

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2026.04.06

基于光学啁啾链的快速分布式布里渊传感技术研究进展

程彦博^{1,2}, 李天夫^{1,2}, 隋景林^{1,2}, 汤晓惠^{1,2}, 夏猛^{1,2}, 董永康^{1,2*}

(1. 哈尔滨工业大学 航天学院激光空间信息全国重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学 郑州高等研究院, 河南 郑州 450018)

摘 要: 介绍了光学啁啾链(Optical Chirp Chain, OCC)的基本概念、波形构造方式和时频映射机理, 阐明其提升布里渊谱获取效率的基本原理。论述了光学啁啾链布里渊光时域分析(OCC-Brillouin Optical Time Domain Analysis, OCC-BOTDA)和光学啁啾链布里渊光时域反射(OCC-Brillouin Optical Time-Domain Reflectometry, OCC-BOTDR)的原理, 梳理了OCC-BOTDA在单次超快测量、长距离与高性能实现、瞬态效应与谱形畸变抑制、矢量测量、偏振分集、去噪增强等方面的研究进展, 归纳了OCC-BOTDR在单端在线解调、应用性能提升等方面的研究进展, 对比了不同方法在测量距离、空间分辨率、测量时间等参数上的差异。展望了基于OCC的快速分布式布里渊传感技术的发展方向, 指出未来需要进一步提升高质量OCC生成、相干探测和数字信号处理能力; 可将基于OCC的快速分布式布里渊传感技术与其他技术相结合, 实现多物理量的长距离协同感知, 同时提升测量系统的工程适用性与可靠性, 以满足复杂工程应用场景下的多参量监测需求。

关键词: 分布式光纤传感; 布里渊散射; 光学啁啾链; 光学啁啾链布里渊光时域分析; 光学啁啾链布里渊光时域反射; 快速测量; 时频映射; 长距离测量

中图分类号: TP212; TB9; O43

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2026) 04-0093-16

Research progress on fast distributed Brillouin sensing technology based on optical chirp chain

CHENG Yanbo^{1,2}, LI Tianfu^{1,2}, SUI Jinglin^{1,2}, TANG Xiaohui^{1,2}, XIA Meng^{1,2}, DONG Yongkang^{1,2*}

(1. National Key Laboratory of Laser Space Information, School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Zhengzhou Advanced Research Institute of Harbin Institute of Technology, Zhengzhou 450018, China)

Abstract: The basic concept, waveform construction, and time-frequency mapping mechanism of the optical chirp chain (OCC) are introduced, and the fundamental principle by which OCC improves the acquisition efficiency of Brillouin spectra is elucidated. The operating principles of optical chirp chain Brillouin optical time-domain analysis (OCC-BOTDA) and optical chirp chain Brillouin optical time-domain reflectometry (OCC-BOTDR) are described. Research advances in OCC-BOTDA are reviewed in terms of single-shot ultrafast measurement, long-range and high-performance sensing, suppression of transient effects and spectral distortions, vector measurement, polarization diversity, and denoising enhancement. Progress in OCC-BOTDR is summarized with respect to single-ended online demodulation and

收稿日期: 2026-03-31; 修回日期: 2026-05-21; 录用日期: 2026-05-25; 发表日期: 2026-08-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB3207600)

引用格式: 程彦博, 李天夫, 隋景林, 等. 基于光学啁啾链的快速分布式布里渊传感技术研究进展[J]. 计测技术, 2026, 46(4):93-108.

Citation: Cheng Yanbo, Li Tianfu, Sui Jinglin, et al. Research progress on fast distributed Brillouin sensing technology based on optical chirp chain[J]. Metrology & Measurement Technology, 2026, 46(4):93-108.



sensing-performance improvement. The measurement range, spatial resolution, measurement time, and other performance parameters of different approaches are comparatively analyzed. Future directions for OCC-based fast distributed Brillouin sensing are discussed. Further advances are required in high-quality OCC generation, coherent detection, and digital signal processing. Moreover, OCC-based fast distributed Brillouin sensing can be integrated with other techniques to enable long-range, coordinated sensing of multiple physical parameters, while improving the engineering applicability and reliability of measurement systems to meet the demands of multiparameter monitoring in complex engineering environments.

Key words: distributed fiber sensing; Brillouin scattering; optical chirp chain; OCC-BOTDA; OCC-BOTDR; fast measurement; time-frequency mapping; long-range measurement

0 引言

分布式光纤传感技术凭借长距离传输、抗电磁干扰、全线连续监测、无探测盲区等优势,已成为重大工程结构健康监测中的重要技术手段^[1-4]。基于布里渊散射的布里渊光时域分析(Brillouin Optical Time Domain Analysis, BOTDA)与布里渊光时域反射(Brillouin Optical Time-Domain Reflectometry, BOTDR)技术能够通过提取光纤沿线布里渊频移(Brillouin Frequency Shift, BFS)实现温度与应变信息的分布式测量,一直受到学术界与工程领域的广泛关注^[5-8]。然而,传统布里渊时域传感通常依赖步进扫频和多次平均相结合的测量方式,单次测量时间往往较长,在高铁振动、地震波传播以及快速载荷冲击等动态场景下,难以同时兼顾空间分辨率、传感距离与测量速率^[9-12]。尽管近年来相继出现了斜率辅助、扫频调制等快速测量方案^[13-18],但在进一步提升测量速度的情况下同时兼顾长传感距离、低系统复杂度和高测量稳定性等方面仍存在一定局限。

近年来,光学啁啾链(Optical Chirp Chain, OCC)技术的引入为解决上述问题提供了新的思路。OCC通过在时域上首尾串接多个短时线性啁啾脉冲,建立确定的时间-频率映射关系,使探测光能够在单个时间窗口内覆盖完整的布里渊增益谱(Brillouin Gain Spectra, BGS)区域,从而将传统频域中的逐点扫描过程转化为时域中的快速采样过程。在此基础上,相关研究逐步形成了OCC-BOTDA与OCC-BOTDR两条主要技术路线,并在超快动态测量、长距离快速响应以及单端在线解调等方面展现出良好应用潜力^[19-24]。

与此同时, OCC传感体制在提高测量速度的

同时,也出现了新的问题。对于OCC-BOTDA而言,探测光频率的快速变化会激发瞬态受激布里渊作用,使声波场难以达到稳态,进而导致后端畸变、主峰频率滞后等谱形失真,影响频移提取精度^[25-27]。对于OCC-BOTDR而言,单端测量条件下的自发布里渊散射信号较弱,易受相干瑞利噪声等因素影响,影响系统的解调稳定性和测量性能^[28-30]。在上述背景下,本文对基于OCC的快速布里渊传感技术进行综述,阐述OCC-BOTDA与OCC-BOTDR的原理,讨论二者在实现路径、参数特点和应用场景等方面的差异。梳理OCC-BOTDA和OCC-BOTDR的研究进展情况,结合当前工程应用需求,分析基于OCC的快速分布式布里渊传感技术面临的关键问题,并展望该技术的未来发展方向,为相关领域的科研人员提供借鉴。

1 OCC分布式布里渊传感原理

1.1 OCC的基本概念

分布式布里渊传感通过提取光纤沿线的BFS实现温度和应变测量。在此基础上, OCC技术通过建立时间与频率的映射关系,为布里渊谱的快速获取提供了新的实现途径。

OCC技术的核心思想:将多个短时啁啾段在时间域首尾串接形成链式结构,使探测光在单次测量窗口内依次对应多个频率点,从而将传统逐点频率扫描过程“压缩到时间轴上”,并利用预先建立的时频对应关系实现布里渊谱信息的快速获取与解调。与常规单频连续探测光相比, OCC探测光能够在有限时间窗口内覆盖更宽的有效频率范围,为基于分布式布里渊传感的超快测量提供了新的实现路径。光学啁啾链的时频关系如图1所示。

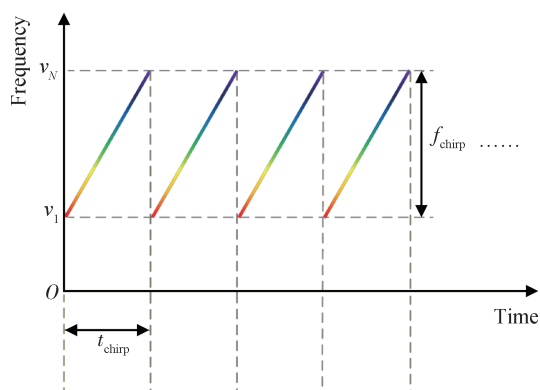


图1 光学啁啾链的时频关系示意图

Fig.1 Schematic diagram of the time-frequency relationship of the optical chirp chain

从波形构造角度分析, OCC由若干短时线性啁啾信号组成。在单个啁啾周期 t_{chirp} 内, 光频率随时间 t 线性变化, 其啁啾速率 α 定义为

$$\alpha = \frac{f_{\text{chirp}}}{t_{\text{chirp}}} \quad (1)$$

式中: f_{chirp} 为单个周期内的频率扫描范围, $f_{\text{chirp}} = \nu_N - \nu_1$, $0 \leq t \leq t_{\text{chirp}}$, ν_N 为扫描截止频率, ν_1 为扫描初始频率。

单个啁啾段内的瞬时频率 $f(t)$ 可写为

$$f(t) = f_0 + \alpha t \quad (2)$$

式中: f_0 为初始频率。

如图1所示, 当多个啁啾段按一定规则依次串接后, 探测光的频率随时间呈现出链式演化特征, 不同时间位置与不同频率点建立起一一对应关系; 原本需要通过逐点扫描得到的谱信息, 可以在一次或较少次测量中以时间-强度信号的形式采集, 再根据已知的映射关系恢复BGS并提取BFS。

