v_i 为第 i 个扫描频率值, $g_{B,i}$ 为第 i 个扫描频率点测量得到的布里渊增益。

2 BOTDR 扫频范围选择策略的仿真实验

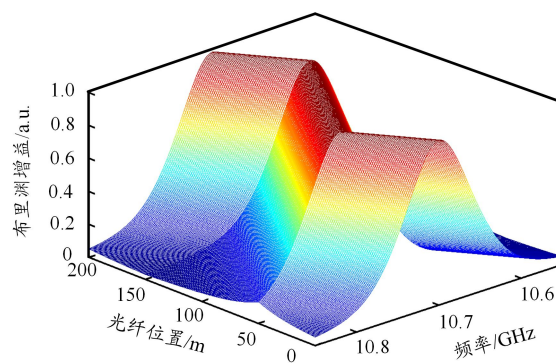
2.1 布里渊谱及布里渊频移仿真

在变压器运行过程中,复合于绕组中的光纤可能会经历几十度的温升^[17]。同时,绕组还可能发生变形^[17],导致几百微应变($\mu\varepsilon$)的应变产生。考虑到普通单模光纤的温度敏感系数约为 $1.12 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$,应变敏感系数约为 $0.048 2 \text{ MHz}/\mu\varepsilon$,可以推断出绕组复合光纤上的布里渊频移变化幅度可能达到几十到上百兆赫兹(MHz)。

为了模拟上述情况,本文首先设定光纤沿线的布里渊频移如图 1(a)所示。可以看出,光纤沿线的布里渊频移存在显著波动,这能够很好地反映真实变压器中绕组温度变化及变形对复合光纤布里渊频移的影响。布里渊谱的可靠性为后续研究的深入展开奠定了坚实的基础。随后,使用伪 Voigt 模型生成布里渊谱,设置线宽为 100 MHz ,参数 g_1 和 g_2 均设定为 0.5 ,扫频间隔设为 1 MHz 。实验中使用的光纤长度为 200 m ,测量分辨率为 1 m ,即每隔 1 m 的光纤段对应一个布里渊谱。起始频率定为 10.65 GHz ,终止频率为 10.75 GHz 。此外,对布里渊谱分别施加了信噪比为 10 、 20 、 30 dB 的高斯白噪声。不含噪声的三维布里渊谱如图 1(b)所示。可以清晰地看到光纤不同位置的布里渊频移及布里渊谱。



