光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024071802

分布式光纤多参数融合传感系统研究

赵航航[1]，张明红[2]，范　敏[1]，朱　阳[1]，王　宁[1]，
陈庆鹏[1]，王佳明[1]，李玉华[3]，袁孝红[3]，尹国路[2*]

（1. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司广州局，广州 510600；
2. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室，重庆 400044；
3. 重庆东电通信技术有限公司，重庆 401121）

摘　要： 提出一种融合布里渊光时域反射仪(BOTDR)和相敏光时域反射仪(φ-OTDR)的集成多参数传感系统，该系统可同时测量传感光纤的温度、应变和振动信息。设置双外差探测结构对信号进行多路复用，并且优化了散射光分光比。当传感距离为 8.6 km 且空间分辨率为 3 m 时，该系统温度和应变的测量精度分别为 0.48 ℃和 18.15 με，振动测量结果表明，其具有 5 kHz 的最大频率响应和 100 Hz 下 8.48 nε/√Hz 的动态应变分辨率。

关键词： 多参数；外差探测；布里渊散射；瑞利散射

中图分类号： TP212.1　**文章编号：** 1001－5868(2024)06－1024－07

Research on Distributed Fiber Optic Multi-parameter Fusion Sensing System

ZHAO Hanghang[1], ZHANG Minghong[2], FAN Min[1], ZHU Yang[1], WANG Ning[1],
CHEN Qingpeng[1], WANG Jiaming[1], LI Yuhua[3], YUAN Xiaohong[3], YIN Guolu[2]

(1. China Southern Power Grid EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510600, CHN; 2. The Key Lab of Optoelectronic Technology and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, CHN; 3. Chongqing Dongdian Communication Technology Co., Ltd., Chongqing 401121, CHN)

Abstract: This paper presents an integrated multi-parameter sensing system that combines a Brillouin optical time domain reflectometer (BOTDR) and phase sensitive optical time domain reflectometer (φ-OTDR) to simultaneously measure temperature, strain, and vibration information of the sensing fiber. A double heterodyne detection structure was set up to multiplex the signal, and the scattered light splitting ratio was optimized. For a sensing distance of 8.6 km and spatial resolution of 3 m, the temperature and strain measurement accuracy of the system are 0.48 ℃ and 18.15 με, respectively. The vibration measurement results show that the system has a maximum frequency response of 5 kHz and a dynamic strain resolution of 8.48 nε/√Hz at 100 Hz.

Key words: multi-parameter; heterodyne detection; Brillouin scattering; Rayleigh scattering

0　引言

分布式光纤传感器(DOFS)作为一种新型传感技术，在过去几十年得到了重点关注和广泛发展。DOFS 可以实时分布式感知待测光纤全段各位置处的温度、应变以及振动等物理参数的变化，具有远距离测量、抗电磁干扰等优点[1]，在地球物理、国土安全、结构健康监测等领域具有广阔前景[2-3]。

收稿日期：2024－07－18.
基金项目：中国南方电网有限责任公司超高压输电公司科技项目(10100KK52222006).
* **通信作者：**尹国路

根据不同的测量原理，布里渊光时域反射仪（BOTDR）主要被用于温度和静态大范围应变测量，而相敏光时域反射仪（φ-OTDR）则适于振动和动态应变测量[4]。然而在越来越多的工程应用中，比如管道监测、高压输电线监测等需要同时测量温度振动和应变等，以便进行早期预警功能[5-7]。BOTDR 传感距离较长，能够获取不同位置处的温度和应变信息，但耗时较长。尽管最近提出了多种技术大大缩短单次测量的时间[8-9]，但却限制了系统频率响应范围。而 φ-OTDR 具有高灵敏度动态振动传感能力，恰好弥补了 BOTDR 只适用于静/准动态测量的不足。2021 年 Coscetta 等使用可调谐光纤布拉格光栅将布里渊散射光和瑞利散射光分开独立探测[10]，在 200 m 的传感距离下同时测量温度和振动，空间分辨率和温度精度分别为 2 m 和 0.1 ℃，然而瑞利信号的直接检测限制了信噪比（SNR）和相位的提取。2016 年，朱涛等基于脉冲调制技术在高重复频率 φ-OTDR 探测脉冲序列中插入用于 BOTDR 测量的低重频脉冲，实现了 10 km 测量距离下 3 m 振动响应空间分辨率和±1 ℃的温度传感精度[11]。2022 年美国海军实验室利用波分复用方法来融合 φ-OTDR 和 BOTDA 传感系统，由于使用具有一定波长间隔的两个探测光源，产生的布里渊散射光和瑞利散射光经过 WDM 被分离[12]，在 500 m 传感距离下准静态温度分辨率为 16 m℃，应变分辨率为 140 nε，空间分辨率为 5 m。类似的还有采用多芯光纤也可以实现 BOTDA 和 φ-OTDR 系统的融合感知[13]，但却要求特殊光纤的使用。

