

光载波抑制调制技术在布里渊光时域反射仪 频移校准中的应用

孙小强, 傅栋博, 周轩羽, 郝文慧, 陈龙泉, 张大元*

(中国信息通信研究院, 北京 100191)

摘要: 针对分布式光纤传感器中布里渊光时域反射仪(Brillouin Optical Time Domain Reflectometer, BOTDR)频移的计量校准需求, 提出一种基于光载波抑制调制技术的布里渊频移参数校准方法。利用光载波抑制调制技术产生的倍频信号模拟光纤布里渊散射信号, 并给出布里渊频移参考值与信号发生器输出信号频率之间的数学模型和量值溯源图, 实现布里渊频移到原子时标基准装置的量值溯源。通过调节信号发生器输出信号的频率, 可以获取频移量程内不同频率点的布里渊频移示值误差。开展实验获得 10.6 ~ 11.8 GHz 条件下不同频移点的校准结果, 并进行不确定度分析, 当布里渊频移测量值为 10 998.38 MHz 时, 扩展不确定度为 0.07 MHz($k = 2$)。该校准方法能够满足光纤传感应用领域中 BOTDR 频移的量值溯源要求, 为推动 BOTDR 性能提升及广泛应用提供了有力支撑。

关键词: 光学计量; 光纤传感; 布里渊光时域反射仪; 频移溯源; 光载波抑制; 信号调制; 倍频技术; 不确定度分析

中图分类号: TB96; O43 文献标志码: A 文章编号: 1674-5795(2025)05-0090-07

Application of optical carrier suppression modulation technology in the calibration of frequency shift for Brillouin optical time domain reflectometers

SUN Xiaoqiang, FU Dongbo, ZHOU Xuanyu, HAO Wenhui, CHEN Longquan, ZHANG Dayuan*

(China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100191, China)

Abstract: A Brillouin frequency shift parameter calibration method based on optical carrier suppression modulation technology is proposed to meet the metrological calibration requirements for frequency shift of Brillouin optical time domain reflectometer (BOTDR) in distributed fiber sensors. Fiber Brillouin scattering signals were simulated using the frequency doubling signal generated by optical carrier suppression modulation technology, and a mathematical model and value traceability diagram between the Brillouin frequency shift reference value and the output signal frequency of the signal generator were provided, to achieve the value traceability of Brillouin frequency shift to the atomic time standard reference device. By adjusting the frequency of the output signal of the signal generator, the Brillouin frequency shift indication error at different frequency points within the frequency shift range can be obtained. Experiments were conducted to obtain calibration results for different frequency shift points within the range of 10.6 to 11.8 GHz, and an uncertainty

收稿日期: 2025-08-08; 修回日期: 2025-08-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF0605903)

引用格式: 孙小强, 傅栋博, 周轩羽, 等. 光载波抑制调制技术在布里渊光时域反射仪频移校准中的应用[J]. 计测技术, 2025, 45(5): 90-96.

Citation: SUN X Q, FU D B, ZHOU X Y, et al. Application of optical carrier suppression modulation technology in the calibration of frequency shift for Brillouin optical time domain reflectometers [J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(5): 90-96.



analysis was performed. When the measured Brillouin frequency shift value is 10 998.38 MHz, the expanded uncertainty is 0.07 MHz ($k = 2$). This calibration method can meet the metrological traceability requirements for BOTDR frequency shift in the field of fiber optic sensing applications, providing strong support for promoting the performance improvement and widespread application of BOTDR.

