doi:10.13756/j.gtxyj.2026.250002.
光通信系统与网络技术
王小宇,徐健,黄光明,等.275.3 km无中继超长跨距光传感系统[J].光通信研究,2026(5):75-80.
Wang X Y, Xu J, Huang G M, et al. 275.3 km Ultra-long Span Optical Sensing System without Trunk[J]. Study on Optical Communications, 2026(5):75-80.

# 275.3 km 无中继超长跨距光传感系统

王小宇[1,2],徐 健[1],黄光明[2],李 明[1],朱振宇[1],聂明超[1],徐子雅[1]
(1. 武汉光迅科技股份有限公司,武汉 430205; 2. 华中师范大学 物理科学与技术学院,武汉 430079)

**摘要**:【目的】为突破传统分布式光纤传感技术在传感距离上的限制,提出了一种无中继超长跨距的融合布里渊光时域反射仪(BOTDR)和相位敏感光时域反射仪(φ-OTDR)的分布式光纤传感系统,结合高阶拉曼放大技术和遥泵放大(ROPA)技术,实现了208 km内的无中继长距离传感测量。【方法】系统采用高阶拉曼放大技术和ROPA技术,结合仿真确定远程增益单元(RGU)放置位置,实现了275.3 km实时同步振动和温度传感测量。【结果】实验结果表明,所提系统能同时测量振动和温度,突破了208 km长距传感纪录,达到275.3 km的无中继超长跨距光传感。系统成功恢复了加在链路末端的20 Hz正弦波扰动信号,在频域中的信噪比达到12.3 dB,并且温度测量误差最大为1.14 ℃,控制在1.5%以内。【结论】该混合系统能有效恢复低频正弦信号,具有很高的信噪比及温度测量精度。验证了该系统在海底网络监测和特高压输电线路等领域具有广泛的应用潜力,为长距离基础设施的健康监测提供了一种有效的技术解决方案。
**关键词**:相位敏感光时域反射仪;布里渊光时域反射仪;遥泵放大技术;高阶拉曼放大技术
**中图分类号**:TN929 **文献标志码**:A

## 275.3 km Ultra-long Span Optical Sensing System without Trunk

WANG Xiaoyu[1,2], XU Jian[1], HUANG Guangming[2], LI Ming[1], ZHU Zhenyu[1], NIE Mingchao[1], XU Ziya[1]
(1. Accelink Technologies Co., Ltd., Wuhan 430205, China;
2. College of Physics Science and Technology, Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

**Abstract**:【Objective】Traditional distributed optical fiber sensing systems are limited by their maximum repeaterless detection distance. To break this bottleneck, this paper proposes a hybrid distributed fiber sensing architecture integrating Brillouin Optical Time Domain Reflectometry (BOTDR) and Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry (φ-OTDR). Combined with high-order Raman amplification and Remote Optical Pumping Amplifier (ROPA) technologies, the system overcomes the previous 208 km limit for repeaterless long-distance sensing.【Methods】High-order Raman amplification and ROPA techniques are adopted in the system. Optical simulation is carried out to optimize the layout of Remote Gain Units (RGUs), realizing real-time synchronous vibration and temperature measurement over a 275.3 km fiber link.【Results】Experimental tests verify that the proposed system can simultaneously acquire vibration and temperature data. It extends the repeaterless sensing distance to 275.3 km, exceeding the previous record of 208 km. A 20 Hz sinusoidal disturbance signal injected at the far end of the fiber link is successfully demodulated, with a signal-to-noise ratio (SNR) of 12.3 dB in the frequency domain. The maximum temperature measurement error is 1.14 ℃, with the relative error controlled within 1.5 %.【Conclusion】This hybrid sensing system exhibits good performance in demodulating low-frequency sinusoidal signals, with high signal-to-noise ratio and good temperature measurement precision. It is expected to have broad application prospects for submarine cable monitoring and Ultra High Voltage (UHV) transmission line inspection, and provides an effective technical solution for the health monitoring of long-distance infrastructure.
**Key words**: φ-OTDR; BOTDR; ROPA; high order raman amplification technology