本文提出了一种基于双外差探测的融合 BOTDR 和 φ-OTDR 传感系统，将单脉冲的后向散射光直接分光进入不同通道并设置双外差探测结构，独立提取得到布里渊和瑞利散射信号。另外对比了后向散射光在不同分光比下的测量精度，以平衡 BOTDR 和 φ-OTDR 的传感性能。最后，在 8.6 km 的传感距离下，实现了 0.48 ℃和 18.15 με 的温度和应变测量精度，具有 0～5 kHz 的振动响应范围，二者空间分辨率均为 3 m，这充分表明该融合系统具有多参数传感的能力。

1　基本原理

1.1　融合 BOTDR 和 φ-OTDR 的多参数传感原理

融合 BOTDR 和 φ-OTDR 的多参数传感系统概念设计如图 1 所示，基于单个探测脉冲输入来测量传感光纤参数，因此后向散射光中同时包含瑞利散射光（RBS）和自发布里渊散射光（SpBS）。然后直接将混合光信号通过 3 dB 耦合器分为两路，与之对应的设计双外差探测结构，分别与两路信号光进行拍频，然后被独立的光电探测器接收。

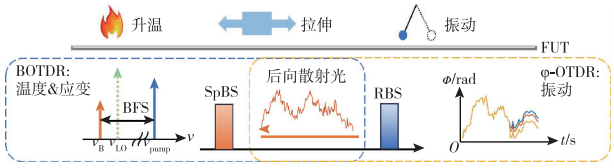


图 1　融合 B/φ-OTDR 的混合多参数传感概念图

对于 BOTDR 子系统，由于光纤中的介质粒子在热运动下会产生沿光纤前向或后向传输的自发声场，周期性调制光纤折射率，形成纵向传播的声波光栅。根据多普勒效应，会产生频率下移的斯托克斯光和频率上移的反斯托克斯光，二者相对于入射光频 ν_{pump} 具有相同的频率差值，被称为布里渊频移（BFS），用 ν_{B} 来表示[14]，即：

$$\nu_{\mathrm{B}}=\frac{2nV_{\mathrm{A}}}{\lambda_{\mathrm{p}}}=\frac{2n}{\lambda_{\mathrm{p}}}\sqrt{\frac{(1-\kappa)E}{(1+\kappa)(1-2\kappa)\rho}} \tag{1}$$

式中，λ_{p} 表示入射光的波长，声波速率 V_{A} 与杨氏模量 E、泊松比 κ 以及纤芯介质密度 ρ 有关，同时受到光纤温度和应变的影响。在一定范围内 BFS 与应变和温度变化量呈线性相关[15]，如式(2)所示，其中 c_{11} 和 c_{12} 分别为对应的应变和温度系数。

$$\Delta\nu_{\mathrm{B}}=c_{11}\Delta\varepsilon+c_{12}\Delta T \tag{2}$$

φ-OTDR 采集后向瑞利散射光，通过提取光信号的相位差变化[16]从而重构出光纤振动响应。振动会导致光纤的纵向应变变化，并且在弹光效应影响下，光纤折射率也随之改变。对于间距为 L 的两散射点 z_1，z_2，发生振动时相位变化可表示为[17]：

$$\Delta\varphi=\varphi'_{z_1,z_2}-\varphi_{z_1,z_2}=2(\beta\Delta L+L\Delta\beta)=$$
$$2\left(\frac{2\pi}{\lambda}n\Delta L+L\frac{2\pi}{\lambda}n_{\varepsilon}\Delta n\right)=\frac{4\pi}{\lambda}(n+n_{\varepsilon})L\Delta\varepsilon \tag{3}$$