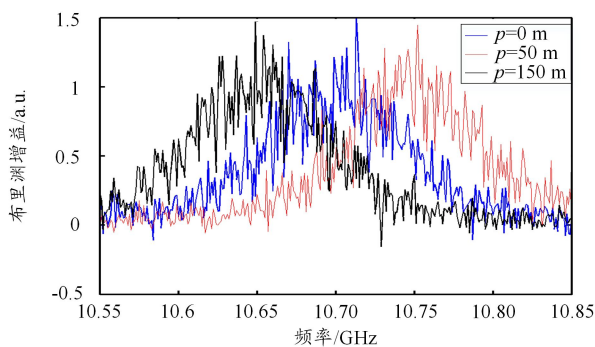
(a) 光纤沿线的布里渊频移



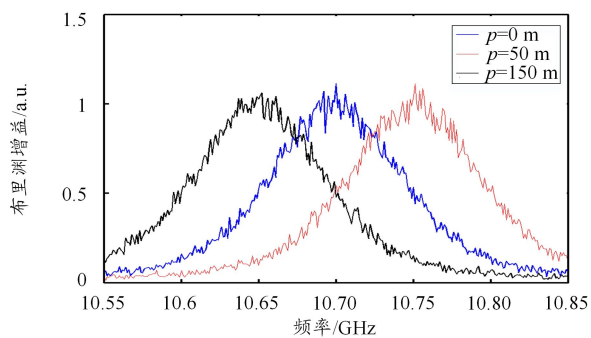
(b) 三维布里渊谱

图 1 光纤沿线的布里渊频移及三维布里渊谱

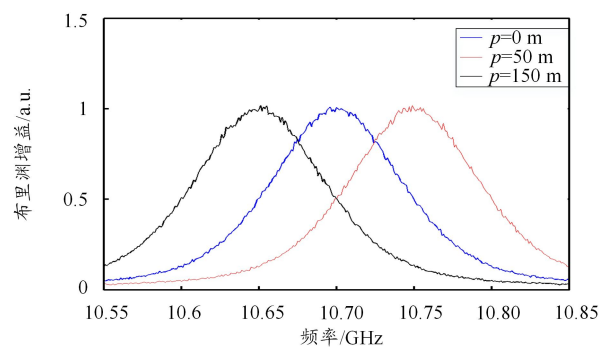
为了进一步验证所确定的扫频范围的合理性, 本文在光纤的不同位置 p (距光纤首端 0、50、150 m 处) 进行了测试。不同信噪比条件下的光纤布里渊谱如图 2 所示。可以看出, 不同信噪比下的布里渊谱能够有效地模拟实际应用中不同叠加平均次数产生的效果。此外, 不同位置布里渊谱对应的布里渊频移也与图 1(a) 的设定值吻合, 验证了结果的合理性。



(a) 信噪比为 10 dB



(b) 信噪比为 20 dB



(c) 信噪比为 30 dB

图 2 不同位置在不同信噪比时的光纤布里渊谱

2.2 扫频范围对称性的影响

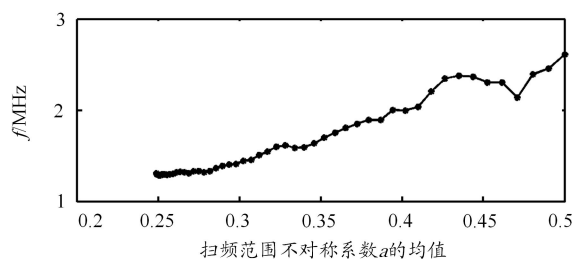
为模拟不同扫频范围对称性, 频率扫频范围设定为 $[10.6 \text{ GHz} + \Delta f, 10.8 \text{ GHz} + \Delta f]$, 其中 Δf 是频率改变量, 在 0~100 MHz 内变化, 步长为 1 MHz。其它参数与 2.1 节一致。定义扫频范围不对称系数 a 表征扫频范围

的不对称程度, 其表达式为

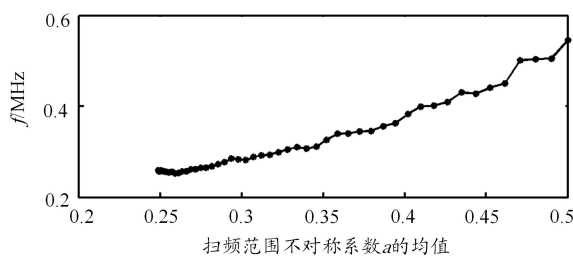
$$a = \Delta f_1 / \Delta v_B \quad (3)$$

其中, Δf_1 为扫频范围的中心频率与布里渊频移的差距。由于光纤上各点的布里渊频移不同, 对应的 a 也会有所不同, 故本文中 a 的均值是整根光纤上 a 的平均值。本文采用第 1 节中基于伪 Voigt 模型的谱拟合算法来计算布里渊频移。在上述 Δf 的取值范围内, a 的均值变化范围为 0.248 8~0.5。不同信噪比下, 布里渊频移误差幅值的均值 f 与扫频范围不对称系数 a 的均值的关系如图 3 所示。可以看出, 随着 a 的均值增大, 误差也随之增大。