## 0 引 言

全球经济与工业基建持续发展,油气管道、水利大坝、跨海桥梁等长距离基础设施运维需求持续攀升。分布式光纤传感通过解析光纤内光相位、光强变化,全域采集温度和振动参量,为大型构筑物无损在线监测提供高效技术路径[1]。当前长距离光传感系统中主要采用分布式光纤传感技术与光放大技术相结合的方式。拉曼放大技术能有效提高系统功率预算,但单独使用拉曼放大时,由于光纤的非线性效应和泵浦光的衰减,可能会限制其增益效果。另一种研究利用掺铒光纤放大器来延长传感距离[2],但需要中继站才能完成工程实现,本文主要研究点对点的长跨距传感,中间不涉及光电光(Optical-Electrical-Optical,OEO)的转换。

目前大部分无中继光传感系统的传感距离在

收稿日期:2025-01-01; 修回日期:2025-02-05; 纸质出版日期:2026-10-10
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2023YFB2804900)
作者简介:王小宇(2001-),女,江西吉安人。硕士,主要研究方向为光通信系统与光器件。
通信作者:徐健,高级工程师。E-mail: 03292@accelink.com
© Editorial Office of *Study on Optical Communications*. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

208 km 内，然而许多海底网络和特高压网络的无中继传输跨度通常会远超 208 km[3-8]，使得这些环境下的长距离监测工作进展受限。针对距离限制的技术难点，本文提出一种集成相位敏感光时域反射分布式光纤传感技术（Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry，φ-OTDR）和布里渊光时域反射分布式光纤传感技术（Brillouin Optical Time-Domain Reflectometry，BOTDR）的无中继超长跨距光传感系统，在此基础上，融合遥泵放大技术（Remote Optical Pumping Amplifier，ROPA）与高阶拉曼放大技术，并采用超低损耗 EX2500 光纤，将光传感距离扩展至 275.3 km，能够实现对光纤温度与振动的同步传感，极大地突破了分布式光纤传感技术的监测范围，促进了海底网络和特高压交流电网等领域的相关研究。

## 1　技术原理

φ-OTDR 技术利用光纤中的瑞利散射，通过检测光纤中瑞利散射光相位变化来感知光纤沿线的振动信息，从而确定振动的位置和强度[9]。当瑞利散射光通过长度为 $L$ 的传感光纤时，光标准波长为 $\lambda_0$，测量光在光纤中的传播常数为 $\beta$，介质折射率为 $n$，则光的相位延迟可表示为[9]

$$\phi = 2\pi \frac{nL}{\lambda_0} = \beta L。\tag{1}$$

当外部环境产生振动时，瑞利散射光会发生相位延迟 $\Delta\varphi$，其与光纤的折射率、直径以及长度变化有关。对上式求微分，得到 $\Delta\varphi$ 的表达式，其中 $\Delta\varphi$ 包括应变效应引起的光纤长度变化、弹光效应引起的纤芯折射率变化、泊松效应引起的光纤直径变化等因素导致的相位变化，其微分表达式为[10]

$$\Delta\phi = \beta\Delta L + L\Delta\beta = \beta L \frac{\Delta L}{L} + L \frac{\partial\beta}{\partial n}\Delta n + L \frac{\partial\beta}{\partial d}\Delta d,\tag{2}$$

式中，$\Delta n$ 为折射率变化量，$\Delta d$ 为光纤直径变化量，$\Delta\beta$ 为光传播常数变化量，$\Delta L$ 为长度变化量。由于光纤直径的变化量很小，因此可忽略泊松效应带来的影响。同时，$\Delta n$ 与 $\Delta L$ 为线性关系，光纤所受振动强度与附加相位延迟大小也为线性关系，为 φ-OTDR 技术解调瑞利散射信号、定位振动事件提供了理论基础[10-11]。