式中，n_{ε} 是折射率的应变系数，并且相位变化 $\Delta\varphi$ 与应变变化量 $\Delta\varepsilon$ 成正比关系。

1.2　布里渊和瑞利散射光的双外差探测原理

由于后向布里渊散射光和瑞利散射光在频域上相差 11 GHz 左右。因此，需要选择适当的信号接收方案。外差探测相较于直接探测，可以使光电探测器接收功率更强的拍频光信号，能够提高信噪比，同时对于融合系统也具有良好的结构兼容性。

在外差探测融合系统中，需要设置参考光

$E_{LO}(t)$与信号光相互拍频，信号光同时包含布里渊散射光 $E_B(t)$和瑞利散射光 $E_R(t)$，它们分别表示为：

$$E_{LO}(t)=A_{LO}\exp j(2\pi\nu t)$$
$$E_B(t)=A_B(t)\exp j[2\pi(\nu+\nu_B)t+\varphi_B(t)]$$
$$E_R(t)=A_R(t)\exp j[2\pi(\nu+\Delta f)t+\varphi_R(t)] \quad (4)$$

式中，A_{LO}，$A_B(t)$和 $A_R(t)$分别为本振光和信号的幅值，ν 是准单色光的频率，Δf 由半导体光放大器产生，$\varphi_B(t)$和 $\varphi_R(t)$为附加相位[18]。不同于瑞利散射，由于普通单模光纤的 ν_B 通常约为 11 GHz，当使用外差探测结构提取后向布里渊散射光信号时，为了减小光电探测器的带宽需求，在该参考光光路中添加调频模块，调制频率为 ν_{ref}，再与布里渊散射光进行拍频。两个独立的光电探测器分别对应接收布里渊信号和瑞利信号[19]，其输出电流的大小与拍频光的交流部分成正比，即：

$$I_B(t)\propto 2A_B(t)A_{LO}\cos(2\pi\nu' t+\varphi_B(t))$$
$$I_R(t)\propto 2A_R(t)A_{LO}\cos(2\pi\Delta f t+\varphi_R(t)) \quad (5)$$

式中，$\nu'=\nu+\nu_B-\nu_{ref}$ 在百兆赫兹量级。双外差探测结构的设计降低了布里渊散射光的检测带宽，因而 BOTDR 信噪比得以提高，同时 φ-OTDR 对于瑞利散射光的相位信息也能很好地提取。

2 实验装置

图 2 展示了本文设计的基于双外差探测的 BOTDR 和 φ-OTDR 融合型多参数传感系统实验装置图。光源选择中心波长为 1 550.12 nm，线宽为 3 kHz 的窄线宽激光器(Laser)，经 80∶20 的光纤耦合器(Coupler)分成两路。在上分支中，连续光由任意函数发生器(AWG)驱动的半导体光放大器(SOA)调制为探测脉冲光，同时提供大约 50 dB 消光比，再经过光放大器(EDFA)放大并滤除自发辐射噪声后通过环形器注入待测光纤中。下分支光被 50∶50 耦合器分为两部分，分别作为 BOTDR 和 φ-OTDR 的本征参考光。在 BOTDR 的参考光路中，射频源(RF)控制电光调制器(EOM)对本征光频率产生 10.3 GHz 移频，其值接近布里渊频移，并使用快速扰偏器(PS)改变布里渊参考光的偏振态来减轻 SpBS 过程中偏振失配的影响。同样，环形器 3 端口输出的后向散射光也被分为两部分，分别与对应的参考光进行拍频。使用两个独立的 1.6 GHz 带宽平衡光电探测器(BPD)分别采集布里渊和瑞利散射信号，输出由双通道高速数据采集卡(DAQ)同步采集，采样率为 2 GSa/s。