Key words: optical metrology; optical fiber sensor; BOTDR; frequency shift traceability; optical carrier suppression; signal modulation; frequency doubling technology; uncertainty analysis

0 引言

分布式光纤传感器具有抗电磁干扰、耐酸碱腐蚀、灵敏度高、覆盖距离远、感知参量多、易于敷设组网等优势，被广泛应用于航空航天、电力、建筑、通信、交通、油气、地震、安防等领域^[1-5]。光纤传感技术的广泛应用得益于光纤通信技术的快速发展以及相关光电器件性能的提高与成本的降低。分布式光纤传感技术利用光纤作为信号的传感单元和传输介质，通过监测光纤中光信号的强度、频移、相位、偏振态等参量在外场作用下的变化，实现对光纤沿线外部参量(如温度、应变、振动等)的连续分布式测量。根据散射光类型不同，分布式光纤传感器中的信号处理单元通常可以分为3类：①基于瑞利散射(Rayleigh scattering)的光时域反射仪；②基于拉曼散射(Raman scattering)的拉曼光时域反射仪；③基于布里渊散射(Brillouin scattering)的布里渊光时域反射仪(Brillouin Optical Time Domain Reflectometer, BOTDR)和布里渊光时域分析仪。

BOTDR在温度和应变测量方面均具有较高的精度和空间分辨力，此外，其测量模式为单端测量，相较布里渊光时域分析仪，BOTDR的复杂度和成本均更低，已获得广泛应用^[6-8]。布里渊散射效应的本质是：入射到光纤的光场与光纤中的声子发生相互作用，产生非弹性散射。光纤受温度、应变、振动等外界因素影响时会引起声子运动，并在光纤折射率周期性调制下产生声场光栅^[9-10]。当声场光栅与入射光同向移动时，产生向下频移的散射光；当声场光栅与入射光反向移动时，产生向上频移的散射光。布里渊频移是散射光相较于入射光的频率偏移量，与光纤受到的温度、应变、振动等外界因素直接相关。BOTDR测量布里渊频移的准确性直接决定了光纤传感系统对温度、应变、振动等参量的监测精度。开展BOTDR频移参

数校准技术研究，有利于保障BOTDR测量结果准确可靠，并推动BOTDR整体性能的提升。

目前针对BOTDR校准技术的研究主要集中在应变、波长、功率等参数的测量与定标方面^[11-13]。中国电子科技集团公司第八研究所开展了BOTDR计量特性评价方面的研究^[11]，重点对仪器应变测量的重复性、稳定性和不确定度进行了评价。中国电子科技集团公司第四十一研究所开展了布里渊光谱仪的高精度波长标定方法研究^[12]，探索了降低波长测量不确定度的方法。南京大学提出了一种BOTDR参考光功率的校准方法^[13]，可将BOTDR不同频率点参考光功率与预定功率的最大误差减小为未校准前的1/3。以上研究均未涉及布里渊频移参数的计量校准，此外，虽然有研究团队将电光调制技术应用于布里渊光纤传感器性能指标提升领域^[14-15]，但目前未见将电光调制技术应用于BOTDR计量校准领域的报道，JJG 959-2024《光时域反射计检定规程》的适用范围也没有覆盖BOTDR^[16]。

为满足分布式光纤传感器中BOTDR频移的计量校准需求，提出了一种基于光载波抑制调制技术的BOTDR频移参数校准方法。通过光载波抑制调制实现微波信号的倍频，降低对信号发生器工作频段的要求，实现便捷高效的BOTDR频移参数校准。开展实验对该方法的应用效果进行验证，并进行测量不确定度分析，为保障BOTDR频移测量的准确性和可靠性提供技术支持。

1 布里渊频移校准原理

BOTDR通过监测自发布里渊散射光功率和频移的变化量来实现沿光纤传输方向的分布式传感。BOTDR的结构示意图如图1所示，激光器发出的连续光分为2路，上路光经过电光调制后得到脉冲光信号，由放大器放大后注入传感光纤中，光纤

