

光学学报

多机理融合分布式光纤传感技术研究

黄麟景¹, 周霄^{2,3}, 樊昕昱^{1*}, 王峰^{2,3**}, 张旭莘^{2,3}, 何祖源¹¹上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240;²南京大学智能光感知与调控技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210023;³南京大学现代工程与应用工程学院, 江苏 南京 210023

摘要 为了解决传统分布式光纤传感系统只针对单一变量进行测量的问题, 研究人员近年来结合多种光纤传感测量机理, 提出了一系列多机理融合的分布式光纤传感系统, 使用同一系统实现多种参量的测量。综述了近年来多机理融合的分布式光纤传感技术, 从不同散射机理相结合的角度进行分类, 介绍了不同的多机理融合的分布式光纤传感系统及其性能指标, 并对其进行总结对比, 最后展望了多机理融合的分布式光纤传感技术的发展前景。

关键词 传感器; 光纤散射; 多机理; 光纤光学; 光纤传感

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231516

1 引言

物联网技术作为互联网技术的延伸, 是新一代信息技术的重要组成部分。物联网即万物互联, 是各种信息设备和传感器相结合后形成的巨大网络。这张巨大网络的基础是各种类型的传感器, 传感器作为物理世界与数字世界连接的桥梁, 是物联网架构中不可或缺的一环。在众多的传感器类型中, 光纤传感器相对于其他类型传感器具有独特优势。光纤传感器体积小、抗电磁干扰、寿命长、可集传感与传输为一体、成本低、布线简单、损耗极低, 支持长距离、大范围传感, 复用后易形成大规模传感网络, 对温度变化、应变变化测量灵敏度高且动态范围大。基于这些优势, 光纤传感器目前已获得广泛应用^[1-3]。

分布式光纤传感器使用光纤作为传感介质, 利用光纤不同的散射机制(瑞利散射、布里渊散射或拉曼散射)对环境的温度、应变、振动等的物理量实现传感。不同于单点式光纤传感器, 分布式光纤传感器基于光纤的背向散射光到达接收端的时间不同来区别光纤不同位置的光散射信息, 以监测整段传感光纤, 有效传感点数可达数十万个。另外, 分布式光纤传感系统对传感光纤无特殊要求, 普通通信用单模光纤即可作为传感光纤。分布式光纤传感系统具有灵敏度高、有效传感点数多、成本低等优势, 在众多领域(如周界安防、大型结构监测、管道实时监测等)有着极大应用潜力。

在分布式光纤传感技术被提出的近 40 年中, 传感

系统以利用单一散射机制为主。单一散射机制测量参数量有限, 无法全面准确反映被测对象的真实状态, 难以有效满足健康监测或自动化控制的需求。若要了解待测目标的多方面参数, 则需要采用多套系统, 这极大地增加了测量系统的成本和复杂度, 成为了分布式光纤传感系统投入具体应用的障碍。

虽然不同分布式光纤传感器所利用的光散射机制可能存在差异, 实验装置和调制解调方案也不同, 但其共同点是使用光纤作为传感器和传输信息的载体。基于这一点, 使用同一根光纤作为传感器, 联合多种传感机理, 利用不同机理的优势实现多参量的同时测量则成为可能。近年来, 多机理融合的分布式光纤传感系统已成为光纤传感领域的研究热点。本文主要介绍现有的多机理融合的分布式光纤传感系统, 并按照测量机理与结合方式的不同将现有工作进行分类并展开讨论。

2 基于瑞利散射与布里渊散射的分布式光纤传感系统

基于瑞利散射的分布式光纤传感系统具有灵敏度高、测量振动频谱范围大的优势, 但动态范围小, 且无法实现温度或应变的绝对测量, 只能测量相对变化量。相比于其他散射机制, 瑞利散射在振动事件测量的应用上具有相对优势。

不同于基于瑞利散射的系统, 基于布里渊散射的分布式光纤传感系统能实现温度和应变的绝对测量,

收稿日期: 2023-09-04; 修回日期: 2023-10-23; 录用日期: 2023-10-30; 网络首发日期: 2023-11-08

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFB2804900)、国家自然科学基金(62275151, 61975076, 62175100)