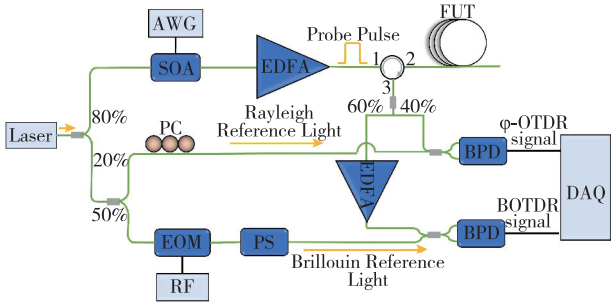


图 2 基于双外差探测的多参数传感实验装置

该装置中，大多数组件都经过多路复用，以传输检测 BOTDR 和 φ-OTDR 信号，与单 BOTDR 的结构相比，仅添加了额外的 PC 光路和另一个光电探测器。使用短时傅里叶变换 STFT 对原始布里渊信号的时域信息进行处理，得到各个位置的布里渊增益谱(BGS)后再通过洛伦兹最小二乘法拟合得到布里渊中心频率。运用数字正交相位检波的方法可以获得瑞利信号的相位，先做希尔伯特变换[20]，再通过解卷绕恢复相位差值从而重构出振动事件。

3 试验结果与讨论

为验证混合系统的多参数传感性能，进行了温度、应变和振动的综合测量实验。实验光纤设置如图 3 所示。在总长为 8.6 km 光纤末端附近，将周长约为 10 m 的光纤环放入温度分辨率为 0.1 ℃的水浴锅中加热，在室温 16 ℃的环境下，加热段温度从 30 ℃步进至 70 ℃。将另一段 2 m 的光纤两端固定在水平位移台上，拉伸以产生不同的光纤应变。同时最后一段 5 m 的光纤缠绕在压电陶瓷(PZT)管上，由任意波形发生器驱动，可施加不同频率和强度的振动状态。三种状态之间间隔 10 m 无任何处理的光纤，避免了相互之间的串扰影响。实验中激光器输出功率为 20 mW，调制探测脉冲宽度为 30 ns，对应 3 m 的空间分辨率，同时根据光纤长度将脉冲重复频率设置为 10 kHz。

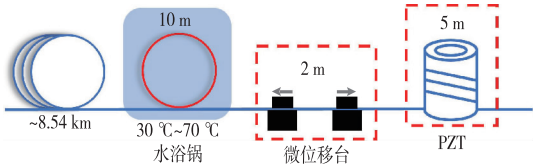
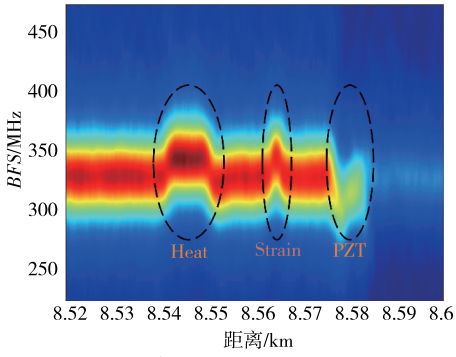


图 3 多参数传感实验中传感光纤的设置示意图

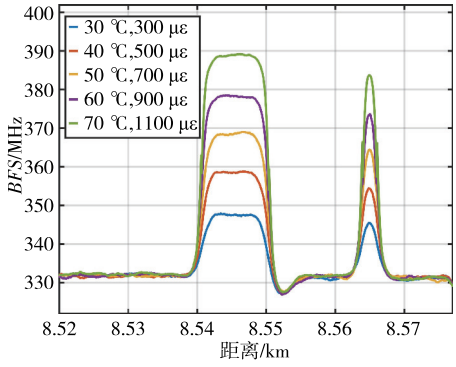
3.1 温度、应变测量结果

首先，展示 BOTDR 的测量结果，通过 STFT

处理采集到的布里渊拍频光，设置窗口长度为 60 个采样点，在施加 30 ℃温度和 300 με 应变的情况下得到的光纤末端 BGS 如图 4(a)所示，同时参考光拍频频率为 10.3 GHz，图中频率为在实际布里渊频移下变频的结果。该图表明了后向布里渊散射光沿传感光纤的频率变化，其强度为不同频率成分的大小，各位置的频率分布符合洛伦兹形状，再通过洛伦兹拟合算法提取出中心频率 BFS。可以看到相对于其他未处理段光纤，温度和应变均会引起 BGS 在频域上的明显移动，然而在 PZT 处施加的振动信号导致的光纤应变通常在 nε 量级，且为高频动态响应，因此无法通过 BOTDR 正确解调。根据 BGS 拟合得到光纤各位置处的布里渊中心频率，BFS 结果如图 4(b)所示。水浴锅的温度从 30 ℃上升到 70 ℃，同时调节水平微动台使施加应变从 300 με 逐步增加至 1 100 με，考虑到 BFS 与温度和应变的线性关系，可以清楚地看到沿光纤的 BFS 在不同实验条件下的不同增量变化。解调后的 BFS 变化区域宽度分别为 10 和 2 m，与实验光纤长度一致，同时观察其上升下降沿得出空间分辨率约为 3 m，对应了 30 ns 的脉冲宽度。