OCC未采用传统的扫频方式, 但是这并不意味着布里渊传感中频率信息不再重要, 而是改变了其获取方式。传统BOTDA/BOTDR通过外部控制源逐点改变频率, 再逐点测量响应; 而OCC技术则将这一过程等效编码到时间轴上, 使多个频率点的信息在单次时间窗口内连续出现。正是这种由时频映射带来的测量方式转变, 使该技术在提升布里渊谱获取效率、提高测量速度方面表现出明显的优势。

另外, OCC的传感性能不仅取决于时频映射关系本身, 还与其生成质量密切相关。若OCC存

在功率起伏、边带抑制不足或调制噪声较大等问题, 不同时间位置对应频率点的幅度一致性和频率纯度将受到影响, 进而降低布里渊谱恢复和频移提取的稳定性。因此, 高平坦度、高边带抑制比、低噪声的OCC生成, 是实现高性能OCC-BOTDA与OCC-BOTDR的重要前提。

1.2 OCC-BOTDA的基本原理

传统BOTDA的原理: 构建脉冲泵浦光和连续探测光, 使二者在光纤中反向传播, 扫描二者之间的频差获取各位置处的布里渊增益强度构建布里渊增益谱, 再由谱峰位置提取布里渊频移。该方法测量精度较高, 但为了获取完整谱形, 通常需要较多频率点和平均次数, 因此在长距离场景下测量时间较长。

OCC-BOTDA的基本思路: 在传统BOTDA结构中, 用OCC探测光替代单频探测光, 使探测光在一个时间窗口内依次覆盖多个频率点, 泵浦脉冲在光纤中传播时, 会与OCC探测光相互作用并产生受激布里渊散射(Stimulated Brillouin Scattering, SBS)。由于OCC已将传统频率扫描过程展开到时间轴上, 因此在局部布里渊频移位于OCC覆盖范围内的条件下, 仅需单个或少量泵浦脉冲, 即可恢复沿光纤分布的布里渊增益谱, 这也是OCC-BOTDA能够实现超快测量的根本原因。OCC-BOTDA测量原理如图2所示。

如图2所示, 系统泵浦光被调制为脉冲信号, 探测光则经光学捷变频调制生成连续的OCC。2束

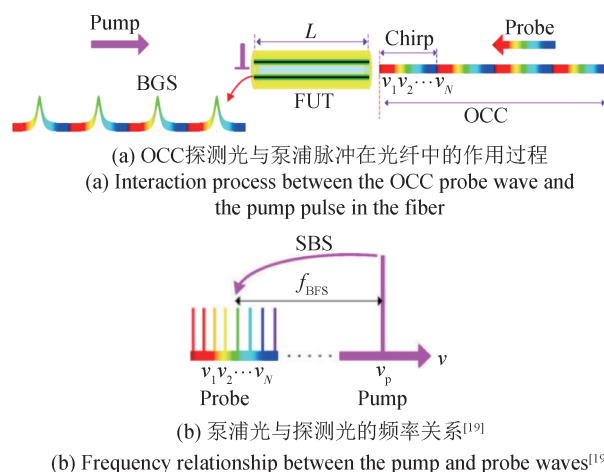


图2 OCC-BOTDA测量原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of the OCC-BOTDA sensing principle

光相向注入待测光纤后,单个泵浦脉冲将依次与各啁啾段发生SBS作用。当啁啾段的扫频范围覆盖SBS作用区时,每个啁啾段内均会激发出一个完整的BGS。依托OCC的时间-频率映射机制,频域的BGS被转化为时域波形。因此,仅需单次测量(即测量单个泵浦脉冲),即可重构光纤沿线的BGS分布,该过程可类比为“对光纤进行了一次光学短时傅里叶变换”。最终,携带BGS的探测光经光电接收与信号解调后,可提取出布里渊频移及相应的温度或应变参数。本质上,OCC技术是将传统的步进扫频过程在时间轴上进行了极限压缩,免除了耗时的多次频率切换,从根本上突破了传统BOTDA的测量速度瓶颈。

与传统BOTDA相比,OCC-BOTDA在保留信号强、测量精度高等特点的同时,显著提高了布里渊谱获取效率,使动态分布式测量成为可能。在此基础上,研究人员又围绕长距离、高稳定性和抗偏振衰落等方向进行了探索,逐步形成了长距离、模式识别增强和矢量测量等多种实现路线。需要指出的是,BOTDA通常需要从光纤两端分别接入泵浦光和探测光,这在部分实际应用场景中会受到限制。从应用角度分析,OCC-BOTDA依托受激布里渊散射信号较强、频移提取精度较高等特点,更适用于双端可接入条件下的高性能分布式测量场景,尤其在长距离高精度测温/测应变、

动态响应监测以及对测量稳定性要求较高的场合具有优势。但双端接入需求也限制了其在部分复杂布线场景中的工程部署灵活性。

1.3 OCC-BOTDR的基本原理

BOTDR利用光纤中的自发布里渊散射回波进行测量,仅需从光纤一端接入即可实现分布式温度或应变监测,因此在工程部署中具有较高的灵活性。然而,传统BOTDR同样需要通过频率扫描获取布里渊散射谱,且由于回波信号较弱,更容易受噪声、相干瑞利散射和系统稳定性的影响。

相较BOTDA,BOTDR仅需单端接入,因此基于OCC的BOTDR快速测量方案也成为研究人员重点关注的发展方向。在OCC-BOTDR中,OCC不再作为探测光参与受激布里渊相互作用,而是通常作为参考光引入相干探测链路。其解调原理如图3所示。在相干探测系统中,OCC作为本振光(Local Oscillator, LO),与光纤中返回的后向自发布里渊散射信号进行拍频。由于LO的频率随时间快速线性变化,而局部光纤段内的布里渊散射频率可视为准静态量,二者混频后的拍频信号将携带对应的布里渊谱信息。系统通过固定带通滤波器(Band-Pass Filter, BPF)选取特定中频(Intermediate Frequency, IF)分量,并结合包络检波,将原本分布在频域中的布里渊谱信息在线映射到时间域,从而实现单端快速解调。

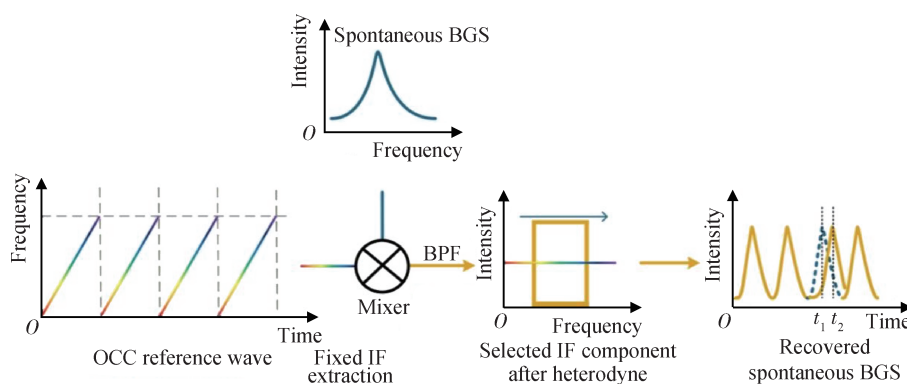


图3 OCC-BOTDR测量原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of the OCC-BOTDR sensing principle

如图3所示,经过带通滤波与包络检波后,可获得随时间变化的幅度响应。基于OCC扫频过程所建立的确定性时频映射关系,可将包络峰值在时间轴上的位置与布里渊谱中的不同频率分量建

立一一对应关系,从而实现自发布里渊谱在单次扫频周期内的快速重构。其物理过程可理解为:OCC参考光频率按预定规律随时间线性扫描,参考光与局部后向布里渊散射信号之间的拍频频率

也随之变化,当某一时刻二者的拍频频率落入BPF所设定的固定IF通带范围内时,接收端输出包络将出现峰值响应。具体而言,光纤沿线某一点的BFS变化量 Δv_{BFS} 与其在时域上重构谱峰的时间偏移量 Δt 满足

$$\Delta v_{\text{BFS}} = \Delta t \cdot \alpha = \Delta t \cdot \frac{f_{\text{chirp}}}{t_{\text{chirp}}} \quad (3)$$

基于这一时频映射机制,系统无需进行传统BOTDR中耗时的频率步进扫描,即可在单次扫描周期内完成全光纤布里渊谱信息的获取,从而显著提高测量速度。

从应用角度分析,OCC-BOTDR的突出特点在于兼具单端接入和快速测量两方面优势,因此在复杂布线条件、长距离巡检以及仅能单端接入的在线工程监测场景中具有较大应用潜力。但是与BOTDA相比,BOTDR在单端测量条件下信号较弱,这一特点并不会因OCC的引入而改变,因此在实际应用中,OCC-BOTDR仍面临受相干瑞利噪声干扰、探测动态范围有限以及解调稳定性不足等问题。研究人员基于自外差探测、斜率辅助测量、编码增强和去噪处理等方法提出了多种BOTDR改进思路,这些方法同样为OCC-BOTDR的性能提升提供了有益借鉴。总体而言,OCC-BOTDR更适用于强调部署灵活性和单端接入能力的场景,但其后续发展仍依赖于弱信号条件下参考光质量、探测灵敏度和在线解调鲁棒性的持续提升。

2 OCC-BOTDA与OCC-BOTDR研究进展

近年来,围绕OCC的分布式布里渊传感研究不断深入,相关工作已从早期的原理验证逐步发展到长距离测量、谱畸变抑制、抗偏振衰落以及单端快速解调研究等方向。OCC-BOTDA依托受激散射信号强、测量精度高的特点,在单次超快测量、长距离实现和高稳定性增强等方面取得了较为系统的发展;OCC-BOTDR面向单端接入和快速解调需求,在OCC参考光构建、时频映射解调以及性能提升方面展现出较大潜力。