通信作者: *fan.xinyu@sjtu.edu.cn; **wangfeng@nju.edu.cn

但灵敏度相对较低。此外,该系统的测量过程一般需要扫频和多次平均,测量时间受到限制,无法测量高频振动。布里渊散射通常用于静态应变、温度变化的测量。基于二者不同的优势,研究人员考虑结合瑞利散射和布里渊散射来实现多参量的同时测量以及传感系统性能的提升。

2.1 接收同一探测光瑞利散射与布里渊散射的融合系统

两种光纤散射结合的直接方式是接收进入光纤的同一探测光的瑞利散射和布里渊散射,以实现多参量传感。如图 1 所示,在每一个探测周期将一个探测脉冲注入光纤中,探测脉冲在光纤中产生的瑞利散射和布里渊散射由于在接收端存在频率差而可以被分开接收或可在频率上分别滤出,并分别进行解调。

2016 年, Peng 等^[4]结合布里渊光时域反射仪(BOTDR)与相位敏感光时域反射仪(φ -OTDR)实现振动与应变的同时测量。该系统使用大带宽接收机同

时接收两种散射光,利用不同中心波长的带通滤波器分离两种散射光。实验结合分布式拉曼放大技术,实现了 49 km 传感距离、10 m 空间分辨率的测量,布里渊频移测量误差为 1.2911 MHz。2022 年, Zhou 等^[5]提出了一种 φ -OTDR 与 BOTDR 的融合系统。利用频率差分别接收瑞利散射光和布里渊散射光,在约 50 km 的光纤长度和 20 m 的空间分辨率下,实现了 0.381 MHz 的布里渊频移测量不确定度和 100 Hz 的振动频率下 $1.235 \text{ ne}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的动态应变分辨率。

在基于布里渊散射的测量系统中,相对基于自发布里渊散射的 BOTDR 系统,基于受激布里渊散射的布里渊光时域分析仪(BOTDA)系统具有更高信噪比。为了将 BOTDA 系统信噪比高的优势应用在融合系统中,2021 年 Coscetta 等^[6]结合 BOTDA 系统和直接接收的 φ -OTDR 系统,同时测量了 200 m 光纤的温度和振动,空间分辨率为 2 m,温度分辨率为 0.1 °C,其双端系统如图 2 所示。