BOTDR 技术利用布里渊散射来测量光纤中的温度和应变信息，当光信号在光纤内部传输时，会与光纤内部的声子发生相互作用，产生布里渊散射效应。这种散射效应产生的光波频率和原始入射光波频率之间的差异定义为布里渊频移（Brillouin Frequency Shift，BFS）。相较于入射光，散射光频率会发生下移和上移两种情况，进而生成斯托克斯（Stokes）光和反斯托克斯（Anti-stokes）光。在布里渊散射中，Stokes 光和入射光之间的频移关系如下式[11]

$$v_B = \frac{2nv_A}{\lambda_P},\tag{3}$$

式中，$v_B$ 为光纤中声速大小，$n$ 为折射率，$\lambda_P$ 为入射光的中心波长，$v_A$ 为布里渊频移。由于声速大小可表示为[11]

$$v_A = \sqrt{\frac{(1-k)E}{(1+k)(1-2k)\rho}},\tag{4}$$

式中，$k$ 为泊松比，$E$ 为杨氏模量，$\rho$ 为光纤介质密度，将相关物理量和温度 $T$ 与应力 $\varepsilon$ 的关系记作 $E(\varepsilon,T)$、$k(\varepsilon,T)$、$\rho(\varepsilon,T)$、$n(\varepsilon,T)$，即可得到布里渊频移为[11-12]

$$v_B(\varepsilon,T) = \frac{2n(\varepsilon,T)}{\lambda_P}\sqrt{\frac{\left[1-k(\varepsilon,T)\right]E(\varepsilon,T)}{\left[1+k(\varepsilon,T)\right]\left[1-2k(\varepsilon,T)\right]\rho(\varepsilon,T)}},\tag{5}$$

由上述分析可知，可通过测量布里渊频移来计算温度和应变的变化。由式(5)可知，当光纤在松弛状态下发生温度变化时对应的公式为[12]

$$\begin{aligned} v_B(0,T) &= \frac{2n(0,T)}{\lambda_P}\sqrt{\frac{\left[1-k(0,T)\right]E(0,T)}{\left[1+k(0,T)\right]\left[1-2k(0,T)\right]\rho(0,T)}} \\ &\approx v_B(0,T_0)\left[1+\Delta T\left.\frac{\partial v_B(0,T)}{\partial T}\right|_{T=T_0}\right] \\ &= v_B(0,T_0)\left[1+\Delta T(\Delta n_T+\Delta k_T+\Delta E_T+\Delta\rho_T)\right], \end{aligned}\tag{6}$$

假设光纤温度从 20 ℃变化至 40 ℃，入射光波长为 1 550 nm，折射率（$n$）、杨氏模量（$E$）、纤芯密度（$\rho$）和泊松比（$k$）初始值分别设定为 1.45、72.5 GPa、2.2 g/cm$^3$、0.17。这个过程中由于温度引起的折射率（$n$）、杨氏模量（$E$）、纤芯密度（$\rho$）和泊松比（$k$）均随温度进行线性变化，计算得到在该假设下布里渊频移与温度变化的线性相关系数为 1.435 1 MHz/℃，因此布里

渊频移整体上表现出随温度升高而上升的线性趋势，如图 1 所示。图 2 使用三维图展示了上述假设中温度变化如何影响光纤中不同位置的布里渊散射信号的强度和频率，从而可以推断出光纤沿线的温度分布。当 0～2 km 距离内光纤整体受到一致温度变化影响时，光纤沿线上的每一点布里渊散射强度都在随着温度变化发生改变而产生布里渊频移，每一点的布里渊散射信号在发生一致的频率移动。