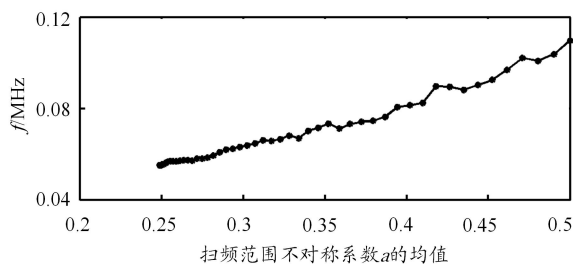
当信噪比为 20 dB 时, 典型不对称系数下光纤沿线的布里渊频移误差幅值的均值 f 的变化情况如图 4 所示。可以看出, 随着 a 的均值的增大, 误差也呈现出增大的趋势, 这与图 3 的结果相吻合。这是因为在 a 的均值增大的情况下, 频率扫频范围逐渐变得不对称,



(a) 信噪比为 10 dB



(b) 信噪比为 20 dB



(c) 信噪比为 30 dB

图 3 不同信噪比下, 布里渊频移误差幅值的均值与扫频范围不对称系数均值的关系

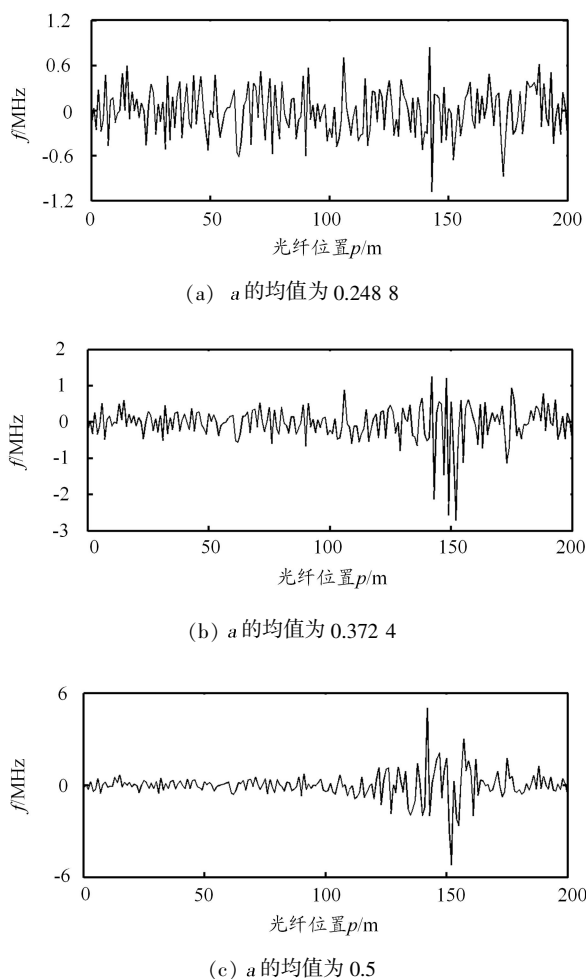


图4 信噪比为 20 dB 时,典型不对称系数下
光纤上的布里渊频移误差幅值的均值 f 的变化情况

导致无法完整地获取布里渊谱。当 $\Delta f=50$ MHz,且光纤位置 p 分别位于 50、100、150 m 处时,根据图 1(a)和式(3)计算出了对应的参数 a ,其值分别为 0、0.5 和 1。此时,对应的拟合曲线及其误差如图 5 所示。可以看出,图 5(a)对应的待拟合布里渊谱较为完整;相比之下,图 5(b)中的待拟合布里渊谱完整性有所下降,布里渊频移误差幅值的均值 f 增加到了 0.23 MHz;而图 5(c)中的待拟合布里渊谱则仅保留了完整谱的右侧部分, f 达到了 -1.09 MHz。因此,随着 a 的增加误差变大。