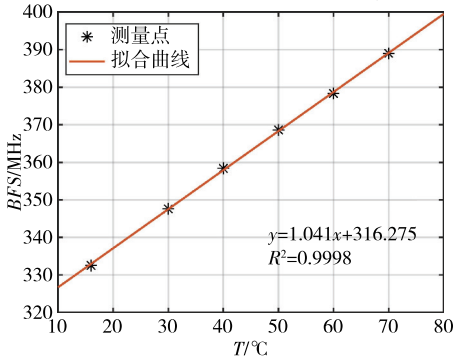
(a) 光纤末端 30 ℃和 300 με 时的 BGS



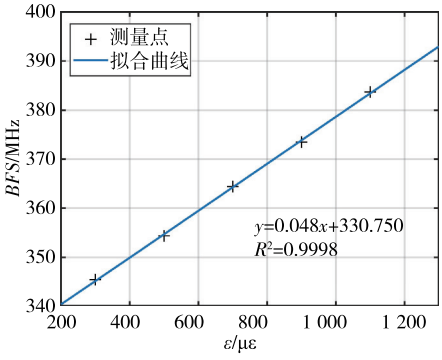
(b) 不同设置下拟合的 BFS 变化

图 4　BOTDR 的测量结果

在设置的不同温度环境和应变拉伸下，经过 10 次采集 BFS 数据进行平均测量，得到温度和应变测试段的实际测量结果。图 5(a)和(b)中的标记点和曲线分别代表了测量的 BFS 值以及与温度/应变的线性拟合情况。通过拟合直线的斜率可知，光纤布里渊频移的温度系数和应变系数分别为 1.041 MHz/℃和 0.048 MHz/με，该值与普通单模光纤的理论值相近。同时，计算它们的线性相关系数，均为 0.999 8，即传感光纤的 BFS 与该位置处的温度和应变之间具有良好的线性关系。对 10 次重复采集的作用段 BFS 数据计算求取标准差，得出最大波动值分别在 60 ℃和 1 100 με 取得，为 0.502 和 0.871 MHz，再根据上述的拟合系数即测量灵敏度，得到最大温度测量误差为 0.48 ℃，最大应变测量误差约为 18.15 με。



(a) 加热温度与 BFS 的关系



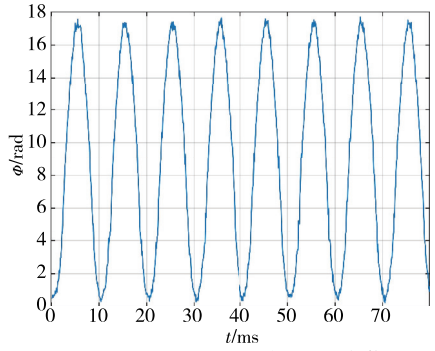
(b) 拉伸应变与 BFS 的关系

图 5　加热温度和拉伸应变与 BFS 的关系

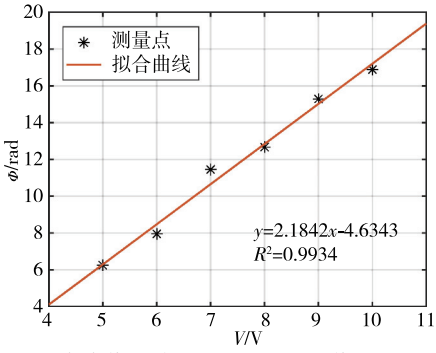
3.2　振动测量结果

同时，对于另一探测支路采集的 φ-OTDR 原始数据，处理提取光纤振动区域瑞利散射光的相位信息。当频率为 100 Hz 的正弦振动信号加载到 PZT 上时，解调出的相位信号正确恢复了振动信息，如图 6(a)所示。并且在保持振动频率不变的情况下，调节 PZT 的驱动电压从 5 V 增加到 10 V，结果如图 6(b)所示。由于光纤紧密缠绕在 PZT 上，当只改变施加电压时，振动频率不变而振幅改变，从而引起光纤应变线性变化。又根据公式(3)可以得出解调相位应与应变变化成正比，因此相位信号解调幅度与