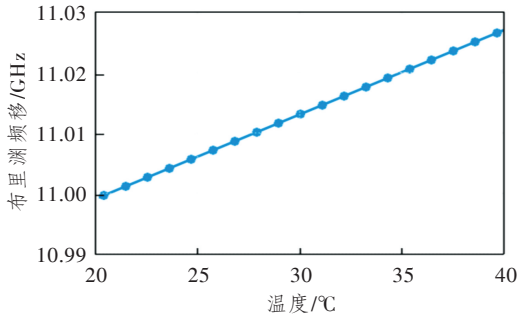



图 1 布里渊频移—温度变化曲线

Figure 1 BFS-temperature curve

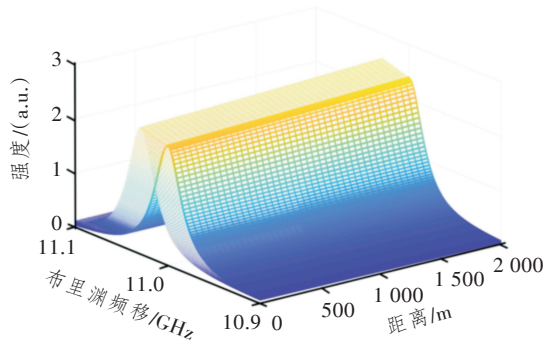



图 2 布里渊三维图

Figure 2 Brillouin three-dimensional diagram

## 2 实验系统设计

本文实验系统旨在实现集成 BOTDR 技术和 φ-OTDR 技术的无中继超长跨距光传感，实验装置图如图 3 所示。采用共用的光源和探测脉冲光生成模块等作为 φ-OTDR 和 BOTDR 技术的核心技术组件。利用相干检测技术来增强性能，使其能够同时检测光纤路径上的温度和振动变化。通过整合 ROPA 技术和高阶拉曼放大技术，成功将系统的监测范围扩展至 275.3 km，实现了长距离光纤传感。

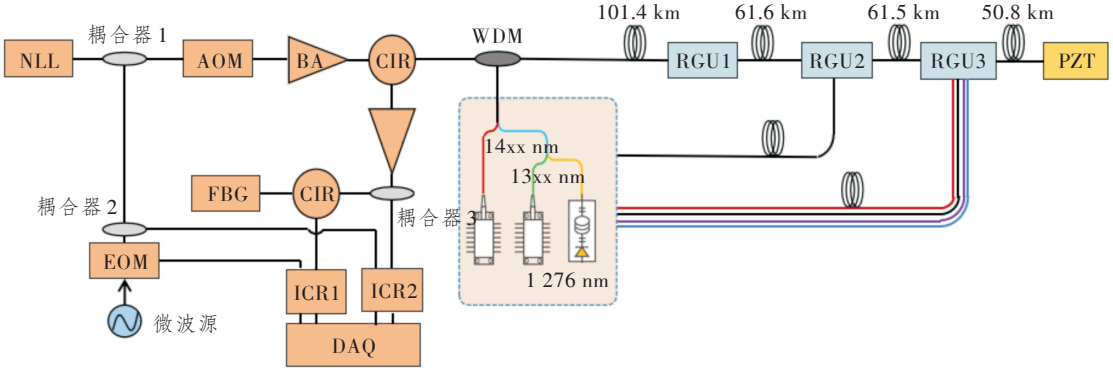



图 3 实验系统示意图

Figure 3 Schematic diagram of experimental setup

实验设置中，使用窄线宽激光器(Narrow Linewidth Laser，NLL)(厂家：光迅科技股份有限公司，型号：12-C34-1K-CW-PM01-Micro-A)作为光信号源，发射光信号中心波长设定为 1 555.75 nm，光信号经过耦合器 1 被分为本征光和探测光两部分。探测光束随后经过声光调制器(Acousto-optic Modulator，AOM)(厂家：光迅科技股份有限公司，型号：_GA-FCAOM-1555-M80-SM-MN1)进行频率调制产生宽度为 500 ns 的脉冲信号，经过功率放大器(Booster Amplifier，BA)增强后，由一个环形器(Circulator，CIR)被送入待测光纤中。由于布里渊频移大约为 10 GHz 左右，电光调制器(Electro-optic Modulator，EOM)(厂家：光迅科技股份有限公司，型号：_MZ1533-10-K)具有更宽的调频范围，因此本征光进一步分割后其中一部分需通过 EOM 进行调制，由微波源提供驱动信号，产生约 10.8 GHz 的频移作为 BOTDR 的参考光进入第一个集成相干接收器(Integrated Coherent Receiver，ICR)(厂家：光迅科技股份有限公司，型号：ICR-C-0.2-1/1-LC/APC-1)，另一个分支作为 φ-OTDR 的参考光，接入 250 MHz 带宽的 ICR。带有传感信息的散射光信号经环形器接入前置放大器(Pre-Amplifier，PA)与耦合器 3 完成放大和分光。为在 BOTDR 支路中滤除瑞利散射光的影响，一束光经过左边带为 1 555.797 nm 的光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Gratings，FBG)(厂家：TeraXion，