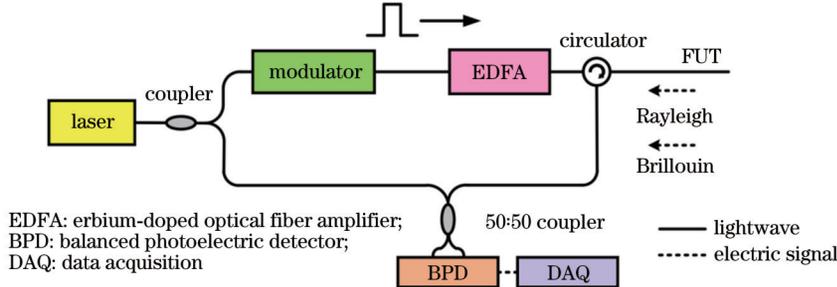


图 1 基于同一探测脉冲的融合系统示意图

Fig. 1 Experimental setup of combined system based on the same detection pulse

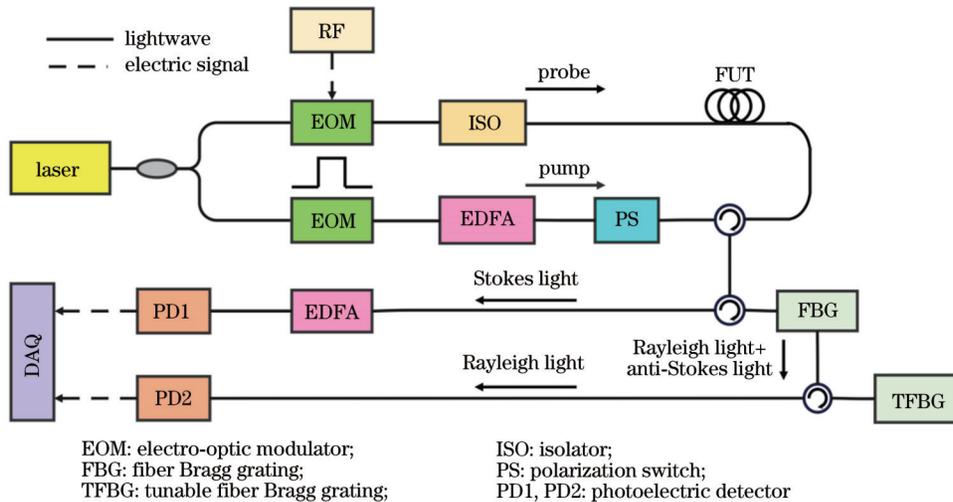


图 2 BOTDA 与 φ -OTDR 的融合系统

Fig. 2 Combined system of BOTDA and φ -OTDR

上述基于 BOTDA 和 BOTDR 的融合系统需要通过扫频获得布里渊增益谱,这一过程降低了系统测量速度。为了解决扫频过程降低系统测量速度的问题,研究人员将快速布里渊测量系统与融合系统结合,以

提升测量速度并扩大振动的动态范围,实现绝对量的测量。2020 年, Wang 等^[7]将扫频 BOTDA (OCC-BOTDA) 和 φ -OTDR 技术相结合用于测量振动,由 φ -OTDR 决定系统测量分辨率, BOTDA 决定系统测

量范围以及测量绝对应变,系统图如图 3 所示。实验使用保偏光纤(PM fiber)作为待测光纤,在 78 m 测量距离、2 m 空间分辨率的情况下,实现了不同绝对应变

(296.7 $\mu\epsilon$ 和 544.8 $\mu\epsilon$) 和 9.9 Hz 频率、500 ns 振幅的振动测量。 φ -OTDR 应变测量精度为 6.8 $\text{n}\epsilon$, BOTDA 应变测量精度为 5.4 $\mu\epsilon$ 。

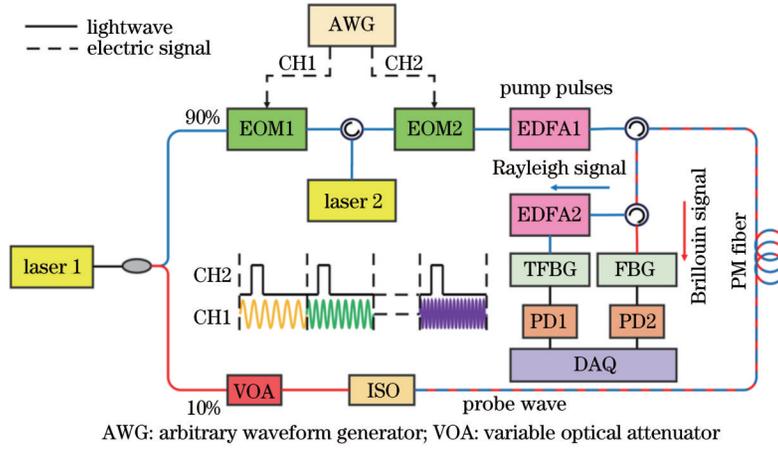


图 3 OCC-BOTDA 与 φ -OTDR 融合系统

Fig. 3 Combined system of OCC-BOTDA and φ -OTDR

2.2 基于复用的瑞利散射与布里渊散射融合系统

除了同时利用同一探测光的不同散射光之外,研究人员还提出了基于时分复用、空分复用和波分复用技术的融合系统。这种系统利用多种复用技术将两个相对独立的系统进行结合,能够用于多参量测量,提升系统性能。基于复用的融合系统可以独立调整两个子系统参数,在参数选取上更具灵活性,但对系统复杂度或光纤本身有更高的要求。

2013 年, Zhang 等^[8]提出单端 BOTDA 和 COTDR 的融合系统。当系统工作在 BOTDA 模式时,泵浦脉冲与连续探测光通过耦合器同时注入光纤一端,利用连续探测光在光纤另一端面的菲涅耳反射光作为 BOTDA 系统的探测光,其与相向的泵浦脉冲光发生受激布里渊散射。当系统工作在 COTDR 模式时,断开连续探测光,仅向光纤注入探测脉冲,此时即可实现 COTDR 的功能。该融合系统在 24 km 的传感距离下

实现了 5 m 的测量空间分辨率、 $\pm 1^\circ\text{C}$ 的温度测量精度,同时还能够测量光纤链路衰减,并实现断点定位。但这一方案使用光纤末端菲涅耳反射光作为 BOTDA 系统的探测光。若待测光纤损坏,则系统测量性能将受到影响。这一方案仅利用瑞利散射测量光纤断点,并未测量光纤上的振动事件。