2.3 扫频范围大小的影响

为了保持频率扫频范围围绕光纤沿线布里渊频移的均值严格对称,即 a 的均值为 0;扫频点数始终设置为 101,频率扫频设定为 $[10.65 \text{ GHz}-\Delta f, 10.75 \text{ GHz}+\Delta f]$,其中 Δf 在 0~250 MHz 内波动,步长为 5 MHz;扫频间隔由扫频范围和扫频点数确定。其它参数与 2.1 节中的一致。同样采用第 1 节中基于伪 Voigt 模型的

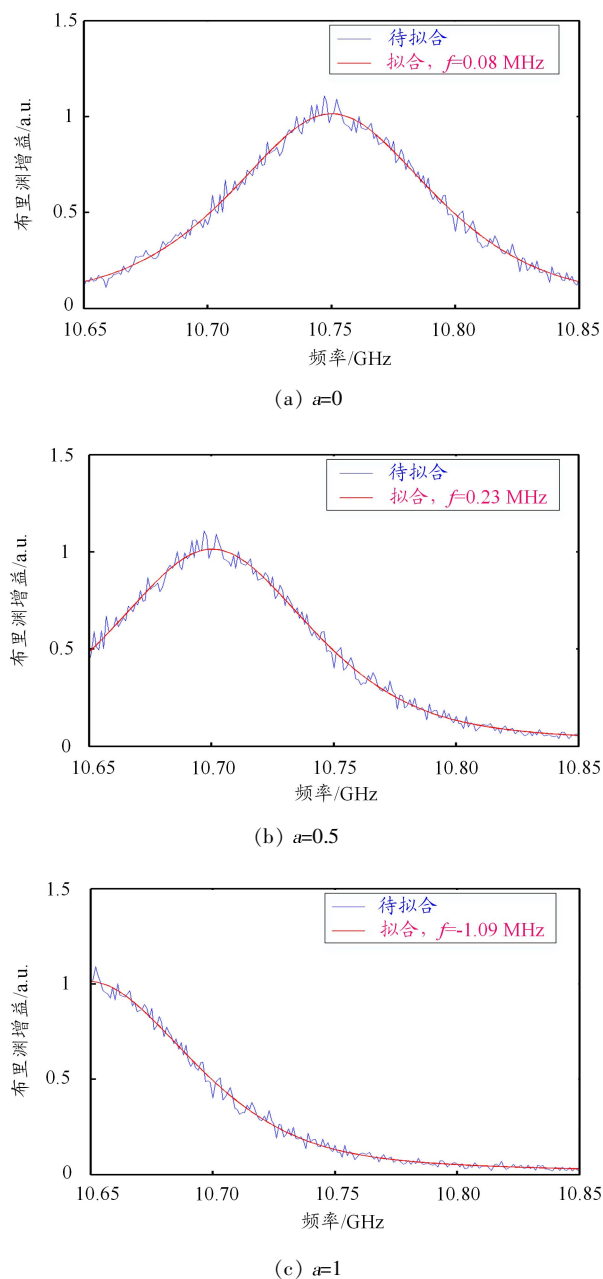
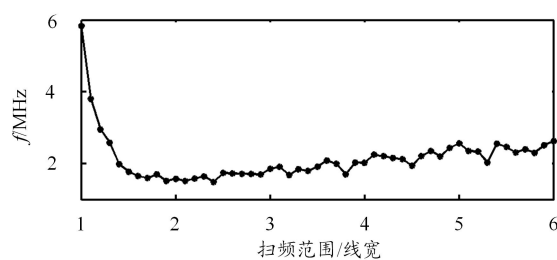


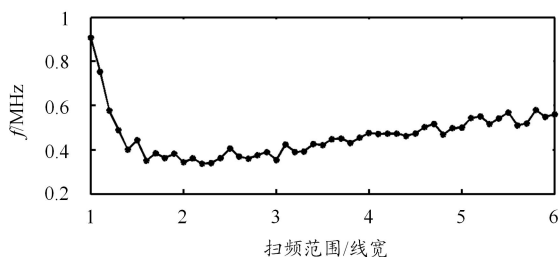
图5 信噪比为 20 dB 时,
不同扫频范围不对称程度时布里渊谱及拟合结果

谱拟合算法来计算布里渊频移。当扫频在 $\Delta v_B \sim 6\Delta v_B$ 范围内变化时,布里渊频移误差幅值的均值与扫频范围的关系如图 6 所示。可以看出,当扫频点数保持不变时,随着扫频范围从较小值逐渐增大到较大值,布里渊频移误差幅值的均值 f 先快速减小,随后缓慢增大,存在一个最小误差值。

