

文章编号: 1672-8785(2019)05-0028-04

布里渊谱信号的提升方法研究

袁 明^{1,2*} 李立功^{1,2} 张 洋^{1,2} 闫继送^{1,2} 张志辉^{1,2}

(1. 中电科仪器仪表有限公司, 山东 青岛 266555;

2. 中国电子科技集团公司第四十一研究所, 山东 青岛 266555)

摘 要: 在布里渊光时域反射计(Brillouin Optical Time Domain Reflectometer, BOTDR)光纤传感系统中, 自发布里渊后向散射信号非常微弱, 尤其是光纤远端的布里渊散射信号, 信噪比非常差, 分析难度非常高。提出了一种基于互相关理论的布里渊谱信号质量提升方法, 通过与理想布里渊散射谱进行互相关运算, 降低了对光纤远端极微弱布里渊散射信号应变分析的难度。经试验验证, 该方法可以有效提升信噪比较差时应变分布数据的信号质量以及 BOTDR 的应变传感精度。

关键词: 分布式光纤传感; 应变系数标定; 光纤拉伸装置; 布里渊光时域反射计

中图分类号: TP212.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2019.05.005

Study on Improved Method of Brillouin Spectrum Signal

YUAN Ming^{1,2*}, LI Li-gong^{1,2}, ZHANG Yang^{1,2}, YAN Ji-song^{1,2}, ZHANG Zhi-hui^{1,2}

(1. China Electronics Technology Instruments Co., Ltd., Qingdao 266555, China;

2. The 41st Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Qingdao 266555, China)

Abstract: In the Brillouin optical time domain reflectometer (BOTDR) fiber-optic sensing system, the scattering signal from Brillouin back scattering is very weak, especially the Brillouin scattering signal at the far end of the fiber, the signal-to-noise ratio is very poor and is very difficult to analyze. A method of improving Brillouin signal quality based on cross-correlation theory was presented. Through cross-correlation with ideal Brillouin scattering spectrum, the difficulty of strain analysis for very weak Brillouin scattering signal at the far end of optical fiber was reduced. It was verified by experiments that this method can effectively improve the signal quality of strain distribution data and the strain sensing accuracy of BOTDR when the signal-to-noise ratio is poor.

Key words: distributed optical fiber sensing; strain coefficient calibration; fiber stretching device; brillouin optical time domain reflectometer

0 引言

基于 BOTDR 的分布式光纤传感系统具有 耐腐蚀性好、检测距离长、抗电磁辐射、耐久

收稿日期: 2019-04-26

基金项目: 泰山产业领军人才工程专项

作者简介: 袁明(1986-), 男, 黑龙江人, 硕士, 工程师, 主要从事光电测试技术与分布式光纤传感技术研究。E-mail: ymfjysfj@163.com

性好、可分布式测量等优点^[1-4]。然而在 BOTDR 传感系统中, 自发布里渊散射信号非常微弱, 尤其是光纤远端传回的布里渊散射光信号, 由于光纤传输损耗客观存在, 探测器接收到的从光纤远端传回的光信号更加微弱, 传统检测技术难以实现, 影响了 BOTDR 传感系统在长距离测试中的应用。

本文对布里渊散射谱进行深入分析, 提出了一种布里渊谱信号质量提升方法。通过互相关算法增强布里渊散射谱信号质量, 提高 BOTDR 对低信噪比布里渊散射谱的分析能力, 提升 BOTDR 系统的应变测试精度及测试距离, 并通过试验验证了该方法的可行性。

1 基于互相关理论的布里渊散射谱信号质量提升方法

为改善 BOTDR 对光纤末端低信噪比布里渊散射谱的计算能力, 本文根据布里渊散射谱的谱型特征, 提出了基于互相关的布里渊散射谱信号质量改进算法。

在光纤中, 布里渊散射谱的谱线形式为洛

$$G_m(\nu) = g_u(\nu) * g_n(\nu) = g_u(\nu) * [g_B(\nu) + n(\nu)] = g_u(\nu) * g_B(\nu) + g_u(\nu) * n(\nu) = G_c(\nu) + N_c \quad (4)$$