型 号 ：PWS-CUS-1555.797-0.127-95-CMS-C1）滤波降噪后作为 BOTDR 支路探测光与 EOM 输出的本振光进入第一个 ICR，另一束光作为 φ-OTDR 支路探测光与耦合器 2 输出的上行本振光进入第二个 ICR，经光电转换后由数据采集卡进行数据采集，再通过算法进行降噪和解调来计算得到最终结果。

系统进一步采用波分复用器（Wavelength Division Multiplexing，WDM）将传感脉冲信号和高阶拉曼泵浦光波长复用后注入光纤。为延长系统的传输距离，系统中配置了三个高阶拉曼泵浦单元，这些单元采用 1 270～1 480 nm 的五种泵浦波长，包含 1 276 nm、1 340 nm、1 360 nm、1 473 nm 和 1 480 nm。通过多次斯托克斯偏移在光纤中产生级联效应，提高了远程增益单元（Remote Gain Units，RGU）的输入泵浦光功率，从而增强了系统功率预算。为将传输距离进一步提升，实验采用 ROPA 技术配置 3 个 RGU，分别放置于距发送端 101.4 km、163 km 和 224.5 km 的位置，其泵浦光由前端的高阶泵浦光远程提供。RGU1 的泵浦光与传感信号光共用一根光纤进行传输，以实现高效的光功率传输。RGU2 和 RGU3 则通过与传感信号传输光纤长度相匹配的专用旁路光纤进行接收泵浦光，RGU2 占用 1 根旁路光纤，RGU3 占用 4 根旁路光纤，确保了泵浦光的独立性和稳定性。

在本实验中，对系统的各节点光功率、放大器峰值功率以及 RGU 增益大小等关键性能指标进行分析，优化了拉曼增益，以实现系统性能的最大化，再根据近端信号波形的失真情况来对 RGU 的摆放位置进行精确布局。为确保信号在放大前的质量和解调的准确性，以及满足传感所需的信噪比（Singal Noise Ratio，SNR）要求，实验中对 RGU 的位置进行了优化。具体来说，第 1 级 RGU 的最佳位置被确定在 101.4 km 处以最大化传感距离，同时保证信号质量。对于第 2、3 级 RGU，考虑了随路残余泵浦光对其激发的影响，同时采用旁路泵浦方式，把信号光和泵浦光用不同的线路进行传输，利用传输后剩余的泵浦光来全面评估传感性能。最后确定第 2 级 RGU 的最佳位置为 163 km 处，第 3 级 RGU 放置在 224.5 km 处，以充分利用残余泵浦光。在本系统中，传感脉冲的发送光功率（包含拉曼开关增益）为 26.5 dBm，而高阶拉曼泵浦单元输出功率为 8 472 mW，其中 1 276 nm 的输出功率为 7 079 mW，1 340 nm、1 360 nm 的输出功率为 836 mW 和 1 473 nm，1 480 nm 的输出功率为 557 mW。RGU1 至 RGU3 接收到的残余泵浦光功率分别为 20.5 mW、5 mW 和 1.6 mW，精确的功率控制确保了系统能够在 275.3 km 无中继条件下实现振动和温度的光传感。