2.1 OCC-BOTDA的单次超快测量研究

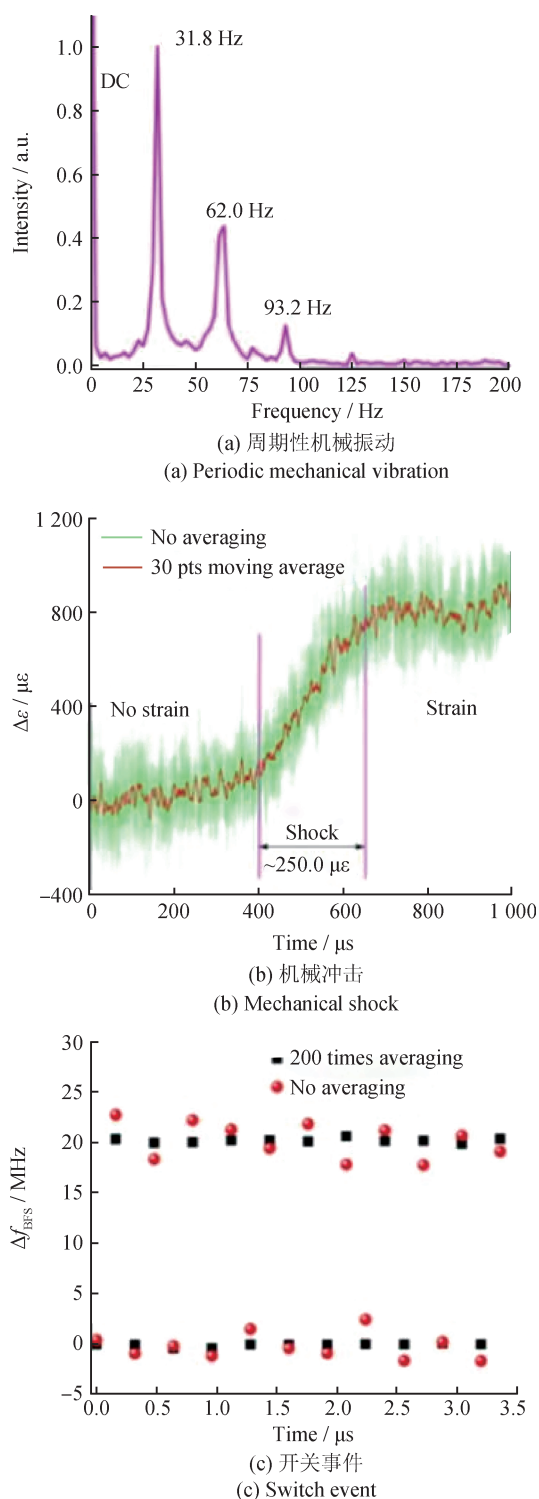
OCC在分布式布里渊传感中的最初突破,主要体现在对传统逐点频率扫描模式的显著压缩。Zhou Dengwang等人首先提出了基于OCC探测光的

单次测量(Single-Shot)BOTDA方案^[19, 31],通过在单个测量窗口内引入多个频率分量,使原本需要逐点扫描获取的BGS可以在单个或少量泵浦脉冲作用下完成重构。这一工作奠定了OCC-BOTDA的基本框架,即利用OCC的时频映射关系,将频率扫描问题转化为时间采样问题,从而显著提高测量速度。该研究团队进一步通过周期振动、机械冲击和开关事件等实验,验证了OCC-BOTDA在高采样率分布式动态测量中的可行性。需要说明的是,本文所称单次测量主要强调在单个脉冲或单个测量窗口内完成布里渊谱信息获取,而“超快测量(Ultrafast Measurement)”则更侧重于系统的时间分辨能力或快速动态响应能力。前者侧重测量方式,后者侧重测量速度,二者相关但并不完全等同。如图4所示,该方案能够分别实现对周期性机械振动、瞬态机械冲击以及开关事件的快速响应。其中,周期性机械振动结果表明系统具有连续动态跟踪能力;机械冲击结果说明其能够记录持续时间约250 μs 的瞬态应变变化过程;开关事件结果则进一步体现了OCC-BOTDA在高采样率条件下对突变信号的分辨能力。该方案分别实现了25 kHz、2.5 MHz和6.25 MHz采样率下的动态应变测量,说明OCC-BOTDA在千赫兹至兆赫兹级超快分布式测量方面具有显著潜力。

基于OCC的单次测量方案有效突破了传统步进扫描机制带来的时间限制,验证了该技术在动态分布式传感中的可行性,也为后续长距离、高性能和高稳定性的OCC-BOTDA研究奠定了基础。

2.2 OCC-BOTDA的长距离与高性能实现

在实现超快测量的同时,如何将OCC-BOTDA推广到长距离场景是研究人员重点关注的问题。针对这一问题,Dong Yongkang等人提出了基于布里渊损耗体制的长距离OCC-BOTDA方案^[20],在保持较高测量速度的同时,将测量距离扩展至150 km。该方案利用OCC探测光的宽频谱特性,在布里渊损耗体制下同时实现了较高的布里渊阈值、无附加放大链路条件下的泵浦脉冲补偿以及对非局域效应的抑制。为说明OCC-BOTDA在长距离场景下的实现能力,给出了150 km下测量得到的布里渊损耗谱结果,如图5所示。

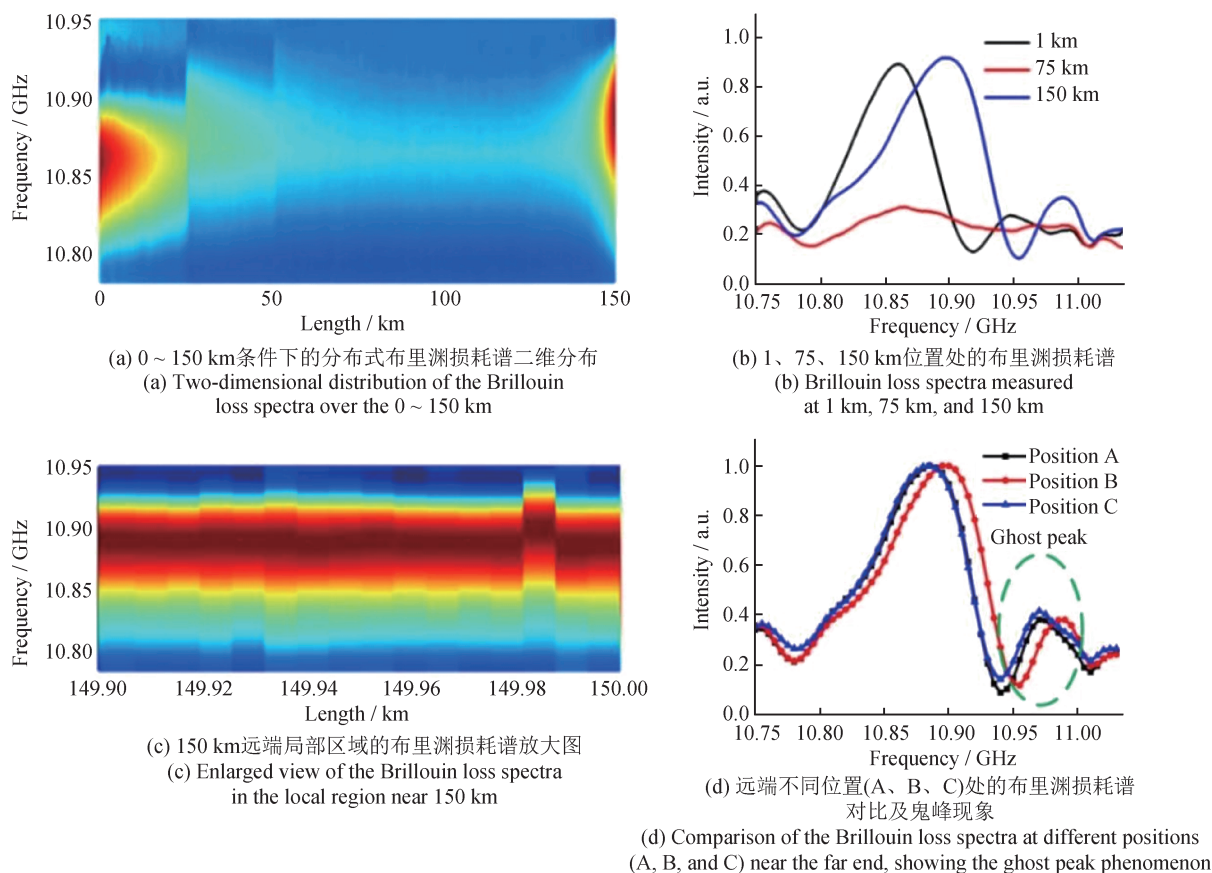
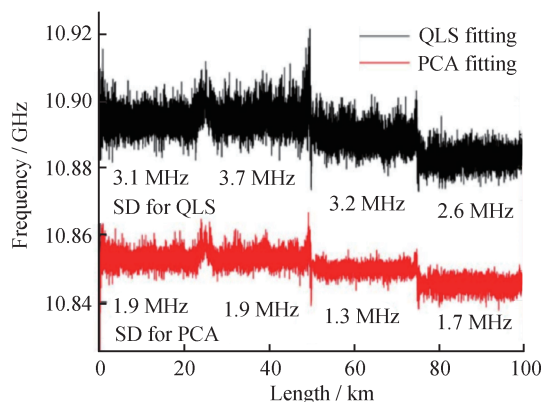
图4 基于单次测量的OCC-BOTDA的典型动态测量结果^[19]Fig.4 Representative dynamic measurement results of single-shot OCC-BOTDA^[19]