2016 年, Zhang 等^[9]提出高空间分辨率的 BOTDR 与 φ -OTDR 的融合系统。如图 4 所示,该系统设计一种脉冲调制方案,在 φ -OTDR 探测脉冲序列中间隔插入 BOTDR 探测脉冲,利用布里渊激光器(BL)产生 BOTDR 子系统的本振光,并用短时傅里叶变换解调布里渊散射信号,再通过线性插值补齐 φ -OTDR 的振动解调结果。该系统实现了 10 km 的传感距离、3 m 的振动测量空间分辨率以及 80 cm 的温度/应变测量空间分辨率。该系统在光纤受损的情况下仍能正常工作,并且测量了光纤上的温度、静态应变以及振动事件。

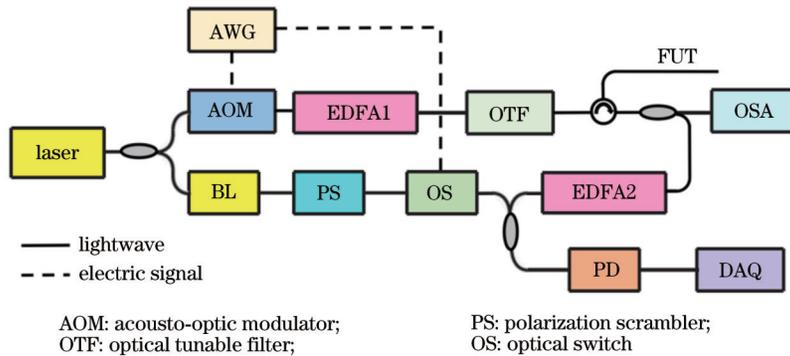


图 4 时分复用的 BOTDR 与 φ -OTDR 的融合系统

Fig. 4 Time-division multiplexing combined system of BOTDA and φ -OTDR

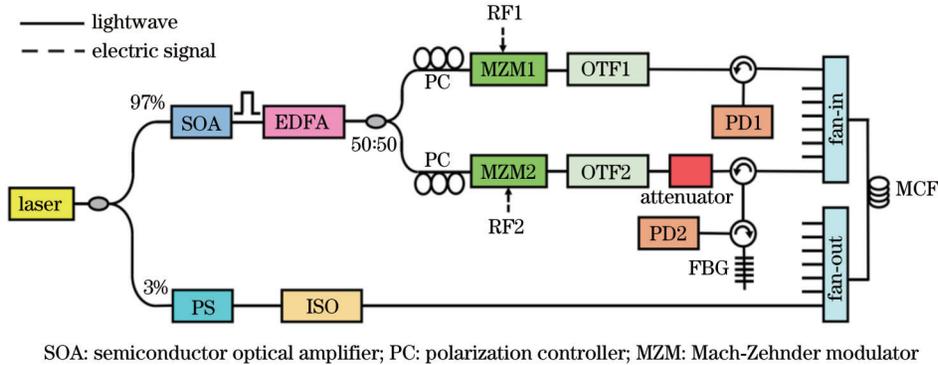
2018 年, Fu 等^[10]利用频分复用、波分复用和时分复用技术融合了 BOTDA 系统与 φ -OTDR 系统,同时

通过合并分布式拉曼放大与分布式布里渊放大技术,最终实现了 150.62 km 的传感距离, BOTDA 和

φ -OTDR 子系统的空间分辨率分别为 9 m 和 30 m。

时分复用技术利用时间差将两个独立系统融合成一套系统,但牺牲了单一参量测量时间和频率响应,空分复用技术则避免了这一问题。2017年,Dang等^[11]采用多芯光纤(MCF)空分复用实现了 φ -OTDR与

BOTDA的组合。系统结构如图5所示,探测光脉冲经耦合器分为两支路,分别接入多芯光纤中的两芯,实现 φ -OTDR和BOTDA。之后,所需的瑞利散射信号和布里渊散射信号分别被两个独立的光电探测器接收,互不影响。