式中, $G_c(\nu)$ 是两个理想洛伦兹数据的相关结果, N_c 是理想洛伦兹数据与白噪声的相关结果, 因此 $G_m(\nu)$ 将非常接近 $G_c(\nu)$ 的形状, 可以很容易计算出 $G_c(\nu)$ 的中心频率 ν_{Bc} 。

由式(4)及图 1 皆可看出, 互相关之后的布里渊谱数据依旧满足洛伦兹分布, 且最大增益 G_c 也随之变化。

由于理想洛伦兹型布里渊谱数据 $g_u(\nu)$ 可以由程序根据测试参数生成, 因此其中心频率 ν_{Bu} 已知时, 根据公式 $\nu_{Bc} = \nu_{Bu} + \nu_B$, 即可求出实际布里渊散射谱 $g_n(\nu)$ 的中心频率 ν_B , 然后计算应变。

2 实验验证

2.1 无应变光纤测试

本文使用中国电子科技集团公司第四十一所生产的 CEYEAR 6419 光纤应变分布测试仪采集应变数据及布里渊谱数据。通过对未施加

伦兹型。实际测试中, 其实际布里渊散射谱 $g_n(\nu)$ 为

$$g_n(\nu) = g_B(\nu) + n(\nu) \quad (1)$$

式中, $n(\nu)$ 为白噪声。

设理想洛伦兹型布里渊谱数据为 $g_u(\nu)$, 其布里渊散射谱带宽为 $\Delta\omega_u$, 布里渊谱中心频率为 ν_{Bu} , 最大增益为 g_0 , 则

$$g_u(\nu) = g_0 \frac{(\Delta\omega_u/2)^2}{(\nu - \nu_{Bu})^2 + (\Delta\omega_u/2)^2} \quad (2)$$

其与 $g_B(\nu)$ 取互相关, 结果 $G_c(\nu)$ 为

$$G_c(\nu) = g_u(\nu) * g_B(\nu) = G_c \frac{(\Delta\omega_c/2)^2}{(\nu - \nu_{Bc})^2 + (\Delta\omega_c/2)^2} \quad (3)$$

式中, G_c 为互相关后的最大增益; ν_{Bc} 为互相关后的布里渊中心频移, $\nu_{Bc} = \nu_{Bu} + \nu_B$; $\Delta\omega_c$ 为互相关后的布里渊增益带宽, $\Delta\omega_c = \Delta\omega_u + \Delta\omega$, 其对比曲线如图 1 所示。

对实际布里渊散射谱 $g_n(\nu)$ 使用理想洛伦兹型布里渊谱数据 $g_u(\nu)$ 进行互相关, 则有:

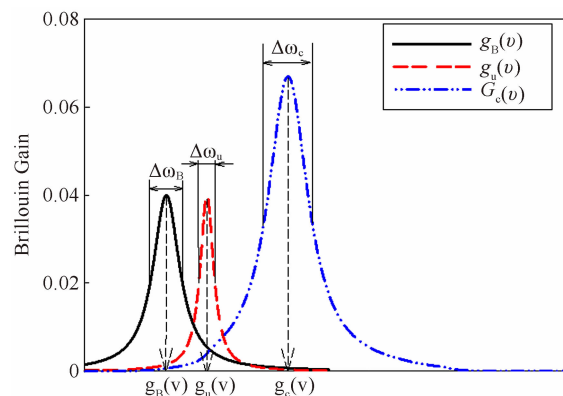


图 1 理想洛伦兹曲线及其互相关结果曲线

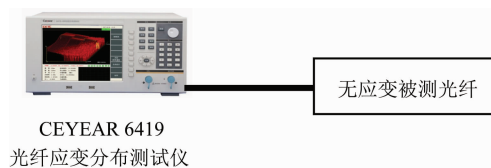


图 2 无应变光纤测试实验方案示意图

应变的单模光纤进行测试, 实验方案如图 2 所示。原始应变分析曲线如图 3 所示, 对原始数

据采用本文提出的方法进行分析,得到的应变曲线如图 4 所示。

为定量分析本文提出的方案对应变数据分析结果的影响,本文采用无应变光纤尾端区域连续应变数据标准差的变化评价应变测试精度,并通过同一区域不同分析方法的应变测试精度数据验证本文方案的可行性。