如图5(a)所示, Dong Yongkang等人基于该方案在150 km单模光纤上实现了分布式布里渊损耗谱获取;图5(b)和图5(c)进一步展示了不同位置处

的布里渊损耗谱及远端局部区域的谱形放大结果,表明该方案在长距离条件下仍具有较好的布里渊谱恢复能力;图5(d)则展示了远端不同位置处的谱形对比及鬼峰现象。最终,该方案实现了6 m空间分辨率、3.2 s测量时间和3 MHz测量标准差,这表明OCC-BOTDA不仅适用于短距离动态测量,也可以与长距离分布式传感需求相结合,为大范围基础设施监测提供了新的实现思路。相较传统逐点扫频BOTDA, OCC-BOTDA不仅能够进行快速测量,还可在长距离条件下实现布里渊谱的有效获取,为推动快速分布式布里渊传感由原理验证走向大范围工程监测应用提供了重要支撑。

除测量距离的扩展外,高性能OCC-BOTDA还体现为对测量精度、空间分辨率和系统稳定性的综合优化。Wang Benzhang等人进一步提出了将主成分分析(Principal Components Analysis, PCA)模式识别算法与差分脉冲宽度对(Differential Pulse-width Pair, DPP)技术相结合的方案,实现了高性能OCC-BOTDA^[21]。

如图6所示,与传统二次最小二乘(quadratic Least Squares, QLS)拟合方法相比,PCA方法在100 km测量条件下表现出更低的BFS波动。4个25 km纤段的标准差分别由3.1、3.7、3.2、2.6 MHz降至1.9、1.9、1.3、1.7 MHz。该结果表明,将PCA模式识别与DPP技术引入OCC-BOTDA后,可以在保持较快测量速度的同时,提高频移提取精度和系统稳定性。其核心思路在于:利用PCA从非标准布里渊谱形中提取本征BFS信息,以减小瞬态受激布里渊相互作用引起的谱畸变误差,同时利用DPP抑制OCC调制噪声并减弱长距离测量中的自相位调制影响。实验结果表明:该方案在100 km单模光纤上实现了4 m空间分辨率、5 s测量时间和1.3 MHz测量标准差,且背景噪声相较原始数据下降约4.8 dB。此外,围绕快速BOTDA的高空间分辨率与高性能实现,研究人员还提出了多频敏捷数字光频梳探测方案和快速分布式温度/应变测量方法,为OCC-BOTDA的性能提升提供了可借鉴思路^[32-33]。DPP技术已被证明能够有效提高空间分辨率并改善谱提取质量^[34-35],这也为OCC-BOTDA中DPP技术与模式识别方法的

图5 150 km OCC-BOTDA的布里渊损耗谱测量结果^[20]Fig.5 Measured Brillouin loss spectra of OCC-BOTDA at 150 km^[20]图6 基于PCA与DPP的高性能OCC-BOTDA BFS提取结果^[21]Fig.6 BFS extraction results of high-performance OCC-BOTDA based on PCA and DPP^[21]

结合提供了理论和方法基础。

总体而言,长距离OCC-BOTDA的发展并不是对单次测量方案的简单延伸,而是在发挥快速测量这一核心优势的基础上,进一步向更长距离和更高精度两个方向拓展。为实现更长距离测量,

需要重点解决长距离链路中的信号衰减、非局域效应和测量时间问题;为实现更高精度测量,需要对谱畸变、噪声和频移提取稳定性进行优化。长距离OCC-BOTDA的进一步发展仍需在测量速度、空间分辨率和测量精度之间寻求更合理的平衡,这也是其走向高性能实现时必须面对的核心问题。

2.3 OCC-BOTDA中的瞬态效应、谱形畸变及抑制方法

随着OCC-BOTDA的发展,研究人员逐渐认识到快速测量并非没有代价。Wang Henan等人提出,在频率快速扫动条件下,瞬态受激布里渊相互作用会使测得谱形偏离稳态洛伦兹分布,从而引入额外误差^[25]。研究表明,OCC-BOTDA中的谱畸变主要表现为后端畸变、主峰频率滞后以及频率跳变等典型现象,其本质原因在于快速扫频过程中声波场建立与频率变化之间存在时间尺度不匹配^[27]。谱畸变问题已成为制约OCC-BOTDA测量精

度和系统稳定性进一步提升的重要因素。后端畸变是最具代表性的谱形失真之一，其仿真与实验结果如图7所示。

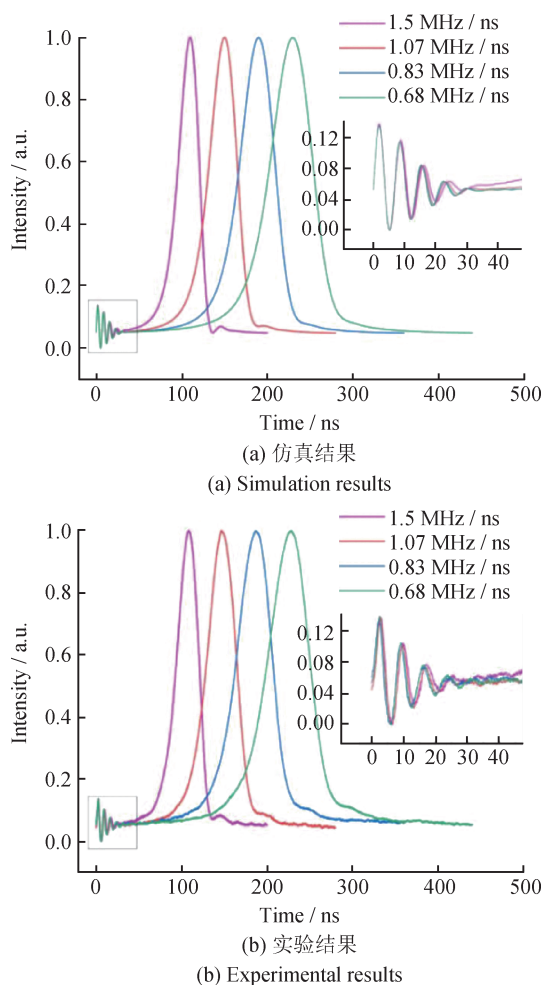


图7 OCC-BOTDA中后端畸变的仿真与实验结果^[25]

Fig.7 Simulation and experimental results of the back-end distortion in OCC-BOTDA^[25]

如图7所示，OCC-BOTDA中仿真测得谱形相较于稳态布里渊谱会出现后端畸变。这些畸变均与快速扫频条件下的瞬态SBS响应有关，是限制OCC-BOTDA测量精度进一步提升的关键问题。瞬态效应与谱畸变问题表明，利用OCC-BOTDA实现超快测量的同时，仍需在啁啾速率、带宽和啁啾周期等参数之间进行合理权衡，以减弱谱形失真对频移提取精度和系统稳定性的影响。

针对上述问题，研究者们从多个方面提出了改进思路：①通过优化OCC参数（如减小啁啾速率、合理选择啁啾周期和带宽），降低瞬态效应对

谱形的影响^[36]；②从信号处理角度出发，引入模式识别、特征匹配和差分脉冲宽度对等手段，以减弱谱畸变对布里渊频移提取结果的影响^[37]。此外，还有研究人员结合数值模拟与实验分析，对不同谱畸变类型及其形成机理进行了系统总结，为后续参数优化提供了理论依据^[38]。

从研究脉络角度分析，瞬态效应与谱畸变问题的提出，使OCC-BOTDA的研究重点从“能否实现”进一步转向“如何保持测量精度和稳定性”。这表明OCC-BOTDA的发展已不再停留于原理验证阶段，而是开始面向高性能和高可信度实现。因而，谱畸变抑制不仅是OCC-BOTDA参数设计与信号处理中的关键环节，也是其走向工程应用过程中必须解决的重要问题。

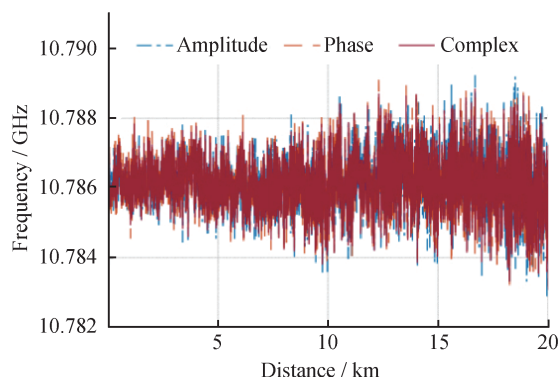
不同抑制方案的特点：参数优化法主要通过调整啁啾速率、带宽和啁啾周期等系统参数来减弱瞬态效应，其优点是实现思路直接、系统复杂度增加较小，较适合系统设计与实验参数优化阶段使用，但通常需要在测量速度、频率覆盖范围和谱形稳定性之间进行权衡。PCA/DPP等信号处理方法主要依赖后端数据处理来提高频移提取精度和抗噪能力，其优点是在保持较快测量速度的同时能够改善非标准谱形下的BFS提取结果，更适用于对测量精度和稳定性要求较高的场景，但对数据质量和处理流程的依赖相对更强。矢量处理法通过引入复谱信息和相位信息，可进一步提升抗偏振衰落能力和测量稳定性，在高稳定性、高可信度测量中具有优势，但通常会增加系统复杂度和工程部署难度。因此，参数优化法更适用于系统前端设计阶段的整体权衡，PCA/DPP等方法更适用于提高快速测量条件下的频移提取精度，而矢量处理方法则更适用于兼顾抗偏振衰落与高稳定性测量需求的场景。