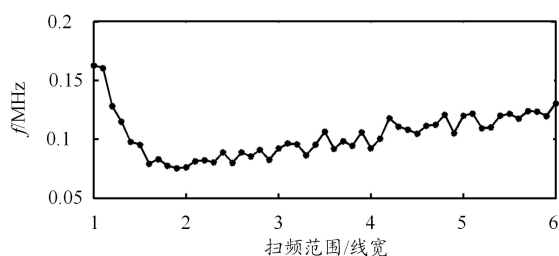
当信噪比为 20 dB 时,典型扫频范围下误差幅值随光纤位置的变化规律如图 7 所示。当扫频范围为 Δv_B 时,误差的幅值超过 8 MHz,验证了扫频范围选择不当会导致较大的误差;而当扫频范围为 $2\Delta v_B$ 时,最



(a) 信噪比为 10 dB



(b) 信噪比为 20 dB



(c) 信噪比为 30 dB

图 6 布里渊频移误差幅值的均值与扫频范围的关系

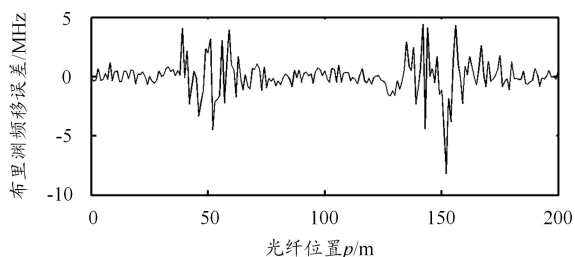
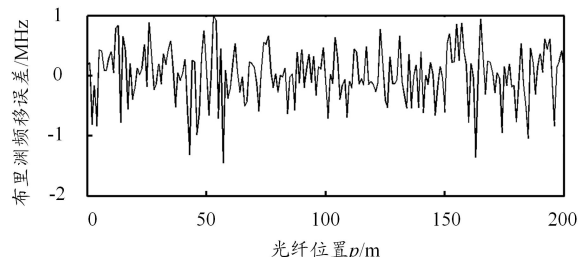
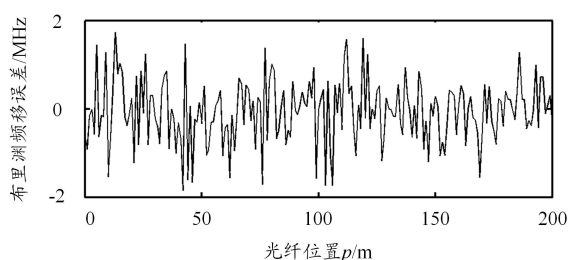
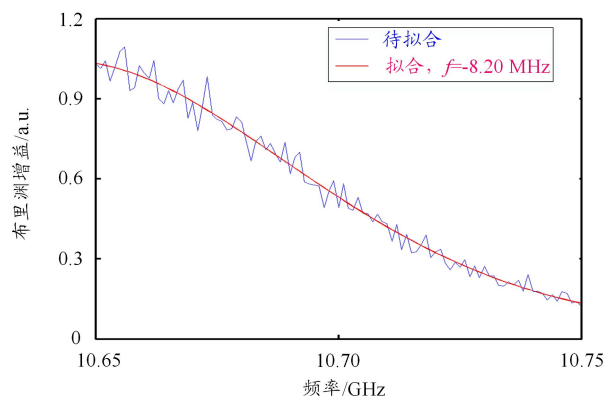
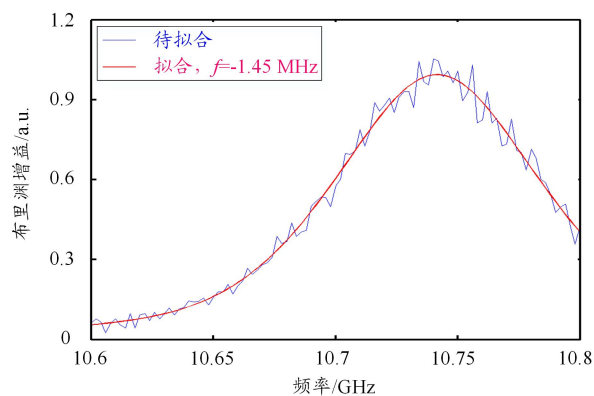
(a) 最大扫频范围为 Δv_B (b) 最大扫频范围为 $2\Delta v_B$ (c) 最大扫频范围为 $6\Delta v_B$