图 3 中,应变曲线为分析未采用本文方案提升的原始布里渊散射谱得到的光纤应变数据。从图 2 可见,末端区域出现较大的噪声,主要原因是在光纤末端布里渊散射信号非常微弱,其布里渊谱谱型非常差,难以分析,导致应变数据出现噪声。噪声较大的区域为 64.89 km~74.90 km 区间。经计算,该区间的应变标准差为 $810.5 \mu\epsilon$ 。

图 4 中,应变曲线为分析信号质量提升后由布里渊散射谱得到的应变数据。由图可见,末端原本出现的应变噪声数据都已消失,信号质量提升后布里渊散射谱的分析难度降低,噪声减小。经计算,64.89 km~74.90 km 区间的应变标准差为 $64.7 \mu\epsilon$ 。

与用原始算法分析的应变数据相比,提升后应变数据在 64.89 km~74.90 km 区间的应变标准差由 $810.5 \mu\epsilon$ 提升为 $64.7 \mu\epsilon$,测试效

果得到了显著提升,应变数据噪声得到了明显抑制。

2.2 温度变化时的光纤测试

本文采用 25 km 长光纤搭建了温度实验,利用温度变化令光纤加热区域的布里渊谱中心频率产生变化,通过 CEYEAR 6419 光纤应变分布测试仪测试并计算加热区域布里渊中心频移量的连续标准差,评价测试结果,以验证本文方案的可行性。

将被测光纤靠近末端的 25 m 长光纤放入恒温水槽中,控制恒温水槽的温度变化。变化范围为 $40^\circ\text{C} \sim 55^\circ\text{C}$,温度步进为 1°C 。使用 BOTDR 测试,实验的示意图如图 5 所示。

本文采集了不同加热温度下的布里渊散射谱数据。将同一组布里渊散射谱数据分别通过原始方法及本文方法进行分析,得到两组布里渊中心频率数据。对其标准差进行计算,用原始方法分析得到的布里渊谱中心频率标准差见表 1,用本文方法分析得到的布里渊谱中心频率标准差见表 2。由表可见,采用本文方法分析后,布里渊中心频率数据的标准差整体上明显优于用原始方法分析的数据标准差,平均提升幅度达到 31%,证明采用本文方法可以显著减少噪声对布里渊中心频率数据分