PZT 驱动电压之间呈现良好的线性关系。由于 PZT 周围缠绕的光纤长度为 5 m，光纤拉伸系数为 0.424 μm/V。因此，当 PZT 施加 100 Hz，10 V 的电压时，计算出的声波诱发应变为 0.848 με，对应的应变分辨率为 8.48 nε/√Hz。



(a) 100 Hz 正弦振动的解调相位信号



(b) 峰峰值相位与 PZT 电压幅值的关系

图 6 光纤振动区域瑞利散射光的相位信息

为进一步验证混合多参数传感系统的振动测量动态响应范围，分别使用 100 Hz，1 kHz，2.5 kHz 以及 4.8 kHz 不同频率的正弦信号驱动 PZT，归一化结果如图 7 所示。各种频率成分在解调 RBS 的相位信息后均可被检测，同时考虑到脉冲重复频率为 10 kHz，因此振动的最大频率测量范围为 5 kHz。同时针对实验结果的低频本底噪声较大现象，实验使用了小波去噪[21]去除该不利影响。

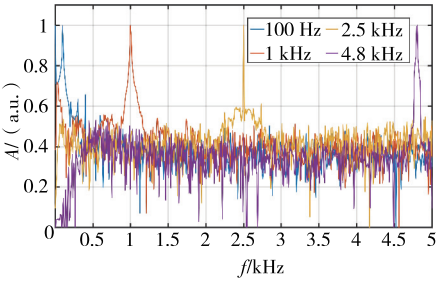
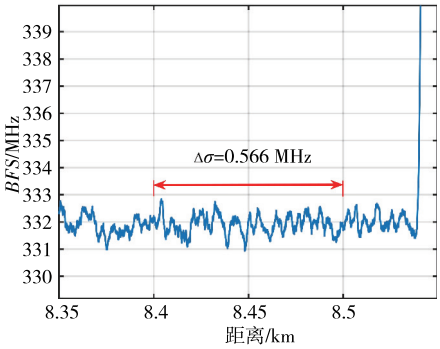


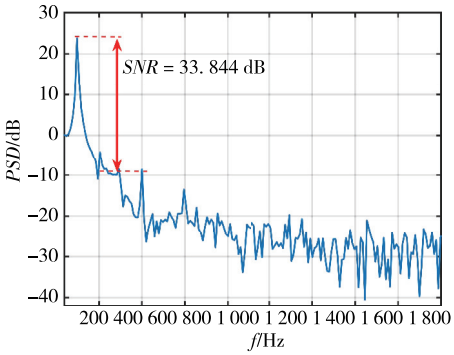
图 7 不同 PZT 驱动频率下的归一化振动解调结果

3.3 分析与讨论

根据第 2 节中的实验装置，使用双外差检测结构将后向散射光分成两部分，然而瑞利散射的原始信号强度一般大于布里渊散射光，因此有必要确定合适的分光比来优化 BOTDR 和 φ-OTDR 的传感性能。实验保持探测脉冲的峰值功率恒定并接近受激布里渊散射(SBS)阈值，以确保 SpBS 和 RBS 的最大强度。首先，对于温度、应变传感，通过对 8.4～8.5 km 段光纤 BFS 拟合数据计算其标准差，重复 10 次后取平均得到 BFS 的测量不确定度 Δσ，如图 8(a)所示为 60%分光比测量结果。图 8(b)展示了 40%分光下 φ-OTDR 测量 100 Hz 振动信号的功率谱密度(PSD)，由图可知，此时的信噪比 SNR 达到了 33.84 dB。