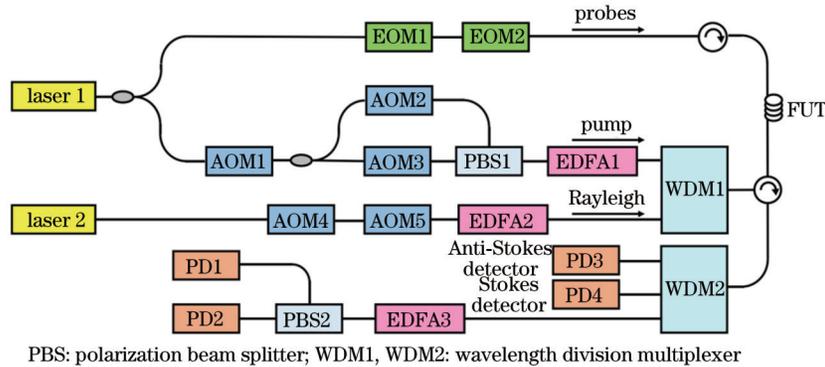
SOA: semiconductor optical amplifier; PC: polarization controller; MZM: Mach-Zehnder modulator

图 5 空分复用的BOTDA与 φ -OTDR融合系统

Fig. 5 Space-division multiplexing combined system of BOTDA and φ -OTDR

空分复用技术虽然可在不影响测量时间和频率响应的情况下实现系统融合,但多芯光纤这一要求限制了空分复用技术的应用场景。2022年,Murray等^[12]同样采用波分复用的方法将 φ -OTDR和BOTDA两种

传感系统进行组合。如图6所示, φ -OTDR和BOTDA子系统的/sources具有一定波长间隔,因此,它们所产生的布里渊散射光和瑞利散射光可以通过波分复用器实现分离,并被独立的光电探测器所接收。



PBS: polarization beam splitter; WDM1, WDM2: wavelength division multiplexer

图 6 波分复用的BOTDA与 φ -OTDR融合系统

Fig. 6 Wavelength-division multiplexing combined system of BOTDA and φ -OTDR

2.3 用于静态变量分离的瑞利散射与布里渊散射融合系统

除了上述用于动态、静态变量测量相结合的融合系统之外,由于瑞利散射和布里渊散射的频移对温度和应变的线性系数不同,研究人员考虑将二者结合,以解决单种散射机制中存在的温度/应变交叉敏感问题。

2013年,Zhou等^[13]在大有有效面积非零色散光纤(LEAF)上,结合差分脉冲对的BOTDA(DPP-BOTDA)和光频域反射仪(OFDR)技术,在92 m传感距离、50 cm空间分辨率的情况下实现了温度和应变的同时测量,其中温度测量精度为 $\pm 1.2\text{ }^\circ\text{C}$,应变测量精度为 $\pm 15\text{ }\mu\epsilon$ 。该系统利用波分复用技术分离光纤中产生的布里渊散射光和瑞利散射光,使两个独立系统工作在不同的中心波长上。但该系统复杂且测量距

离受限于激光器相位噪声。

2014年,Kishida等^[14]提出了一种波长调谐型相干光时域反射计(TW-COTDR)与BOTDA的融合型分布式光纤传感系统,由于探测到的瑞利散射光和布里渊散射光的频率偏移均对温度和应变敏感,且具有不同的线性系数,因此只要联立多组独立的频移-应变/温度表达式,即可分离应变和温度变化。但该方案只是使两套独立的系统(TW-COTDR与BOTDA)分别工作在不同波长下,使用不同波长的探测光对同一待测光纤进行测量,系统的融合度并不高。

2022年,Wang等^[15]结合基于啁啾脉冲的 φ -OTDR以及BOTDA系统(CP- φ -OTDR/CP-BOTDA),实现了温度和应变的同时传感。如图7所示,该系统将光纤上应变和温度的变化转化为传感信

号在时域上的延迟进行传感。结果表明,该融合系统可在 5 km 非均匀光纤上实现 4.5 m 的空间分辨率,其中应变测量精度为 $4.3 \mu\epsilon$, 温度测量精度为 $0.32 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

但该方案需要使用特殊光纤作为传感光纤,这一要求限制了系统的应用场景。

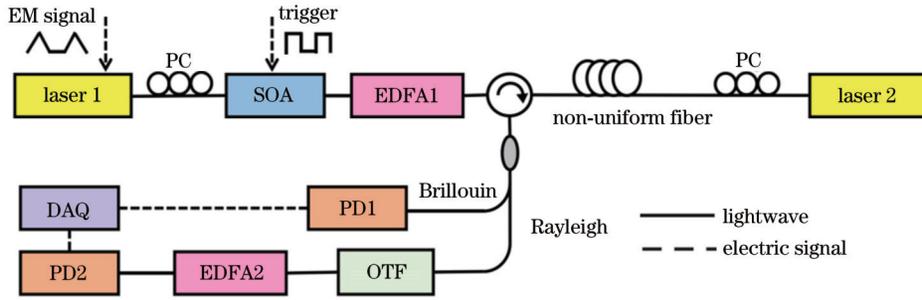


图 7 CP-BOTDA 与 CP- φ -OTDR 的融合系统
Fig. 7 Combined system of CP-BOTDA and CP- φ -OTDR