2.4 OCC-BOTDA的矢量测量、偏振分集与去噪增强

除谱畸变外，偏振衰落和噪声同样是制约OCC-BOTDA性能的重要因素。由于布里渊相互作用对偏振状态敏感，测量过程中偏振随机变化可能导致谱峰幅度波动，进而影响布里渊频移提取的稳定性。

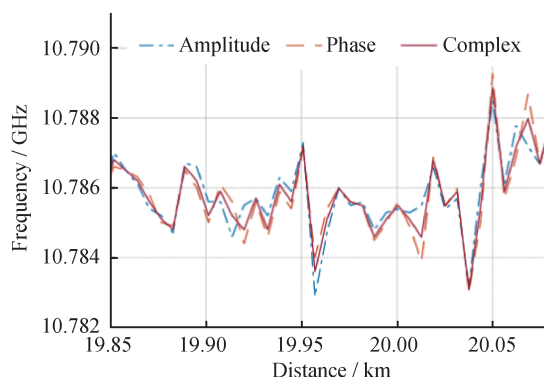
针对该问题, Zhang Jingdong 等人提出了矢量 OCC-BOTDA 方案, 同时利用幅度和相位信息构建复布里渊谱表示, 并结合复主成分分析 (complex principal component analysis, CPCA) 等方法, 实现

了抗偏振衰落能力的提升^[23, 39]。为说明矢量 OCC-BOTDA 在偏振衰落抑制和频移提取精度增强方面的效果, 文献[23]给出了基于幅度谱、相位谱和复布里渊谱的对比结果, 如图8所示。



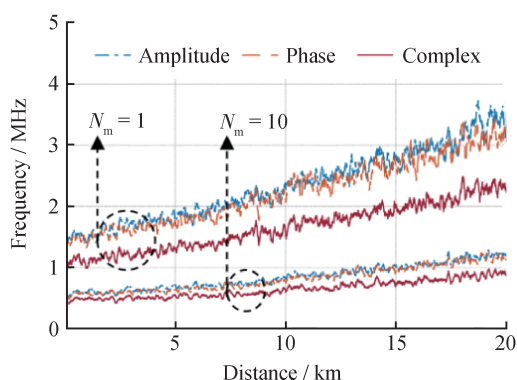
(a) 基于幅度谱、相位谱和复布里渊谱的BFS提取结果沿0~20 km的分布

(a) Distribution of BFS extraction results along the 0 ~ 20 km fiber based on the amplitude spectrum, phase spectrum, and complex Brillouin spectrum



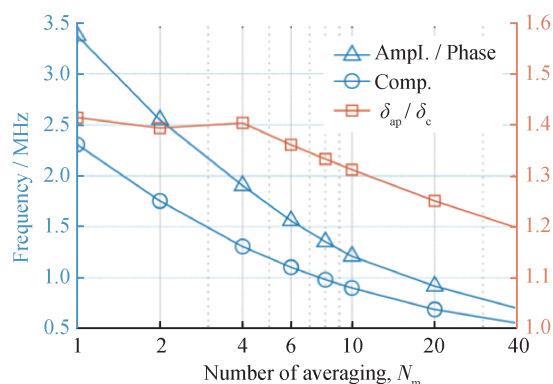
(b) 光纤远端局部区域的BFS提取结果放大图

(b) Enlarged view of the BFS extraction results in the local region near the fiber end



(c) 不同平均次数条件下三种方法的频率不确定度沿程分布

(c) Frequency uncertainty distributions of the three methods under different averaging numbers



(d) 三种方法在不同平均次数下的频率不确定度变化及复谱方法相对幅度 / 相位方法的精度提升

(d) Variation of frequency uncertainty with the averaging number for the three methods, and the precision improvement of the complex-spectrum method relative to amplitude / phase method

图8 矢量OCC-BOTDA的性能对比结果^[23]

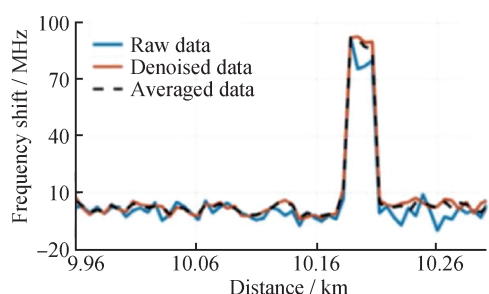
Fig.8 Performance comparison results of vector OCC-BOTDA^[23]

如图8(a)和图8(b)所示, 与仅基于幅度谱或相位谱的处理方式相比, 基于复布里渊谱并结合CPCA的方法在光纤远端表现出更低的BFS不确定度。图8(c)和图8(d)进一步表明, 在不同平均次数条件下, 该方法具有更低的频率不确定度, 传统测量方法与该方法的频率不确定度之比最高约为1.4, 并在20 km标准单模光纤、6 m空间分辨率条件下实现小于1 MHz的频率不确定度。这说明将矢量信息与复谱处理引入OCC-BOTDA后, 可有效

提升其抗偏振衰落能力和频移提取稳定性。在传统相干BOTDA研究中, 科研人员围绕无平均测量、矢量处理和模式识别频移提取开展了较多探索^[40-42], 相关工作成果表明: 通过引入相干检测增强、矢量信息处理以及基于主成分分析的模式识别方法, 可在降低平均次数的同时改善频移提取精度和测量稳定性, 为OCC-BOTDA中抗偏振衰落与低平均次数测量能力的提升提供了有益借鉴。

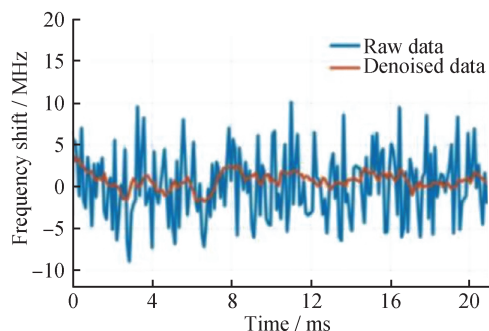
在此基础上, Zheng Hua 等人将偏振分集与图

像去噪方法引入 OCC-BOTDA 中^[24, 43]。通过偏振分集结构减弱偏振起伏带来的不稳定性,并结合非局部均值去噪、图像恢复等处理方法,在不显著增加平均次数的情况下提高谱恢复质量和频移提取稳定性。尤其是在单次测量场景下,这类方法对于降低异常点、提高有效信噪比具有明显作用。图9为偏振分集与图像去噪对系统性能改善的典型结果。



(a) 局部受扰区域附近原始数据、去噪数据与平均结果的BFS空间分布对比

(a) Comparison of the BFS spatial distributions of raw data, denoised data and averaged result near the locally perturbed region



(b) 固定位置处原始数据与去噪数据的BFS随时间变化对比
(b) Comparison of the temporal BFS variations at a fixed position between the raw data and denoised data

图9 偏振分集与图像去噪对 OCC-BOTDA 性能的改善结果^[24]

Fig.9 Performance improvement of OCC-BOTDA by polarization diversity and image denoising^[24]

如图9(a)所示,采用二维非局部均值(Two-Dimensional Non-Local Means, 2D NLM)图像去噪后,系统在保持空间分辨率基本不变的同时,显著提高了光纤远端的 BFS 稳定性;图9(b)进一步给出了固定位置处原始数据与去噪数据的 BFS 随时间变化对比。该研究表明,在 10 km 单模光纤、6 m 空间分辨率条件下, NLM 处理可将 10 km 处的 SNR 从 6.5 dB 提升至 15.2 dB,并将 BFS 标准差从 4.019 MHz 降低到 1.003 1 MHz,最终实现了快速

温度测量,温度不确定度为 0.59 °C。这说明偏振分集与图像去噪的结合能够有效增强 OCC-BOTDA 在低平均次数甚至单次测量条件下的可用性。

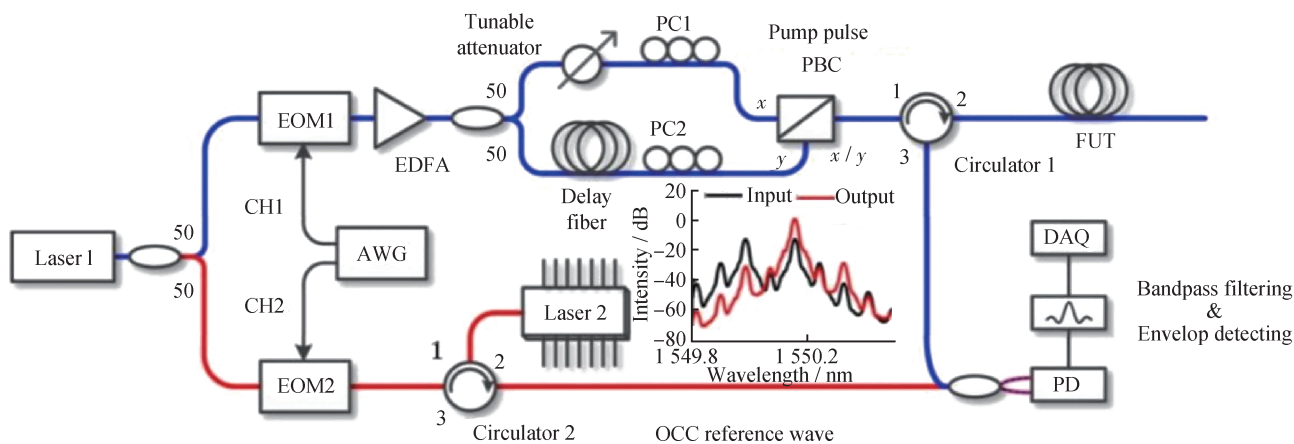
矢量测量、偏振分集与去噪增强代表了 OCC-BOTDA 从“测得快”向“测得稳、测得准”发展的重要方向。矢量测量通过引入多谱信息和复主成分分析(Complex Principal Component Analysis, CPCA)算法,提高了偏振起伏条件下的频移提取精度;偏振分集与去噪增强进一步改善了单次或低平均次数条件下的信噪比与测量稳定性。矢量测量、偏振分集与去噪增强共同推动 OCC-BOTDA 从原理验证向高鲁棒性和高可信度实现迈进。