## 3　实验结果与讨论

实验中传输光纤总长为 275.3 km，光纤色散系数≤22 ps/nm·km，平均有效面积 125 μm²，平均损耗系数为 0.145 dB/km。图 4 所示为数据采集卡得到的光功率值分布，在高阶拉曼放大和 3 个 RGU 的共同作用下，传感信号光功率得到了显著增强，信号经过 RGU1-3 分别增益为 8.94 dB、8.44 dB、4.58 dB，从而扩展传感范围。为全面评估所提系统在振动监测方面的性能，实验在传输光纤链路的末端安装了一个压电换能器（Piezo-electric Transducer，PZT），其缠绕了 10 m 的光纤。通过施加外部激励信号产生振动，进而在光纤中产生相应的动态应变。这一过程导致 φ-OTDR 系统中的探测脉冲光在瑞利散射过程中经历相位变化，从而实现对振动事件的监测。PZT 被振幅为 1 V 的正弦波信号激励，其压电系数为 200 μm/V，确保了光纤缠绕的有效性。通过对末端采集的振动信号进行 IQ 解调和数据处理，获得了 PZT 区域的相位瀑布图，如图 5 所示。该图清晰地显示了振动区域的扰动曲线，验证了系统能够精确识别位于 275.3 km 处的振动事件，同时在无振动区域保持相位的稳定性。

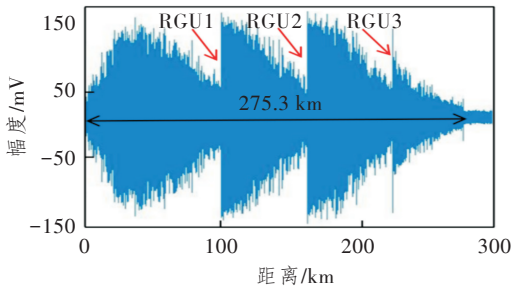



图 4　信号幅度分布图

Figure 4　The optical spectrum of signal

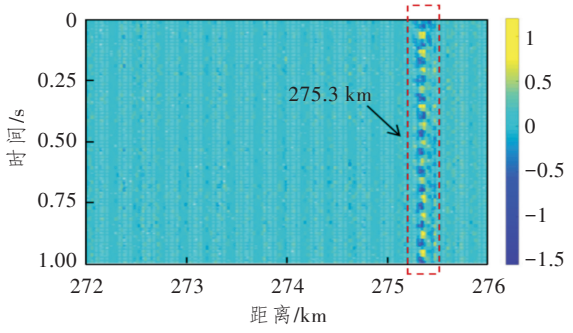
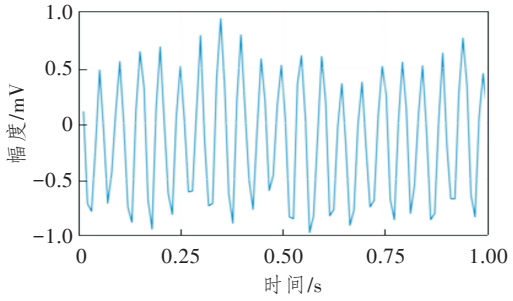



图 5　相位瀑布图

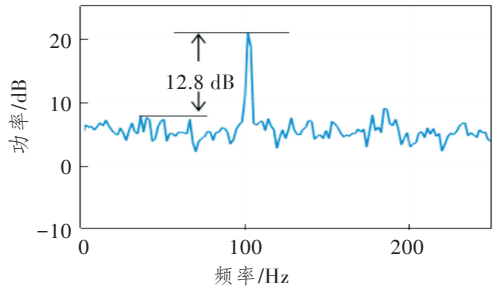
Figure 5　Map of the distribution of the vibration