在受到温度、应变、振动等外界因素影响的位置处产生具有频移变化的背向布里渊散射信号，与光分路器输出的下路本振光合路后，由光电探测

器完成相干接收，之后完成布里渊频移、散射功率及时间延迟等信息的采集与处理，从而实现长距离的温度、应变及振动参量监测^[17-18]。

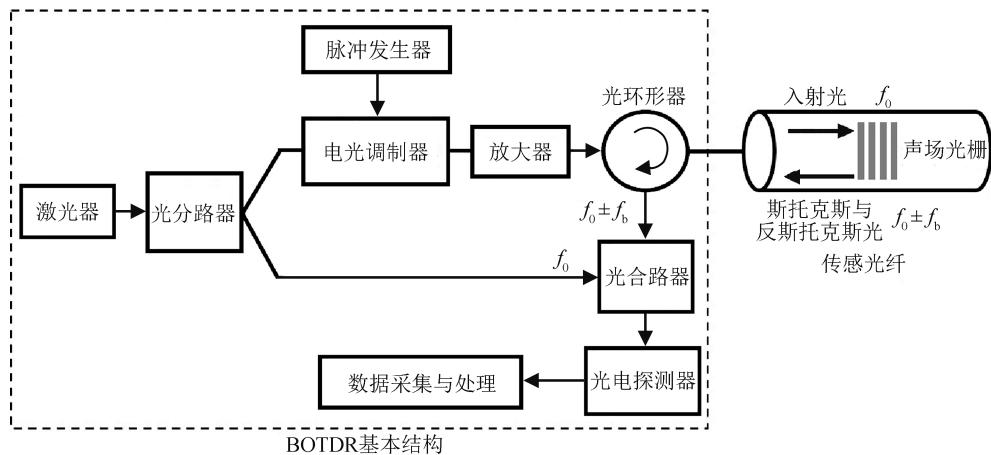


图1 BOTDR结构示意图

Fig.1 Structure diagram of BOTDR

光纤中散射光与入射光之间的频移为布里渊频移 f_b ，计算公式为

$$f_b = \frac{2n v_a}{\lambda_0} \quad (1)$$

式中： n 为光纤的等效折射率， v_a 为声波的速度， λ_0 为入射光的波长。

布里渊频移校准装置的结构框图如图2所示，该装置模拟产生布里渊散射信号并提供布里渊频移的参考值。被校准BOTDR产生的光信号中心载波频率为 f_0 ，电光调制器采用马赫-曾得尔调制器，当调制器的偏置点被设到调制曲线的最低点(即半波电压处)时，调制模式变为载波抑制调制。中心载波功率会被抑制，该调制模式的优点是：双边带调制信号经光电探测后会产生倍频信号，信号发生器的输出频率仅为被校布里渊频移的一半即可实现校准，降低了装置的复杂度和成本。通过调节偏振控制器可获得中心载波抑制比最佳的双边带载波抑制调制信号，上、下边带的频率间隔为信号发生器输出信号频率的2倍。通过控制信号发生器的输出频率，可以得到频率间隔可调的双边带信号。利用频率计准确测量信号发生器输出信号的频率 f_m 。载波抑制后的双边带信号经过可变光衰减器设定的衰减后，由单模光纤传输至光隔离器，之后经分路器返回被校准BOTDR，从而模

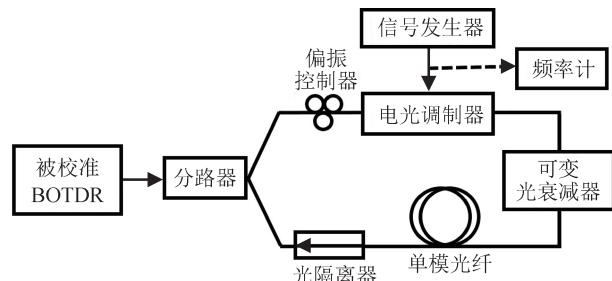


图2 布里渊频移校准装置结构框图
Fig.2 Structural block diagram of the device for calibration of Brillouin frequency shift