(a) BFS 的测量不确定度表示



(b) 解调 100 Hz 正弦振动的功率谱密度

图 8 光纤 BFS 拟合数据计算分光比测量结果

为进一步研究 SpBS 和 RBS 强度对多参数测量结果的影响，测试了具有不同分光比的耦合器，对比在信号光不同分量下 BFS 测量不确定度和信噪比的变化，如图 9 所示。在 BOTDR 子系统中，相对较大的分光比会带来更低的 BFS 测量不确定度增量，并且随着分光比的降低，其值会逐渐增加，尽管使用了 EDFA 来放大布里渊散射光，但在分光比为 20%时仍然显著恶化。当进行振动测量并且在信号光占比为 40%以上时，解调信号的 SNR 稳定保持在较高的水平，仅当 RBS 强度非常低时才会急剧下降。因此，选择 BOTDR 和 φ-OTDR 的后向散射光

分光比分别为 60%和 40%，是多参数传感系统较为均衡的一种组合。

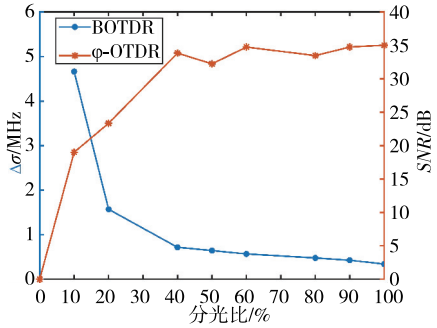


图 9　不同后向散射光分光比下的 BFS 不确定度和振动信号信噪比

由于 SpBS 和 RBS 信号均对应变变化敏感，并且相比于 BOTDR，基于瑞利散射的 φ-OTDR 技术在应变分辨率和探测信号带宽等方面更具优势。φ-OTDR 通过一段时间连续测量得到相对应变而非绝对应变，BOTDR 能实现静态应变的绝对量解调，但应变分辨率为 με 量级，很难提升到 φ-OTDR 对应的 nε 量级应变分辨率。因此，通过融合两种测量方式并利用算法处理，有望充分结合各自的优点来提高动态高精度应变传感性能，具有实现分布式大动态高精度应变的绝对测量潜力。

4　结论

提出一种基于双外差探测结构的 BOTDR 和 φ-OTDR 混合多参数传感装置，可以同时单端测量传感光纤的温度、应变和振动信息。实验展示了该多参数传感系统在 8.6 km 光纤末端具有 0.48 ℃的温度测量误差和 18.15 με 应变测量误差；同时还具有测量不同频率动态振动的能力，实现了最大 5 kHz 的频率响应，当测量 100 Hz 信号时，振动应变分辨率为 8.48 nε/$\sqrt{\text{Hz}}$。

参考文献：

[1] 夏　猛，汤晓惠，王　颖，等. 基于 BOTDA/R 的在运光纤复合架空地线光缆应变监测对比分析[J]. 光学学报，2020，40(15)：36-42.
Xia Meng，Tang Xiaohui，Wang Yin，et al. Comparative analysis of strain monitoring of the installed optical fiber composite overhead ground wire using BOTDA/R[J]. Acta Optica Sinica，2020，40(15)：36-42.

[2] Bai Q，Wang Q，Wang D，et al. Recent advances in Brillouin optical time domain reflectometry[J]. Sensors，2019，19(8)：1862.

[3] Wu T，Liu G，Fu S，et al. Recent progress of fiber-optic sensors for the structural health monitoring of civil infrastructure[J]. Sensors，2020，20(16)：4517.

[4] 孙文达，郑　晶，孙　远. 基于相位敏感光时域反射计的语音与脚步振动信号监测系统研究[J]. 激光与光电子学进展，2023，60(23)：109-115.
Sun Wenda，Zheng Jing，Sun Yuan. Voice and footstep signal monitoring system based on phase sensitive optical time domain reflectometer[J]. Laser Optoelectronics Progress，2023，60(23)：109-115.

[5] Wu H，Liu X，Xiao Y，et al. A dynamic time sequence recognition and knowledge mining method based on the hidden Markov models (HMMs) for pipeline safety monitoring with Φ-OTDR[J]. Journal of Lightwave Technology，2019，37(19)：4991-5000.

[6] 张旭苹，武剑灵，单媛媛，等. 基于分布式光纤传感技术的智能电网输电线路在线监测[J]. 光电子技术，2017，37(4)：221-229.
Zhang Xuping，Wu Jianling，Shan Yuanyuan，et al. On-line monitoring of power transmission lines in smart grid based on distributed optical fiber sensing technology[J]. Optoelectronic Technology，2017，37(4)：221-229.