2.5 OCC-BOTDR 的在线解调与性能提升

与 OCC-BOTDA 相比, OCC-BOTDR 的研究起步较晚,但单端接入优势使其具有重要应用价值。研究人员提出了基于 OCC 参考光的 BOTDR 快速测量方案,通过将 OCC 引入相干探测链路,使后向自发布里渊散射信号与参考光拍频,并结合固定带通滤波和包络检测实现布里渊谱的在线解调^[22]。该方法从根本上避免了传统 BOTDR 的逐点频率步进扫描过程,使测量时间显著缩短,证明了 OCC 思想在单端分布式布里渊传感中的适用性。

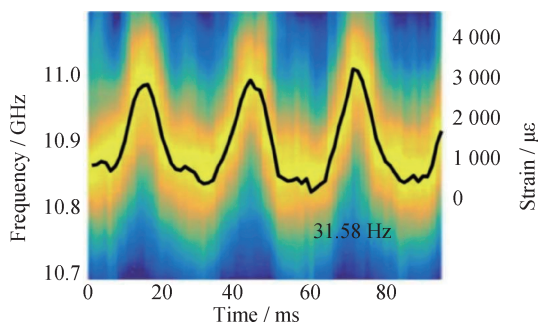
为更直观地说明 OCC-BOTDR 的实现方式,文献[22]给出了基于 OCC 参考光的单端快速测量实验结构,如图 10 所示。该系统通过构建高质量 OCC 参考光,并结合相干探测、带通滤波和包络检波,实现了自发布里渊散射信号的在线解调。具体而言,利用注入锁定方式构建 OCC 参考光,并在接收端使其与后向自发布里渊散射信号进行相干拍频。拍频信号经带通滤波与包络检波后,可将原本分布在频域中的布里渊谱信息映射到时间域,避免了传统 BOTDR 中逐点频率扫描的测量方式,提升了效率。

为验证 OCC-BOTDR 的单端快速测量能力,文献[22]给出了动态应变测量结果,如图 11 所示。该方案在 400 m 单模光纤上实现了对 2 m 光纤段 31.58 Hz 动态应变的分布式测量,动态应变测量跨度约为 3 200 $\mu\epsilon$,在 200 次平均条件下的等效采样率为 200 Hz。这表明 OCC-BOTDR 已能够在单端接入条件下,实现真正意义上的分布式快速测量

图10 OCC-BOTDR实验装置图^[22]Fig.10 Experiment setup of the proposed fast OCC-BOTDR^[22]

与在线解调。

如图11所示,系统能够在时域上连续恢复自发布里渊谱对应的频率分布,并进一步提取出随时间变化的动态应变曲线。与传统BOTDR相比,该方法的优势不仅在于单端接入,还在于通过时频映射关系实现了在线解调,从而显著缩短了测量时间。

图11 OCC-BOTDR动态应变测量结果^[22]Fig.11 Dynamic strain measurement results of OCC-BOTDR^[22]

与OCC-BOTDA依赖强受激信号不同,OCC-BOTDR的性能受限于单端自发散射信号的微弱特性。为提升OCC-BOTDR的性能,已有研究人员在参考光质量优化、相干探测增强和信号处理改进等方面开展了探索,例如,通过提高OCC参考光的功率平坦度和频谱纯度,可改善拍频信号质量;通过优化滤波与包络检测链路,可提高时频映射解调的稳定性^[22, 25, 28-29]。此外,相位波动抑制和相干检测稳定性增强同样是提升单端解调性能的重要方向。已有研究表明,基于光学副载波复用的相位波动抵消方法可有效改善相干检测BOTDA

系统的稳定性^[44],这一思路对OCC-BOTDR的参考光构建与相干拍频解调同样具有启发意义。研究人员还进一步分析了OCC频率跨度和啁啾持续时间对测量精度的影响,结果表明,降低OCC频率变化率有助于提高BFS的稳定性,但需要在动态范围和空间分辨率之间进行权衡。近年快速BOTDR及其性能增强方向的相关研究,也为OCC-BOTDR的发展提供了重要参考。例如,Jin Zhicheng等人提出了基于硅光子集成收发器的BOTDR,实现了10 km光纤、5 m空间分辨率条件下0.74 MHz的BFS分辨率,体现了BOTDR向集成化、小型化和工程实现方向发展的趋势^[45]。Li Lihuang等人则针对线性调频BOTDR中频率-时间映射受限导致精度较低的问题,提出了基于Richardson-Lucy反卷积分移提取方法,将谱宽由约540 MHz压缩至约40 MHz,并将BFS测量标准差降至0.34 MHz,表明快速BOTDR研究已进一步从“能否实现快速测量”走向“如何提升频移提取精度”^[46]。需要指出的是,上述工作并非都直接属于OCC-BOTDR体制,但其在弱信号检测、快速解调、频移提取精度提升和工程实现方面的思路,对OCC-BOTDR的后续发展具有重要借鉴意义。

总体分析,OCC-BOTDR领域的研究重点并不只是将OCC应用于BOTDR中,更关键的是如何在单端、弱信号条件下充分发挥OCC的快速测量优势。OCC-BOTDR技术目前仍处于持续发展阶段,但其在复杂布线和单端测量场景中的潜力已得到初步验证。

基于 OCC 的分布式布里渊传感代表性研究进展总结如表 1 所示。

需要说明的是，表 1 中所列时间参数均取自各文献用于表征快速测量能力的代表性时间尺度，其具体物理含义可对应单次事件获取时间、单个扫频周期或等效时间分辨能力，因此不同工作之间不宜作完全等价比较。由表 1 可知：基于 OCC 的分布式布里渊传感研究已从早期的超快测量原理

验证，逐步扩展到长距离、高精度、高稳定性以及单端快速解调等多个方向。不过，OCC-BOTDR 在进一步向长距离和高性能方向发展时，仍需持续提升弱信号条件下的参考光质量、探测灵敏度和解调鲁棒性，并兼顾测量距离、动态范围与测量精度。OCC 技术正在推动分布式布里渊传感由快速测量可行性验证向高性能与工程适用性提升阶段发展。

表 1 基于 OCC 的分布式布里渊传感代表性研究进展总结

Tab.1 Summary of representative research progress in distributed Brillouin sensing based on OCC							
技术路线	关键方法	测量距离 / km	空间分辨率 / m	测量时间 / s	采样率	主要特点	参考文献
OCC-BOTDA	基于单次 OCC 探测光的测量方法		2		2.5×10^4 Hz (机械振动); 2.5×10^6 Hz (机械冲击); 6.25×10^6 Hz (布里渊频移快速切换)	超快分布式测量奠基工作	[19]
	基于布里渊损耗机制的测量方法	150	6	3.2		150 km 长距离快速测量; 长距离扩展	[20]
	PCA 模式识别 + DPP 技术	100	4	5		4 段光纤的测量标准差为 1.3 ~ 1.9 MHz, 背景噪声下降 4.8 dB; 实现高性能	[21]
	多布里渊谱 + CPCA 矢量处理	20	6	2.1×10^{-3}		抗偏振衰落; 频率测量标准差最多降低约 28.6%	[23]
	偏振分集 + 2D NLM 图像去噪	10	6		9×10^3 Hz (泵浦脉冲重复频率, 单次测量)	单次测量稳定性增强; SNR 显著提升	[24]
OCC-BOTDR	OCC 时频映射 + 在线 BGS 解调	0.4	2 (受扰段)		200 Hz	单端动态应变测量; OCC-BOTDR 代表性工作	[22]

2.6 相关优化工作与发展趋势

除上述和 OCC 直接相关的主要工作外，围绕快速分布式布里渊测量需求，研究者们还提出了多种与 OCC 思路相关或可供借鉴的优化方法。除 BOTDR 领域的自外差探测、斜率辅助测量、编码增强和去噪处理外^[28-30, 47-52]，BOTDA 领域还发展了对撞式(Collider-type)快速动态测量、双极性/单极性编码增强以及相关参数优化设计方法^[53-55]。这些方法虽然并非直接属于 OCC 体制，但其通过改进探测方式和信号处理流程提高频谱获取效率，这与 OCC 追求快速测量的基本思路具有一致性。从时间脉络角度分析，相关研究已呈现出较为清晰的演进趋势：早期工作主要集中于 OCC-BOTDA 和 OCC-BOTDR 的原理验证与快速测量可行性证

明，随后逐步拓展到长距离实现、高空间分辨率、高稳定性增强以及弱信号条件下的性能优化。而近 3 ~ 5 年的相关工作则进一步关注低复杂度快速实现、BOTDR 集成化、小型化以及频移提取精度增强等方向。例如，Poddubrovskii 等人提出了基于连续波自扫激光器的 microwave-free BOTDA，实现了无需传统微波扫频链路的快速 BOTDA 测量方案^[56]；Vandborg 等人则针对 Raman 放大辅助 Brillouin OTDR 中的谱形平移和测量误差问题进行了建模分析，为长距离 BOTDR 系统设计提供了参考^[57]。这些进展表明，基于 OCC 的快速分布式布里渊传感研究重点已由“能否实现快速测量”逐步转向“如何兼顾速度、精度、距离与工程可用性”的综合优化阶段。