图 7 不同扫频范围下光纤上布里渊频移误差

大误差会更小。这是因为对于布里渊频移极端大或小的情况,过窄的扫频范围无法采集到足够的布里渊谱信息;而过宽的扫频范围则会减少有效布里渊谱区域内的频率点数。因此,在这 2 种情况下,拟合效果都不佳,从而导致布里渊频移误差较大。

当信噪比为 20 dB 时,最小、最佳、最大扫频范围下最大布里渊频移误差对应的布里渊谱、拟合曲线及误差结果如图 8 所示。当扫频范围分别为 Δv_B 、 $6\Delta v_B$ 时,布里渊频移误差幅值的均值 f 分别为 -8.20 、 -1.85 MHz,而扫频范围为 $2\Delta v_B$ 时, f 为 -1.45 MHz。即当扫频范围

(a) 最小扫频范围为 Δv_B (b) 最大扫频范围为 $2\Delta v_B$

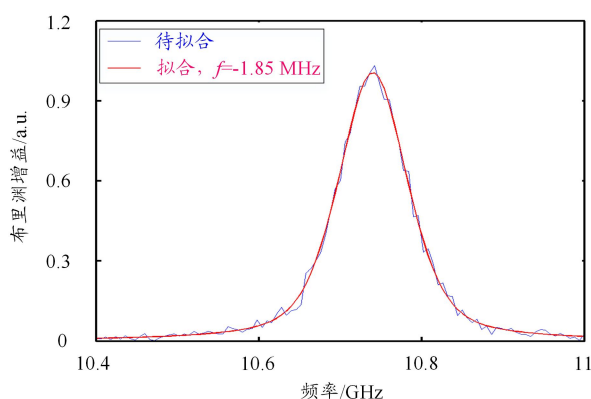
(c) 最大扫频范围为 $6\Delta\nu_B$

图8 不同扫频范围下,误差最大时的布里渊及拟合结果

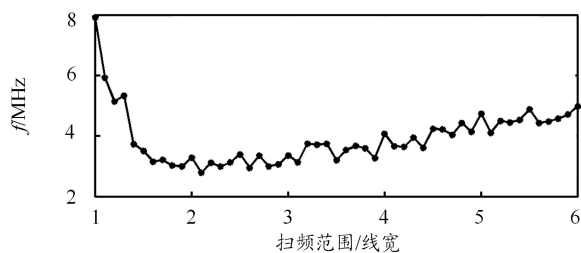
较小或较大时, 拟合得到布里渊频移的误差更大, 这与图7结果吻合。

在实际应用中, 布里渊线宽受到多个因素的影响, 包括但不限于入射光中心波长、入射光脉宽、光纤类型、温度以及应变等因素^[18]。然而, 一旦选择了特定的 BOTDR 型号, 入射光中心波长通常会被设定为一个固定的值, 因此它对布里渊线宽的影响可以忽略不计。对于目前广泛使用的石英光纤, 在常规操作条件下, 光纤类型、温度和应变的变化对布里渊线宽的影响也相对有限。相比之下, 入射光脉宽被认为是决定布里渊线宽的关键因素。这说明一旦确定了入射光脉宽, 布里渊线宽也就基本确定。此外, 通过参考经验值或实际测量的光谱数据, 也可以对布里渊线宽进行合理的估算。