拟出光纤背向布里渊散射信号，并实现布里渊频移参考值的可调。

信号发生器发出的射频信号 $v(t)$ 为

$$v(t) = V_m \cos(2\pi f_m t) \quad (2)$$

式中： V_m 为射频信号的幅度， t 为时间。

BOTDR 接收信号时将高阶边带产生的高频信号滤除，因此仅考虑一阶调制边带，则利用光场 E_o 表达调制器输出的光信号为^[10]

$$E_o = A_{-1} \exp \left\{ j[2\pi(f_0 - f_m)t] \right\} + A_{+1} \exp \left\{ j[2\pi(f_0 + f_m)t] \right\} \quad (3)$$

式中： A_{-1} 和 A_{+1} 分别为下边带和上边带的复振幅， j 为虚数单位符号。

调制器输出的载波抑制信号经可变光衰减器、

单模光纤、光隔离器及分路器返回到被校准BOTDR，经BOTDR的光电探测器进行差频探测，接收到的信号 $v_0(t)$ 为双倍频的射频信号，表示为

$$v_0(t) = V_0 \cos(4\pi f_m t) \quad (4)$$

式中： V_0 为光电探测器将光信号转换为射频信号的幅度，其大小可由可变光衰减器进行调节。

布里渊频移的参考值 f_{ref} 表示为

$$f_{ref} = 2f_m \quad (5)$$

BOTDR布里渊频移示值误差 Δ 表示为

$$\Delta = f_{b\text{测量}} - 2f_m \quad (6)$$

式中： $f_{b\text{测量}}$ 为BOTDR布里渊频移测量值。

布里渊频移量值溯源框图如图3所示。

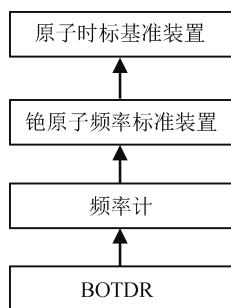


图3 布里渊频移量值溯源框图

Fig.3 Block diagram of traceability of Brillouin frequency shift

2 校准实验及结果

被校准BOTDR型号为DSTS-1U，出厂编号为1616A11177。校准装置中，光分路器的分光比为50 : 50，电光调制器为20 GHz带宽的马赫-曾得尔调制器。信号发生器(型号为E8267D)产生频率可调的射频信号并加载到电光调制器，电光调制器的偏置电压设为半波电压，此时的调制模式为载波抑制调制，电光调制器输出的载波抑制调制信号光谱如图4所示，输出光波长为1 552.6 nm。采用频率计(型号为53151A)测量得到信号发生器输出频率为5 400 MHz。调制后的光信号经过可变光衰减器(型号为8163B)和单模光纤传输后，通过光隔离器和光分路器回到被校准BOTDR。返回的光信号模拟出光纤中的布里渊背向散射信号，并由BOTDR进行测量。依据式(5)，信号发生器输出信号频率的2倍为布里渊频移的参考值，调节信号发生器输出信号的频率，得到不同的布里渊频移参

考值，并记录对应的BOTDR测量显示值，得到布里渊频移示值误差，从而完成BOTDR布里渊频移参数的校准。

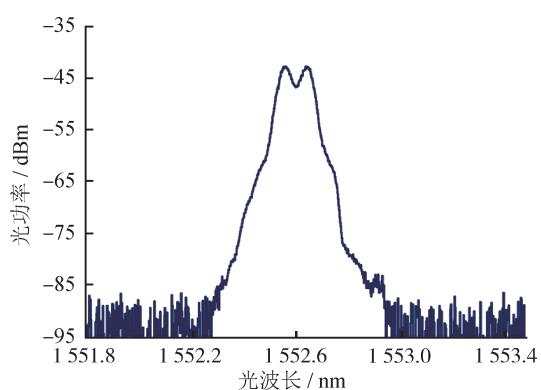


图4 载波抑制调制信号的光谱图

Fig.4 Spectrum of carrier suppression modulation signal

信号发生器产生的频率从5 300 MHz开始，以100 MHz为步进，逐步增加到5 900 MHz，利用频率计测量得到 f_m 。相应地，布里渊频移的参考值从10 600 MHz开始，以200 MHz为步进，逐步增加到11 800 MHz。布里渊频移测量结果如表1所示。利用该校准方法可以实现BOTDR频移量程内任意频率点的布里渊频移参数量值溯源。