对 OCC-BOTDR 而言,在弱信号条件下,上述方法具有重要参考价值。自外差探测有助于提升相干检测灵敏度,斜率辅助测量可在一定程度上简化频谱提取过程,编码增强和去噪处理有助于提高低信噪比条件下的有效信息提取能力。对于 OCC-BOTDA 而言,相关优化思路同样可以为长距离测量、低平均次数条件下的频移提取以及复杂噪声环境中的稳定测量提供借鉴。此外,高灵敏度分布式温度测量、特种光纤 BOTDA 综述以及布里渊光纤传感新兴方向的综述性工作,也为 OCC 体制在不同光纤类型、测量对象和应用场景中的后续拓展提供了参考^[58-60]。

总体来看, OCC-BOTDA 与 OCC-BOTDR 的研究正在由验证快速测量可行性逐步转向提升系统性能和增强应用适应性。对于 OCC-BOTDA,需要进一步兼顾测量速度、空间分辨率和系统稳定性;对于 OCC-BOTDR,需要在单端弱信号条件下持续提升参考光质量、探测灵敏度和解调鲁棒性。相关优化工作的持续引入,表明 OCC 技术正在从独立的方法探索逐步走向与传统分布式布里渊传感手段相融合的发展阶段,这也为后续高性能和工程化实现提供了新的思路。与此同时,随着 OCC 技术逐步由快速采集走向在线应用,超快测量带来的数据吞吐量增加也对实时解调提出了更高要求,如何在保证频移提取精度的同时提升在线处理能力,并在提升性能、降低系统复杂度、降低工程实现成本之间取得平衡,将是 OCC-BOTDA 和 OCC-BOTDR 技术领域后续研究中需要持续关注的问题。

3 结论与展望

近年来,基于 OCC 的分布式布里渊传感研究不断发展,已形成以 OCC-BOTDA 和 OCC-BOTDR 为代表的两条主要技术路线。OCC 技术的核心价值在于通过建立时间与频率之间的映射关系,将传统逐点频率扫描过程压缩到单次测量窗口内,从而显著提高布里渊谱获取效率,为快速分布式测量提供了新的实现途径。从整体研究特征角度分析, OCC-BOTDA 和 OCC-BOTDR 并不是对传统 BOTDA/BOTDR 技术的简单替代,而是在快速测

量这一核心目标下,对频谱获取方式进行重构的新思路。

此外,面向复杂工程场景的多参量监测需求, OCC 与其他分布式光纤传感体制的融合也是值得关注的发展方向。近期,有研究人员将 OCC 技术与相位敏感光时域反射技术相结合,提出了一种基于分布式布里渊放大的长距离混合多参量传感方案^[61]。该方案利用连续的 OCC 作为布里渊泵浦光,在提取布里渊损耗谱以实现高精度温度测量的同时,对探测脉冲进行均匀放大,从而将 50 km 光纤远端瑞利散射信号的信噪比显著提升了约 10 dB。这一结果表明, OCC 技术不仅能够提升布里渊谱获取效率,还具有与其他体制融合构建高信噪比、长距离、多参量感知系统的潜力。另一方面,还需要关注面向工程应用的分布式布里渊传感系统测量结果的准确性验证与智能化解调能力。对于 BOTDR 系统而言,布里渊频移测量结果直接影响温度和应变反演精度,因此频移参数的计量校准和量值溯源也是提升系统可靠性的重要环节。近期有研究人员利用光载波抑制调制产生的倍频信号模拟布里渊散射信号,实现了 BOTDR 频移参数的校准与不确定度评定,为 BOTDR 系统性能验证和工程应用提供了计量支撑^[62]。同时,随着多参量分布式光纤传感系统中数据维度和处理复杂度的不断提高,智能化解调方法也为复杂光谱特征提取和多参量反演提供了新的思路。近年来,深度学习等智能化解调方法已在光纤传感光谱信号处理领域展现出较好的特征提取和参数预测能力^[63],这也为 OCC-BOTDA 与 OCC-BOTDR 实现大数据量、低平均次数测量和快速频移提取提供了可借鉴思路。

尽管 OCC 技术显著提升了分布式布里渊传感的测量效率,但其进一步走向高性能与工程应用仍面临不同层面的挑战:①对于 OCC-BOTDA 而言,未来仍需重点关注快速扫频条件下的瞬态效应、谱形畸变抑制以及测量速度、空间分辨率与测量精度之间的参数优化权衡;②对于 OCC-BOTDR 而言,需要实现单端弱信号条件下参考光质量、探测灵敏度与解调鲁棒性的持续提升;③随着 OCC 技术逐步由快速采集走向在线应用,超

快测量带来的数据吞吐量增加也对兼顾实时处理能力、系统复杂度与工程实现成本提出了更高要求。未来发展方向主要包括：① 进一步提升高质量OCC生成、相干探测和数字信号处理能力，推动OCC-BOTDA与OCC-BOTDR分别向双端高性能快速测量和单端快速解调方向持续发展；② 面向复杂工程场景的多参量监测需求，将基于OCC的快速分布式布里渊传感技术与其他技术相结合，从而实现温度、应变、振动等多物理量的长距离协同感知，并提升系统在复杂环境下的工程适用性与可靠性。

参考文献

- [1] Bao Xiaoyi, Chen Liang. Recent progress in distributed fiber optic sensors[J]. *Sensors*, 2012, 12(7): 8601-8639.
- [2] Bao Xiaoyi, Chen Liang. Recent progress in Brillouin scattering based fiber sensors[J]. *Sensors*, 2011, 11(4): 4152-4187.
- [3] Thévenaz L. Brillouin distributed time-domain sensing in optical fibers: state of the art and perspectives[J]. *Frontiers of Optoelectronics in China*, 2010, 3(1): 13-21.
- [4] Bao Xiaoyi, Zhou Zichao, Wang Yuan, et al. Review: distributed time-domain sensors based on Brillouin scattering and FWM enhanced SBS for temperature, strain and acoustic wave detection[J]. *Photonix*, 2021, 2: 14.
- [5] Niklès M, Thévenaz L, Robert P A. Simple distributed fiber sensor based on Brillouin gain spectrum analysis[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(10): 758-760.
- [6] Kurashima T, Horiguchi T, Tateda M. Distributed-temperature sensing using stimulated Brillouin scattering in optical silica fibers[J]. *Optics Letters*, 1990, 15(18): 1038-1040.
- [7] Garus D, Krebber K, Schliep F, et al. Distributed sensing technique based on Brillouin optical-fiber frequency-domain analysis[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(17): 1402-1404.
- [8] Bai Qing, Wang Qinglin, Wang Dong, et al. Recent advances in Brillouin optical time domain reflectometry[J]. *Sensors*, 2019, 19(8): 1862.
- [9] Zhang Hongying, Zhou Dengwang, Wang Benzhang, et al. Recent progress in fast distributed Brillouin optical fiber sensing[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(10): 1820.
- [10] Dong Yongkang. High-performance distributed Brillouin optical fiber sensing[J]. *Photonic Sensors*, 2021, 11(1): 69-90.
- [11] Voskoboinik A, Yilmaz O F, Willner A W, et al. Sweep-free distributed Brillouin time-domain analyzer (SF-BOTDA)[J]. *Optics Express*, 2011, 19(26): B842.
- [12] Peled Y, Motil A, Yaron L, et al. Slope-assisted fast distributed sensing in optical fibers with arbitrary Brillouin profile[J]. *Optics Express*, 2011, 19(21): 19845.
- [13] Peled Y, Motil A, Tur M. Fast Brillouin optical time domain analysis for dynamic sensing[J]. *Optics Express*, 2012, 20(8): 8584.
- [14] Wang Benzhang, Hua Zijie, Pang Chao, et al. Fast Brillouin optical time-domain reflectometry based on the frequency-agile technique[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(4): 946-952.
- [15] Chu Qi, Wang Benzhang, Wang Henan, et al. Fast Brillouin optical time-domain analysis using frequency-agile and compressed sensing[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(15): 4365-4368.
- [16] Zhou Dapeng, Peng Wei, Chen Liang, et al. Brillouin optical time-domain analysis via compressed sensing[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(22): 5496-5499.
- [17] Urricelqui J, Zornoza A, Sagues M, et al. Dynamic BOTDA measurements based on Brillouin phase-shift and RF demodulation[J]. *Optics Express*, 2012, 20(24): 26942.
- [18] Angulo-vinuesa X, Martin-lopez S, Corredera P, et al. Raman-assisted Brillouin optical time-domain analysis with sub-meter resolution over 100 km[J]. *Optics Express*, 2012, 20(11): 12147.
- [19] Zhou Dengwang, Dong Yongkang, Wang Benzhang, et al. Single-shot BOTDA based on an optical chirp chain probe wave for distributed ultrafast measurement[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 32.
- [20] Dong Yongkang, Wang Benzhang, Pang Chao, et al. 150 km fast BOTDA based on the optical chirp chain probe wave and Brillouin loss scheme[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(19): 4679-4682.
- [21] Wang Benzhang, Fan Baohua, Zhou Dengwang, et al. High-performance optical chirp chain BOTDA by using a pattern recognition algorithm and the differential pulse-width pair technique[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(6): 652.
- [22] Ba Dexin, Wang Benzhang, Li Tianfu, et al. Fast Brillouin optical time-domain reflectometry using the optical chirp chain reference wave[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(19): 5460-5463.
- [23] Zhang Jingdong, Zheng Hua, Wu Haoting, et al. Vector optical-chirp-chain Brillouin optical time-domain analyzer based on complex principal component analysis[J]. *Optics Express*, 2020, 28(20): 28831.
- [24] Zheng Hua, Zhang Jingdong, Wu Haoting, et al. Single