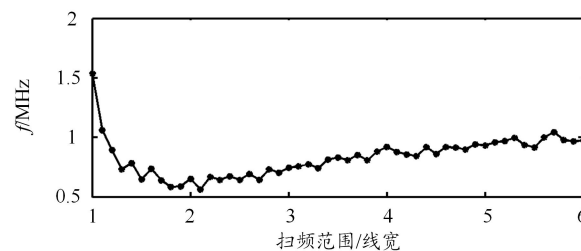
2.4 扫频范围选择策略及验证

基于 2.2 节的研究结果, 扫频范围应当以复合光纤的布里渊频移为中心对称分布。结合图 6 的数据, 本文考虑起始频率设为布里渊频移的最小值减去 0.5 个线宽; 而终止频率则设为布里渊频移的最大值加上 0.5 个线宽。

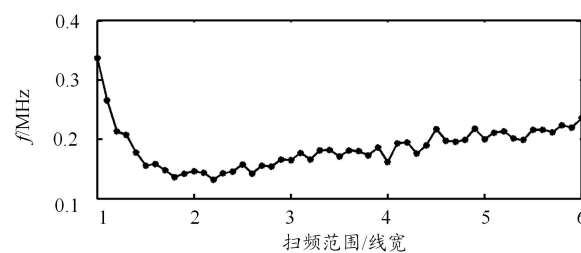
为了进一步验证所确定扫频范围的合理性, 同时考虑到实际情况中的扫频点数, 本文将扫频点数固定为 31, 其它参数及算法均与 2.3 节中的一致。布里渊频移误差幅值的均值与扫频范围的关系, 如图 9 所示。由图 9 可知, 当扫频点数设定为 31 时, 即使在不同的信噪比条件下, 依据本文所确定的最佳扫频范围计算出的布里渊频移误差虽不一定达到最小值, 但已非常接近。误差与理论最小值之间的差异主要归因于噪声的随机性质。当信噪比为 10 dB 且采用最佳扫频范围时, 布里渊频移误差幅值的均值为 3.29 MHz。根据



(a) 信噪比为 10 dB



(b) 信噪比为 20 dB



(c) 信噪比为 30 dB

图9 扫频点数为 31 时, 布里渊频移误差幅值的均值与扫频范围的关系

2.1 节中提到的温度和应变敏感系数的典型值, 此时对应的温度误差最大值为 2.94°C , 应变误差最大值为 $68.21\ \mu\epsilon$ 。这表明在低信噪比条件下, 温度和应变的误差会显著增大。因此, 建议通过增加扫频点数或提高叠加平均次数来减少误差。例如, 在最佳扫频范围内, 当信噪比为 20 dB 时, 布里渊频移误差的平均值为 0.65 MHz, 导致的最大温度误差为 0.58°C , 最大应变误差为 $13.53\ \mu\epsilon$; 而当信噪比提升至 30 dB 时, 布里渊频移误差的平均值降至 0.15 MHz, 此时的最大温度误差降为 0.13°C , 最大应变误差则为 $3.03\ \mu\epsilon$ 。这些数据说明, 在较高的信噪比条件下, 测量的准确性能够得到有效保证, 同时也为基于绕组温度和应变的状态监测提供了坚实的基础。