表1 布里渊频移测量结果

Tab.1 Brillouin frequency shift measurement results

单位：MHz

f_m	f_{ref}	$f_{b\text{测量}}$	Δ
5 300.00	10 600.00	10 599.35	-0.65
5 400.00	10 800.00	10 799.00	-1.00
5 500.00	11 000.00	10 998.38	-1.62
5 600.00	11 200.00	11 197.48	-2.52
5 700.00	11 400.00	11 397.43	-2.57
5 800.00	11 600.00	11 598.68	-1.32
5 900.00	11 800.00	11 796.04	-3.96

为了验证校准装置的长时间稳定性，设置信号发生器输出的微波频率为5 500 MHz，每间隔1 h进行1次测试，结果如表2所示。频率计测量信号发生器输出频率的标准偏差为0.00 MHz，BOTDR频移显示值的标准偏差为0.05 MHz。

表2 长时间稳定性测试结果

Tab.2 Long term stability test results

测量次数/次	信号发生器输出 频率/MHz	BOTDR频移 显示值/MHz
1	5 500.00	10 998.37
2	5 500.00	10 998.31
3	5 500.00	10 998.36
4	5 500.00	10 998.42
5	5 500.00	10 998.35
6	5 500.00	10 998.26
7	5 500.00	10 998.38
8	5 500.00	10 998.41
9	5 500.00	10 998.40
标准偏差	0.00	0.05

3 不确定度分析

该校准装置的布里渊频移测量不确定度来源主要包括5个方面：频率计自身准确度引入的不确定度分量、信号发生器频率稳定度引入的不确定度分量、被校准BOTDR测量分辨力引入的不确定度分量、测量重复性引入的不确定度分量、环境温度变化引入的不确定度分量。

频率计的最大允许误差为 $\pm 0.001\text{ MHz}$ ，按均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则由频率计自身准确度引入的标准不确定度 $u_1 = 0.0006\text{ MHz}$ 。

信号发生器频率稳定度不超过 $\pm 0.001\text{ MHz}$ ，按均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则由信号发生器频率稳定度引入的标准不确定度 $u_2 = 0.0006\text{ MHz}$ 。

被校准BOTDR测量分辨力为 0.01 MHz ，按均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则由被校准BOTDR测量分辨力引入的标准不确定度 $u_3 = 0.0029\text{ MHz}$ 。

当信号发生器发出的微波频率为 $5 500\text{ MHz}$ 时，布里渊频移参考值为 $11 000\text{ MHz}$ ，利用被校准BOTDR重复测量3次，测量值分别为 $10 998.38$ 、 $10 998.35$ 、 $10 998.32\text{ MHz}$ 。采用极差法计算，实验标准差 $s = (x_{\max} - x_{\min})/d_n$ ，其中， x_{\max} 为测量值的最大值， x_{\min} 为测量值的最小值， d_n 为极差系数， n 为测量次数。 $n = 3$ 时， $d_n = 1.69$ ，以单次测量值作为校准结果时，测量重复性引入的不确定度分量 $u_4 = 0.036\text{ MHz}$ 。

环境温度变化会引起装置中单模光纤布里渊频移的变化，但装置中使用了光隔离器，阻止了光分路器输出的下路光信号进入单模光纤，因此该部分光信号不会产生布里渊散射信号，也不会对测量结果产生影响。光分路器输出的上路光信号经调制后，光衰减器的衰减值约为 40 dB ，进入单模光纤的光信号功率很低，产生的微弱背向布里渊散射信号再次经过光衰减器衰减，该部分布里渊散射信号无法被BOTDR探测到，即由环境温度变化引入的不确定度分量可以忽略不计。