- shot OCC - BOTDA based on polarization diversity and image denoising [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 137: 106368.
- [25] Wang Henan, Ba Dexin, Mu Xuejie, et al. Ultrafast distributed Brillouin optical fiber sensing based on optical chirp chain[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2021, 27(6): 5600615.
- [26] Song Kang Yong, Gonzalez - herraes M. Observation of pulse delaying and advancement in optical fibers using stimulated Brillouin scattering [J]. *Optics Express*, 2005, 13(1): 82-88.
- [27] Thévenaz L, Mafang S F, Lin Jie. Effect of pulse depletion in a Brillouin optical time - domain analysis system [J]. *Optics Express*, 2013, 21(12): 14017.
- [28] Li Yongqian, Li Xiaojuan, An Qi, et al. Detrimental effect elimination of laser frequency instability in Brillouin optical time domain reflectometer by using self-heterodyne detection[J]. *Sensors*, 2017, 17(3): 634.
- [29] Li Xiaojuan, Li Yongqian, Zeng Wenxian, et al. Performance improvement of a self-heterodyne detection BOTDR system employing broad - band laser [J]. *Optoelectronics Letters*, 2018, 14(5): 325-330.
- [30] Li Yongqian, Wang Lei, Zhang Lixin, et al. Theoretical and experimental study on reducing coherent Rayleigh noise of Rayleigh scattering distributed optical fiber sensing system using PSK pulse coding[J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 64: 102539.
- [31] Dong Yongkang, Zhou Dengwang, Wang Benzhang. Ultra - fast BOTDA based on optical chirp chain probe wave [C]// *Proceedings of 26th International Conference on Optical Fiber Sensors*, 2018: TuC2.
- [32] He Huan, Zhao Zhiyong, Fu Songnian, et al. High spatial resolution fast Brillouin optical time-domain analysis enabled by frequency-agility digital optical frequency comb [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(14): 3403-3406.
- [33] Peng Jiaqin, Lu Yuangang, Zhang Yuyang, et al. Distributed strain and temperature fast measurement in Brillouin optical time-domain reflectometry based on double-sideband modulation[J]. *Optics Express*, 2022, 30(2): 1511.
- [34] Li Wenhai, Bao Xiaoyi, Li Yun, et al. Differential pulse-width pair BOTDA for high spatial resolution sensing[J]. *Optics Express*, 2008, 16(26): 21616.
- [35] Minardo A, Bernini R, Zeni L. Numerical analysis of single pulse and differential pulse-width pair BOTDA systems in the high spatial resolution regime[J]. *Optics Express*, 2011, 19(20): 19233.
- [36] Soto M A, Thévenaz L. Modeling and evaluating the performance of Brillouin distributed optical fiber sensors [J]. *Optics Express*, 2013, 21(25): 31347.
- [37] Iribas H, Urricelqui J, Mompó J, et al. Non-local effects in Brillouin optical time-domain analysis sensors[J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(8): 761.
- [38] Urricelqui J, Sagues M, Loayssa A. BOTDA measurements tolerant to non-local effects by using a phase-modulated probe wave and RF demodulation [J]. *Optics Express*, 2013, 21(14): 17186.
- [39] Zhang Jingdong, Zheng Hua, Wu Haoting, et al. Vector optical-chirp-chain Brillouin optical time-domain analyzer [C]// *Proceedings of Optical Fiber Sensors Conference*, 2020: T3. 78.
- [40] Guo Nan, Wang Liang, Wu Huan, et al. Enhanced coherent BOTDA system without trace averaging [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(4): 871-878.
- [41] Guo Nan, Zhang Xianting, Jin Chao, et al. Averaging-free vector Brillouin optical time domain analyzer assisted by reference probe lightwave [J]. *Optics Express*, 2018, 26(26): 33993.
- [42] Azad A K, Khan F N, Alarashi W H, et al. Temperature extraction in Brillouin optical time - domain analysis sensors using principal component analysis based pattern recognition[J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 16534.
- [43] Zheng Hua, Zhu Tao, Zhang Jingdong. Single shot BOTDA based on optical chirp chain and image denoising [C]// *Proceedings of Optical Fiber Sensors Conference*, 2020: T3. 58.
- [44] Li Zonglei, Zhou Yin, Jiang Biqiang, et al. Phase fluctuation cancellation for coherent - detection BOTDA fiber sensors based on optical subcarrier multiplexing [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(4): 757-760.
- [45] Jin Zhicheng, Chen Jiageng, Li Hanzhao, et al. Brillouin optical time-domain reflectometer based on a silicon photonic integrated transceiver [J]. *Optics Letters*, 2025, 50(9): 3130-3133.
- [46] Li Lihuang, Chen Jiageng, Zhang Yang, et al. Enhancing frequency accuracy of linear frequency-modulated BOTDR using Richardson-Lucy deconvolution [J]. *Optics Letters*, 2025, 50(23): 7384-7387.
- [47] Xu Pengbai, Pang Chao, Dong Xinyong, et al. Fast acquirable Brillouin optical time-domain reflectometry based on bipolar - chirped pulse pair [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(12): 3941-3949.
- [48] Liu Ge, Zou Dongjiang, Wei Ruoxue, et al. Large dynamic strain measurement via slope - assisted Brillouin optical

- time domain reflectometry using a frequency equalizer [J]. *Optics Letters*, 2023, 48(6): 1407-1410.
- [49] Li Yongqian, Wang Lei, Zhang Lixin, et al. A wave-length scanning BOTDR sensing system based on Rayleigh and Brillouin self-heterodyne detection [J]. *Optics Communications*, 2023, 533: 129284.
- [50] Geng J H, Staines S, Blake M, et al. Distributed fiber temperature and strain sensor using coherent radio-frequency detection of spontaneous Brillouin scattering [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(23): 5928-5932.
- [51] Wang Feng, Zhu Chenghao, Cao Chunqi, et al. Enhancing the performance of BOTDR based on the combination of FFT technique and complementary coding [J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 3504.
- [52] Wang Sheng, Yang Zhisheng, Soto M A, et al. Study on the signal-to-noise ratio of Brillouin optical-time domain analyzers [J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 19864.
- [53] Zhou Yin, Yan Lianshan, He Haijun, et al. Brillouin optical time domain collider for fast dynamic sensing [J]. *Optics Express*, 2020, 28(3): 3965.
- [54] Soto M A, Le Floch S, Thévenaz L. Bipolar optical pulse coding for performance enhancement in BOTDA sensors [J]. *Optics Express*, 2013, 21(14): 16390-16397.
- [55] Yang Zhisheng, Li Zonglei, Zaslawski S, et al. Design rules for optimizing unipolar coded Brillouin optical time-domain analyzers [J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 16505.
- [56] Poddubrovskii N R, Lobach I A, Kablukov S I. Microwave-free BOTDA based on a continuous-wave self-sweeping laser [J]. *Optics Letters*, 2024, 49(2): 282-285.
- [57] Vandborg M, Mathew N, Christensen J, et al. Modelling the Brillouin spectrum in Raman amplifier assisted Brillouin OTDR [C]// *Proceedings of 28th International Conference on Optical Fiber Sensors. Technical Digest Series. Optica Publishing Group*, 2023: Tu3. 19.
- [58] Iezzi V L, Loranger S, Kashyap R. High sensitivity distributed temperature fiber sensor using stimulated Brillouin scattering [J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 32591.
- [59] Hu D J J, Humbert G, Dong Hui, et al. Review of specialty fiber based Brillouin optical time domain analysis technology [J]. *Photonics*, 2021, 8(10): 421.
- [60] Li Tianfu, Chen Chao, Jiang Taofoei, et al. Recent progress in emerging directions of Brillouin optical fiber sensing: analyzing, designing, and implementing acoustic waves [J]. *Chinese Optics Letters*, 2026, 24(3): 030005.
- [61] Yu Junzhe, Zheng Hua, Xu Pengbai, et al. Enhanced hybrid distributed multi-parameter fiber sensing based on distributed Brillouin amplification [J]. *Optics Express*, 2025, 33(21): 44947.
- [62] 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.
- Sun Xiaoqiang, Fu Dongbo, Zhou Xuanyu, 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.
- [63] 王桢, 赵起超, 王昊琦, 等. 法布里-珀罗游标光谱信号的深度学习解调 [J]. *计测技术*, 2025, 45(3): 70-77.
- Wang Hui, Zhao Qichao, Wang Haoqi, et al. Deep learning-based demodulation of Fabry-Pérot vernier spectral signals [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2025, 45(3): 70-77.

(本文编辑: 刘圣晨 刘宇轩)



第一作者: 程彦博(1995—), 男, 在读博士, 主要从事长距离、快速布里渊分布式光纤传感技术研究。



通信作者: 董永康(1981—), 男, 教授, 博士生导师, 教育部国家级高层次人才, 哈尔滨工业大学校学位委员会委员, 激光空间信息全国重点实验室常务副主任, 国家重点研发计划信息光子技术重点专项专家组成员, 科技部国家重大科学仪器设备开发专项首席科学家, 科技部金砖国家光子学工作组中方负责人, 中国光学工程学会理事, 国际著名期刊 *eLight* 编委, *Optics Letters* 编委, *Photonic Sensors* 编委, 《中国激光》编委。从事光纤与激光传感器技术和工程应用等研究, 取得多项创新性研究成果。在国际权威期刊 *Light: Science & Applications*、*Optica*、*Laser & Photonics Reviews* 等发表论文 110 余篇, 获评爱思唯尔高被引学者, 获黑龙江省自然科学一等奖、中国光学工程学会技术发明一等奖、陕西省科技进步一等奖, 主持国家重点研发计划、国家自然科学基金等项目 20 余项。