进一步地，实验中对 PZT 施加了不同频率的正弦扰动信号并进行还原，重构信号如图 6、7 所示）。




（a）时域图

（a）Time domain map

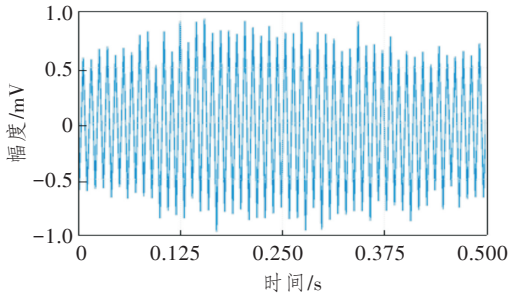



（b）频域图

（b）Frequency domain diagram of time-domain signal

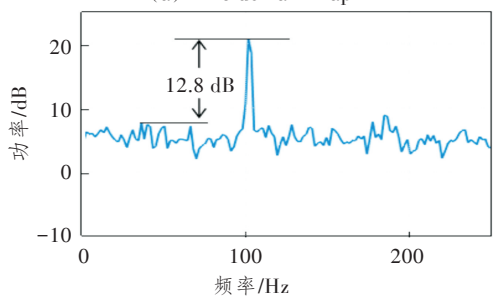
图 6　20 Hz 信号重构结果

Figure 6　20 Hz Signal reconstruction result




（a）时域图

（a）Time domain map




（b）频域图

（b）Frequency domain diagram of time-domainsignal

图 7　100 Hz 信号重构结果

Figure 7　100 Hz Signal reconstruction result

结果显示，所提出的混合分布式光纤传感系统能够成功恢复振动波形。通过应用傅里叶变换对解调后的信号进行频谱分析，得到了振动信号的频率相位幅度谱。结果表明，系统恢复的 10 Hz 振动信号具有 12.3 dB 的信噪比，100 Hz 振动信号具有 12.8 dB 的信噪比，这一指标证实了系统在振动监测方面的高灵敏度和准确性。

为详细评估所提系统的温度监测能力，设置扫频范围为 9～12 GHz，采用 2 MHz 的扫频步进来对传感设备采集的布里渊散射信号进行分析，通过执行 1 000 次平均，利用洛伦兹最小二乘法拟合算法处理收集到的信号，从而精确地描绘了沿光纤线路的 BFS 分布，分布结果如图 8 所示。通过分析图中 BFS 的变化特征，能够直观地识别出温度变化区域、光纤熔接点的位置以及 3 个 RGU 的确切位置。为进一步量化系统的温度传感性能，实验在传感光纤链路的末端部署了一个加热台，构造一个较为均匀的温度场，在加热台上安装了 100 m 的光纤环。通过调整加热台的温度设置，改变光纤环所在区域的温度，进而观察到该区域内光纤的折射率和声速随着温度变化而发生的变化。这些变化通过 BFS 的偏移量被精确捕获，从而计算出温度变化量。通过拟合得到了布里渊频率偏移与温度变化之间存在线性关系，其线性相关系数为 1.196 55 MHz/℃。这一数值反映了布里渊频移对温度波动的灵敏性。同时将末端光纤由 35 ℃加热至 75 ℃，并每隔 10 ℃利用系统进行温度测量，最终得到实验的测量误差最大为 1.14 ℃，控制在 1.5% 以内，结果如图 9 所示。