除了使用扫频方案,散射信号的强度也可用于温度应变分离的解调。2021 年, Clément 等^[16]提出 COTDR 与 BOTDR 相融合的分布式光纤传感系统以解决温度与应变交叉敏感问题。通过分析瑞利散射与布里渊散射信号的强度分布曲线,获取只与温度相关的 Landau-Plazek 比(瑞利散射信号与布里渊散射信号的强度比),进而分离出布里渊频移中只受应变影响的部分,实现对温度和应变的同时测量。该系统在 1 km 光纤总长下可实现 $0.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度测量不确定度及 $20 \mu\epsilon$ 的应变测量不确定度,在 10 km 光纤总长下可实现 $3 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度测量不确定度及 $75 \mu\epsilon$ 的应变测量不确定度(空间分辨率均为 2 m)。但使用强度信号解调的方案对信噪比要求高,系统的测量精度和测量距离受到限制。

2.4 瑞利散射光作为探测光的布里渊系统

传统 BOTDA 采用双端接入光纤的结构,即在光纤的一端注入布里渊泵浦脉冲,在另一端注入连续的探测光,通过不断改变泵浦-探测光频率差,得到相应频点下的探测光增益,并获取光纤沿线的布里渊频移,从而实现传感。然而,双端接入的结构不利于实际工

程应用。研究人员考虑将瑞利散射光作为布里渊传感系统的探测光,从而实现 BOTDA 的单端接入测量。同时,系统利用瑞利散射光的优势,具有多参量传感的能力。

Huang 等^[17-18]结合瑞利散射与受激布里渊散射,将瑞利探测脉冲产生的背向瑞利散射光作为 BOTDA 的探测光,实现单端 BOTDA 和 φ -OTDR 的融合系统。如图 8 所示,该系统将一组由瑞利探测脉冲和布里渊泵浦脉冲组成的脉冲对注入传感光纤中。瑞利探测脉冲在时域上先于布里渊泵浦脉冲,利用瑞利探测脉冲产生的背向瑞利散射光与布里渊泵浦脉冲构成 BOTDA 的对向泵浦-探测对模式。同时,瑞利探测脉冲产生的瑞利散射光经过相干接收,可实现 φ -OTDR 测量振动的功能。该融合系统使用最常见的普通单模光纤进行传感,在最大程度上实现了两套独立系统的结合,且无需大带宽探测,不仅允许单端接入光纤进行传感,还能同时测量多种动态与静态变量,在 14 km 的光纤长度上可实现 5 m 的温度测量空间分辨率、约 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度测量精度、10 m 的振动测量空间分辨率。

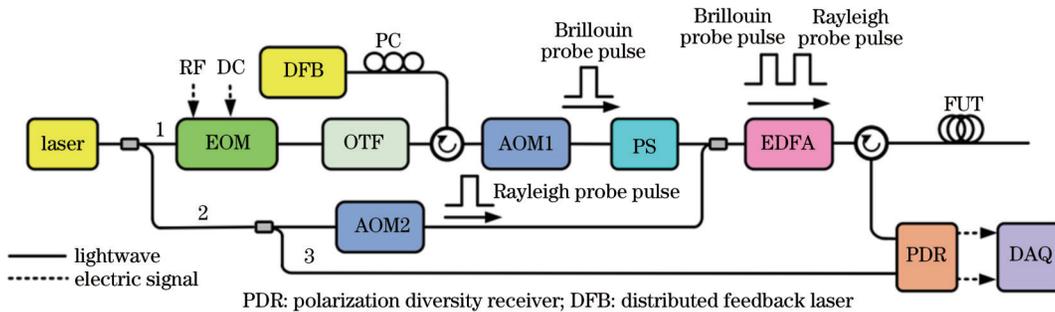


图 8 多参量同时测量的瑞利-布里渊融合系统图
Fig. 8 Rayleigh-Brillouin combined system for multi-parameter simultaneous measurement