被校准BOTDR测量重复性引入的不确定度分量远大于测量分辨力引入的不确定度分量，在不确定度评定中可不考虑测量分辨力引入的不确定度分量，因此合成标准不确定度 $u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_4^2} = 0.036\text{ MHz}(k = 2)$ ，扩展不确定度 $U = k \cdot u_c = 0.07\text{ MHz}(k = 2)$ 。不确定度来源中，测量重复性引入的不确定度分量较大，这与被校准BOTDR的自身性能有关，由校准装置中的频率计准确度和信号发生器频率稳定度引入的不确定度分量相对很低。此外，单模光纤的温度和应变系数分别约为 $1.07\text{ MHz}/^\circ\text{C}$ 和 $0.05\text{ MHz}/\mu\epsilon$ ，对应的温度和应变不确定度分别为 $0.07\text{ }^\circ\text{C}(k = 2)$ 和 $1.4\mu\epsilon(k = 2)$ ，均较低。上述实验及分析结果表明：基于光载波抑制调制技术的布里渊频移校准方法能够满足分布式光纤传感器中BOTDR频移的校准需求。

4 结论

BOTDR对布里渊频移的测量准确性直接影响其应用性能。本研究团队提出了一种基于光载波抑制调制技术的BOTDR布里渊频移参数校准方法，实现了布里渊频移到原子时标基准装置的量值溯源。应用该方法时，信号发生器的输出频率仅为被校布里渊频移的一半即可实现校准，降低了对信号发生器和电光调制器带宽的要求。开展实验并给出 $10.6\sim11.8\text{ GHz}$ 条件下不同频移点的校准结果，当布里渊频移测量值为 $10 998.38\text{ MHz}$ 时，扩展不确定度为 $0.07\text{ MHz}(k = 2)$ 。该方法适用于本振光与布里渊散射光信号相干接收的BOTDR的布里渊频移校准，具有可靠性高、易操作、成本较低的优势。未来，随着BOTDR频移精度的进一步提

高, 准确标定表征光纤中布里渊频移与温度和应变线性关系的温度系数和应变系数, 将成为提升BOTDR性能的关键, 并进一步推动BOTDR在结构健康和安全监测领域的应用。