3 结束语

针对基于布里渊散射的变压器状态监测中光纤沿线布里渊频移波动较大、扫频范围选择不合适会引

王勇,马迅,贾旭超,等:面向变压器绕组复合光纤状态监测的 BOTDR 扫频策略研究

入较大误差的问题,本文深入探讨了扫频范围及其对称性对温度与应变测量精度的影响。研究得出的主要结论如下:

1)随着扫频范围不对称性的增加,测量误差亦随之增大。在保持扫频点数恒定的前提下,扩大扫频范围初期可降低测量误差,但进一步扩展将导致误差再次上升。

2)对于采用基于 BOTDR 方法的变压器绕组状态监测,推荐的扫频范围选择策略为:理想扫频范围应覆盖布里渊频移的波动区间,并额外增加一个线宽作为缓冲。具体地,扫频的起始频率应当设定为布里渊频移最小值减去 0.5 个线宽,而终止频率则应设定为布里渊频移最大值加上 0.5 个线宽。

参考文献:

- [1] 刘刚,胡万君,郝世缘,等.油浸式变压器绕组瞬态温升降阶快速计算方法[J].电工技术学报,2024,39(3):643-657.
- [2] 董青迅,胡祥胜,蒋闵威,等.基于一阶响应函数的变压器绕组温度测量方法[J].变压器,2023,60(8):54-58.
- [3] 马旭聪,唐文虎,牛哲文,等.非均衡数据集下基于孪生卷积网络的变压器绕组变形故障识别方法[J].高压电器,2023,59(10):120-128.
- [4] 谭珊,赵仲勇,杨建,等.基于动态时间规整的变压器绕组变形故障诊断方法研究[J].高压电器,2024,60(2):108-118.
- [5] 贾丹平,赵璐,皇甫丽影.变压器绕组热点温度监测技术的研究[J].计量学报,2022,43(2):235-241.
- [6] 韩超,胡宾鑫,朱峰,等.基于小波降噪的光纤布拉格光栅波长高精度解调算法[J].激光与光电子学进展,2022,59(5):132-138.
- [7] 刘宏亮,高树国,孙路,等.基于布拉格光纤传感的变压器绕组多次短路冲击应变[J].科学技术与工程,2022,22(35):15631-15640.
- [8] MOTIL A, BERGMAN A, TUR M. State of the art of Brillouin fiber-optic distributed sensing[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 78: 81-103.
- [9] 张宇阳,路元刚,彭捷钦.布里渊光时域光纤传感中的快速测量技术[J].半导体光电,2022,43(4):625-641.
- [10] LI H, LIU Y, ZHUANG X, et al. Test and analysis on extended temperature rise of 110 kV transformer based on distributed temperature sensing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(2): 1030-1041.
- [11] 田源.基于分布式光纤传感的变压器绕组变形检测方法研究[D].北京:华北电力大学,2019.
- [12] 张煜峰.基于机器学习的 BOTDA 温度提取研究[D].成都:西南交通大学,2022.
- [13] XU Z, ZHAO L. Highly accurate slope-assisted distributed fiber strain and temperature sensor based on pseudo-Voigt profile and quartic function[J]. Optical Fiber Technology, 2024, 82: 103645-1-103645-11.
- [14] BAI Q, WANG Q, WANG D, et al. Recent advances in Brillouin optical time domain reflectometry[J]. Sensors, 2019, 19(8): 1862-1906.
- [15] 孙少华,侯继勇,冯学斌,等.基于 BOTDA 的 OPGW 应变性能研究[J].光通信技术,2021,45(3):54-57.
- [16] 莫巧灵.基于 Lorentzian 模型与伪 Voigt 模型的谱拟合算法的准确性比较[J].光通信技术,2024,48(1):46-50.
- [17] 刘刚,郝世缘,胡万君,等.基于子循环自适应串行交错时间匹配算法的油浸式变压器绕组瞬态温升计算[J].电工技术学报,2024,39(4):1185-1197.
- [18] 李晓娟. BOTDR 传感系统性能提高方法的理论与实验研究[D].北京:华北电力大学,2017.