[7] 李　浩，王　峰，周　霄，等. 基于布里渊光时域反射计的紧套型 OPGW 覆冰厚度监测[J]. 光子学报，2021，50(11)：1106001.
Li Hao，Wang Feng，Zhou Xiao，et al. Monitoring of ice coating thickness of tight-buffered OPGW based on Brillouin optical time domain reflectometer[J]. Acta Photonica Sinica，2021，50(11)：1106001.

[8] 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)：11-73.
Zhang Xuping，Zhang Yixin，Wang Liang，et al. Present situation and future of research and application of distributed optical fiber sensing technology[J]. Acta Optica Sinica，2024，44(1)：11-73.

[9] 马　喆，张明江，江俊峰，等. 基于线性调频脉冲的光纤分布式声波传感技术[J]. 激光与光电子学进展，2023，60(11)：24-43.
Ma Zhe，Zhang Mingjiang，Jiang Junfeng，et al. Fiber-optic distributed acoustic sensing technology based on linear frequency modulation pulses[J]. Laser Optoelectronics Progress，2023，60(11)：24-43.

[10] Coscetta A，Catalano E，Cerri E，et al. Hybrid Brillouin/Rayleigh sensor for multiparameter measurements in optical fibers[J]. Optics Express，2021，29(15)：24025-24031.

[11] Zhang J，Zhu T，Zhou H，et al. High spatial resolution distributed fiber system for multi-parameter sensing based on modulated pulses[J]. Optics Express，2016，24(24)：27482-27493.

[12] Murray M J，Murray J B，Ogden H M，et al. Dynamic temperature-strain discrimination using a hybrid distributed

fiber sensor based on Brillouin and Rayleigh scattering[J]. Optics Express, 2023, 31(1): 287-300.

[13] Dang Y, Zhao Z, Tang M, et al. Towards large dynamic range and ultrahigh measurement resolution in distributed fiber sensing based on multicore fiber[J]. Optics Express, 2017, 25(17): 20183-20193.

[14] Lu P, Lalam N, Badar M, et al. Distributed optical fiber sensing: Review and perspective [J]. Applied Physics Reviews, 2019, 6(4): 041302.

[15] 朱 涛, 郑 华, 张敬栋. 布里渊光时域分析动态应变传感技术研究进展[J]. 应用科学学报, 2020, 38(2): 197-214.
Zhu Tao, Zheng Hua, Zhang Jingdong. Progress in research of Brillouin optical time domain analysis for dynamic strain sensing [J]. Journal of Applied Sciences, 2020, 38(2): 197-214.

[16] 马皓钰, 王夏霄, 马 福, 等. Φ-OTDR 型分布式光纤声波传感器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 66-80.
Ma Haoyu, Wang Xiaxiao, Ma Fu, et al. Research progress of Φ-OTDR distributed optical fiber acoustic sensor[J]. Laser Optoelectronics Progress, 2020, 57(13): 66-80.

[17] Dong Y, Chen X, Liu E, et al. Quantitative measurement of dynamic nanostrain based on a phase-sensitive optical time domain reflectometer[J]. Applied Optics, 2016, 55(28): 7810-7815.

[18] Xiao Z, Feng W, Zhen L, et al. Hybrid B-OTDR/Φ-OTDR for multi-parameter measurement from a single end of fiber [J]. Optics Express, 2022, 30(16): 29117-29127.

[19] 崔雪英, 项敏敏. 基于光频域反射技术的光纤传感网络性能分析方法[J]. 激光杂志, 2023, 44(2): 164-168.
Cui Xueying, Xiang Minmin. Performance analysis method of optical fiber sensor network based on optical frequency domain reflection technology[J]. Laser Journal, 2023, 44(2): 164-168.

[20] Fang G, Xu T, Feng S, et al. Phase-sensitive optical time domain reflectometer based on phase-generated carrier algorithm[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(13): 2811-2816.

[21] Chen Y, Yu K, Wu M, et al. Wavelet decomposition layer selection for the φ-OTDR signal[J]. Photonics, 2024, 11(2): 137.

作者简介:

赵航航(1992—),男,工程师,主要从事基于光纤传感的超高压输电线路运作与维护研究;

尹国路(1985—),男,教授,博士,博士生导师,主要从事分布式光纤传感技术及应用研究。