参考文献

- [1] 毛献辉, 施清平, 苑立波, 等. 光纤温度传感器在电力设备安全监测中的应用[J]. 计测技术, 2007, 27(5): 20–22, 54.
- MAO X H, SHI Q P, YUAN L B, et al. Application of optical fiber sensor to security monitoring of electrical devices [J]. Metrology & Measurement Technology, 2007, 27(5): 20–22, 54. (in Chinese)
- [2] 陈磊, 詹跃东, 田庆生. 基于BOTDR分布式传感系统的研究[J]. 仪表技术与传感器, 2019(6): 96–100.
- CHEN L, ZHAN Y D, TIAN Q S. Research on BOTDR distributed sensing system [J]. Instrument Technique and Sensor, 2019(6): 96–100. (in Chinese)
- [3] 张旭苹, 张益昕, 王亮, 等. 分布式光纤传感技术研究和应用的现状及未来[J]. 光学学报, 2024, 44(1): 1–63.
- ZHANG X P, ZHANG Y X, WANG L, et al. Current status and future of research and applications for distributed fiber optic sensing technology [J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(1): 1–63. (in Chinese)
- [4] 王本章, 张宇鹏, 全栋梁, 等. 面向航天领域应用的分布式光纤传感技术研究[J]. 光电技术应用, 2024, 39(2): 1–10.
- WANG B Z, ZHANG Y P, QUAN D L, et al. Research on distributed optical fiber sensing technology for aerospace applications [J]. Electro-optic Technology Application, 2024, 39(2): 1–10. (in Chinese)
- [5] 耿军平, 许家栋, 韦高, 等. 基于布里渊散射的分布式光纤传感器的进展[J]. 测试技术学报, 2002, 16(2): 87–91.
- GENG J P, XU J D, WEI G, et al. The development of Brillouin scattering distributed optic fiber sensor [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2002, 16(2): 87–91. (in Chinese)
- [6] BAO X Y, CHEN L. Recent progress in Brillouin scattering based fiber sensors[J]. Sensors, 2011, 11(4): 4152–4187.
- [7] HORIGUCHI T, SHIMIZU K. Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering [J]. Journal of Lightwave Technology, 1995, 13(7): 1296–1302.
- [8] 黄强, 孙军强, 包宇奔, 等. 长距离布里渊光时域反射光纤传感技术进展[J]. 激光与红外, 2021, 51(4): 395–403.
- HUANG Q, SUN J Q, BAO Y B, et al. Advances of technologies in long-range Brillouin optical time-domain reflective optical fiber sensing [J]. Laser & Infrared, 2021, 51(4): 395–403. (in Chinese)
- [9] SUN X Q, XU K, PEI Y Q, et al. Characterization of SBS gain and loss spectra using Fresnel reflections and interaction of two sidebands[C]// 2010 Conference on Optical Fiber Communication, collocated National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), JWA11, San Diego, 2010.
- [10] 孙小强. 光载无线系统中的射频光传输及调控技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2012.
- SUN X Q. Research on RF optical transmission and control technology in optical wireless systems [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012. (in Chinese)
- [11] 路杰, 赵雪峰. 大尺度BOTDR光纤应变灵敏特性研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(增刊1): 266–269.
- LU J, ZHAO X F. Research on fiber strain sensitivity characteristics of large scale BOTDR [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(supplement 1): 266–269. (in Chinese)
- [12] 刘加庆, 刘磊, 刘雷, 等. 布里渊光谱仪的高精度波长标定方法研究[J]. 光学学报, 2020, 40(20): 1–8.
- LIU J Q, LIU L, LIU L, et al. Wavelength calibration method of ultra-high resolution Brillouin spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(20): 1–8. (in Chinese)
- [13] 王金兵, 路元刚, 张旭苹, 等. 布里渊光时域反射仪中参考光的功率校准[J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1456–1461.
- WANG J B, LU Y G, ZHANG X P, et al. Calibration of reference light power in Brillouin optical time domain reflectometer [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(6): 1456–1461. (in Chinese)
- [14] 张旭苹, 张凯, 王顺布. 布里渊光时域反射计中电光调制器的调制特性与控制[J]. 光电子·激光, 2012, 23(1): 15–20.
- ZHANG X P, ZHANG K, WANG S B. Modulation performance and control of electro-optic modulator for the dis-

- tributed Brillouin sensing system[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2012, 23(1): 15–20. (in Chinese)
- [15] 宋牟平, 赵斌, 章献民. 基于微波电光调制的布里渊光时域分析传感器[J]. 光学学报, 2005, 25 (8): 1053–1056.
- SONG M P, ZHAO B, ZHANG X M. Brillouin optical time domain analysis distributed optic-fiber sensor based on microwave electrooptic modulation[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25 (8): 1053–1056. (in Chinese)
- [16] 国家市场监督管理总局. 光时域反射计检定规程: JJG 959–2024[S]. 北京: 中国质检出版社, 2024.
- State Administration for Market Regulation. Verification regulation of optical time domain reflectometer: JJG 959–2024[S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2024. (in Chinese)
- [17] WANG F, ZHAN W W, ZHANG X P, et al. Improvement of spatial resolution for BOTDR by iterative subdivision method[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(23): 3663–3667.
- [18] 赵晓东, 路元刚, 胡君辉, 等. 波长扫描型布里渊光时域反射仪[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 805003.
- ZHAO X D, LU Y G, HU J H, et al. A wavelength-scan-
- ning Brillouin optical time domain reflectometer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39 (8): 805003. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨)

第一作者: 孙小强(1984—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事光通信与光纤传感计量测试研究。



通信作者: 张大元(1975—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事通信计量测试和测量仪器开发等研究。