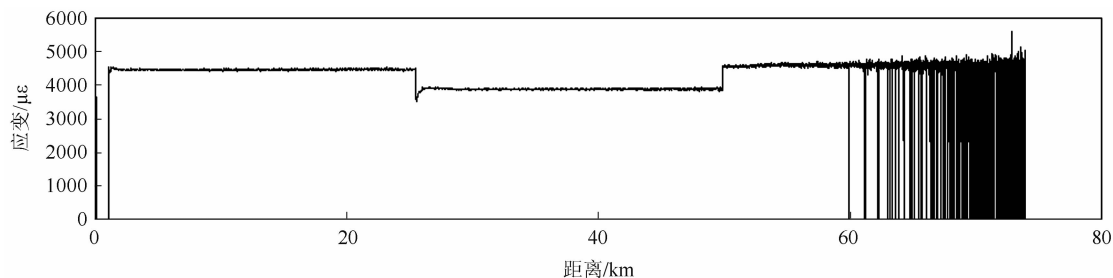


图 3 分析原始布里渊散射谱数据得到的应变分布曲线

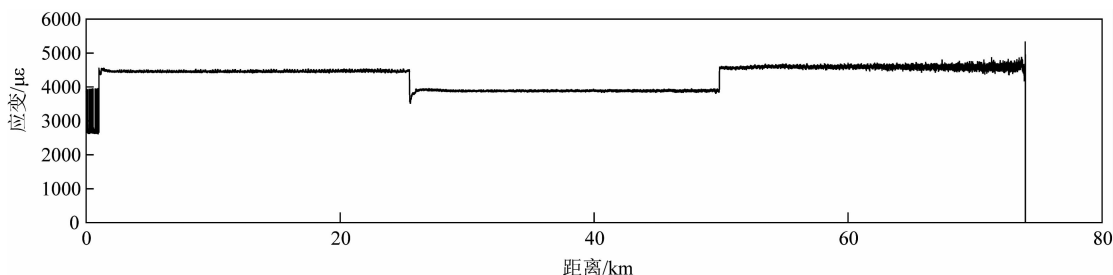


图 4 分析用本文方案提升的布里渊散射谱数据得到的应变分布曲线

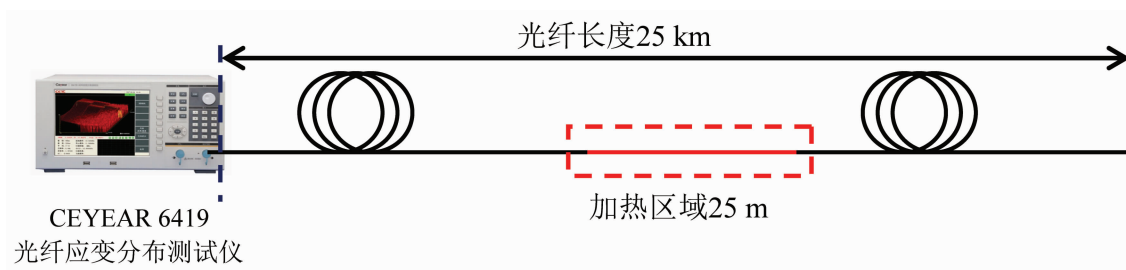


图 5 温度变化时的光纤测试实验方案示意图

表 1 用原始方法分析加热区域布里渊中心频率数据的标准差

温度/°C	40	41	42	43	44	45	46	47
中心频移标准差/MHz	1.111	0.735	1.138	0.791	0.788	0.800	0.899	1.094
温度/°C	48	49	50	51	52	53	54	55
中心频移标准差/MHz	1.220	1.294	0.64	0.58	0.937	1.091	0.690	0.598

表 2 用本文方法分析加热区域布里渊中心频率数据的标准差

温度/°C	40	41	42	43	44	45	46	47
中心频移标准差/MHz	0.494	0.714	0.782	0.684	0.468	0.598	0.632	0.934
提升幅度/%	55.50	2.86	31.28	13.53	40.61	25.25	29.70	14.63
温度/°C	48	49	50	51	52	53	54	55
中心频移标准差/MHz	0.457	0.753	0.476	0.806	0.835	0.580	0.509	0.498
提升幅度/%	62.54	41.81	31.41	15.87	10.9	46.84	26.23	16.72

析的影响, 提高对布里渊中心频率数据的分析精度。

3 结论

通过深入分析 BOTDR 系统的计算应变过程, 采用互相关理论, 建立了理想布里渊谱与布里渊散射谱测试数据的互相关模型。通过互相关算法实现了低信噪比布里渊散射谱测试数据信号质量的显著提升。在无需改动硬件、不增加硬件成本的前提下, 明显降低了低信噪比布里渊散射谱测试数据的分析难度, 提高了布里渊散射谱中心频率数据的分析精度。通过测试 73 km 长无应变光纤验证了本文方法的可行性。该算法对软件分析时间及仪器测试速度的影响很小, 在 BOTDR 测试系统中有很大的应

用潜力。

参考文献

- [1] 张丹, 施斌, 吴智深, 等. BOTDR 分布式光纤传感器及其在结构健康监测中的应用 [J]. 土木工程学报, 2003, 36(11): 83-87.
- [2] 施斌, 徐学军, 王楠, 等. 隧道健康诊断 BOTDR 分布式光纤应变监测技术研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2622-2628.
- [3] 邱海涛, 李川, 刘建平. 基于 BOTDR 的隧道应变监测与数值模拟 [J]. 传感器与微系统, 2012, 30(12): 78-81.
- [4] 王帅, 栾丽君, 邵秀江. 基于 BOTDR 的矿井冒顶坍塌事故全方位监测 [J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2012, 31(5): 774-777.