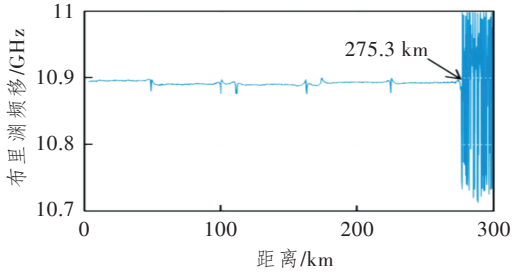



图 8　全线 BFS 图

Figure 8　Full line BFS diagram

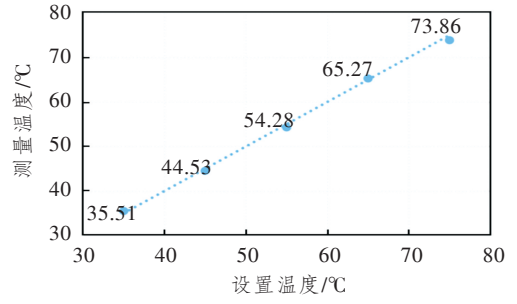



图 9　温度测量结果图

Figure 9　Temperature measurement results diagram

## 4　结束语

本文展示了一个无中继超长跨距分布式光纤传感系统，该系统融合了BOTDR和φ-OTDR技术，实现了温度和振动的同步监测。采用ROPA技术，结合高阶拉曼放大器和级联RGU，实现了275.3 km的传感距离。利用φ-OTDR技术，准确地恢复了20 Hz和100 Hz的正弦波振动信号，其频域信噪比达到了12.3 dB和12.8 dB，在振动监测方面具有较高的准确性和灵敏度。同时，利用BOTDR技术在温度监测方面实现测量误差在1.5 %以内，这一精度水平对于许多高精度监测应用而言至关重要。本系统的设计和实现，显著提升了BOTDR和φ-OTDR技术的无中继传感距离，使其能够满足海底通信网络、特高压输电线路以及其他长距离监测需求，不仅证明了分布式光纤传感技术在长距离监测方面的潜力，也为未来在更广泛领域的应用奠定了坚实的基础。此外，本系统设计还考虑了实际应用中的成本和复杂度，通过优化系统配置，实现了性能与经济性的平衡，该系统将有望在智能电网、海洋观测和环境监测等多个领域发挥重要作用。

**参考文献：**


[1] 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)：0106001.
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)：0106001.

[2] Fan C，Li H，Institute H R，et al. 300 km Ultralong Fiber Optic DAS System based on Optimally Designed Bidirectional EDFA Relays[J]. Photonics Research，2023，11(6)：968.

[3] Chen D，Liu Q，He Z. 108-km Distributed Acoustic Sensor With 220-pε/√Hz Strain Resolution and 5-m Spatial Resolution[J]. Journal of Lightwave Technology，2019，37(18)：4462–4468.

[4] 章诗宇，吴江，李明，等. 基于ROPA技术的超长跨距φOTDR传感系统[J]. 光通信研究，2024(2)：220076.
Zhang S Y，Wu J，Li M，et al. Ultra Long Span φOTDR Sensing System based on ROPA Technology[J]. Study on Optical Communications，2024(2)：220076.

[5] Ali Allousch M，Crickmore R，North T，et al. Repeaterless Distributed Acoustic Sensing Using Phase-OTDR with All-Optical Amplification for 200 Km Sensing Range[C]//28th International Conference on Optical Fiber Sensors. Hamamatsu-shi，Japan：Optica Publishing Group，2023：Tu3.29.

[6] Wang Y，Wang Y，He C，et al. 190km Φ-OTDR with Bidirectional Raman and Relay Erbium-Doped Fiber Hybrid Amplification[J]. Optics and Lasers in Engineering，2023，166：107569.

[7] Cedilnik G，Lees G，Schmidt P E，et al. Pushing the Reach of Fiber Distributed Acoustic Sensing to 125 Km without the Use of Amplification[J]. IEEE Sensors Letters，2019，3(3)：5000204.

[8] Liu J，Li M，Xu J，et al. 208km Ultra-Long Single Span Hybrid BOTDR and Φ-OTDR with ROPA Technology[C]//2023 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Diego，CA，USA：IEEE，2023：10116637.

[9] 田彬. 长距离光纤分布式声波传感关键技术研究[D]. 武汉：华中科技大学，2021.
Tian B. Research on Key Technologies of the Ultra-Long Fiber Optic Distributed Acoustic Sensing[D]. Wuhan：Huazhong University of Science and Technology，2021.

[10] Xiong J，Wang Z，Wu Y，et al. Long-Distance Distributed Acoustic Sensing Utilizing Negative Frequency Band[J]. Optics Express，2020，28(24)：35844–35856.

[11] 张旭苹. 全分布式光纤传感技术[M]. 北京：科学出版社，2013.
Zhang X P. Distributed Optical Fiber Sensing Technology[M]. Beijing：Science Press，2013

[12] Sun X，Yang Z，Hong X，et al. Ultra-Long Brillouin Optical Time-Domain Analyzer based on Distortion Compensating Pulse and Hybrid Lumped-Distributed Amplification[J]. APL Photonics，2022，7(12)：126107.