3 基于瑞利散射和拉曼散射的分布式光纤传感系统

单频探测脉冲的瑞利散射光和自发拉曼散射光的

频率相差约 13 THz,可通过波分复用器对二者进行分离,并使其被不同的探测器同时接收。由于拉曼散射光的强度变化仅对温度敏感,故研究人员一般将拉曼散射和瑞利散射相结合用于振动和温度变化的同时测

量。瑞利散射与拉曼散射的融合系统也可以分为基于复用的融合系统与基于同一探测光的融合系统。

3.1 基于复用的融合系统

2014年,周进^[19]利用时分复用技术,将两组峰值功率不同的脉冲分别作为拉曼光时域反射仪(ROTDR)(高峰值功率)和OTDR(低峰值功率)的探测脉冲,用于测量温度和振动。该系统在1.2 km的传感距离下实现了5.8 m的振动空间分辨率、1 kHz和10 kHz振动信号的测量、4.8 m的温度空间分辨率、 $\pm 3^\circ\text{C}$ 的测温精度。

时分复用的解决方案降低参量的测量速度以及振动测量的频率响应,而空分复用技术则可以避免这一问题。2018年,Zhao等^[20]利用空分复用,提出基于多芯光纤的 φ -OTDR/ROTDR组合系统,利用多芯光纤的不同纤芯分别产生所需的瑞利散射信号和拉曼散射信号,此外,多芯光纤外芯对弯曲敏感,对外界振动所产生的应变更加敏感,因此更加适用于实施 φ -OTDR的测量。

3.2 基于同一探测光的融合系统

基于复用的系统是将两个独立的系统通过不同的通道(波长、时间、纤芯)进行结合,器件的融合程度并

不高。并且基于空分复用的技术往往需要特殊光纤,这限制了空分复用系统的应用场景。相比之下,使用同一探测光的融合系统的器件融合程度更高,且可使用普通单模光纤实现传感,这更加适合低成本、大规模的应用场景。

2016年,Muanenda等^[21]使用DFB激光器和循环脉冲编码,结合ROTDR和直接探测的 φ -OTDR实现了温度和振动的同时测量。实验使用255 bit循环脉冲编码,实现5 km传感距离、5 m空间分辨率以及 0.5°C 温度分辨率的传感,同时测量500 Hz正弦振动信号。2021年,Zhou等^[22]结合ROTDR和 φ -OTDR,实现了3 km传感距离、8 m空间分辨率以及 0.6°C 温度测量精度,并能够实现振动测量。

上述两个方案采用的是直接接收的 φ -OTDR,其信噪比低于外差探测的 φ -OTDR,且无法实现对瑞利散射相位的接收和解调,难以线性还原振动信号。2018年,Zhang等^[23]提出 φ -OTDR/ROTDR系统融合的新方案,如图9所示,将外差探测型 φ -OTDR与ROTDR系统进行结合。该系统在总长12 km的光纤上实现 0.95°C 的温度测量不确定度,并能够定量解调动态振动引起的应变变化。

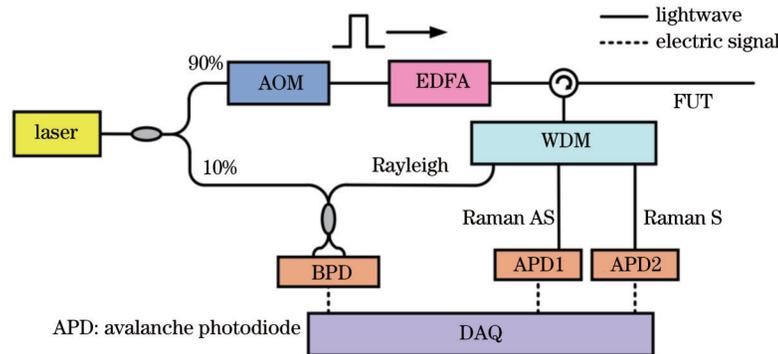


图9 基于外差探测的 φ -OTDR和ROTDR的融合系统

Fig. 9 Combined system of φ -OTDR and ROTDR based on heterodyne detection

4 基于拉曼散射和布里渊散射的分布式光纤传感系统

光纤中的拉曼散射只对温度敏感,无法用于应变测量。而光纤中的布里渊散射对温度和应变皆敏感,虽然可以用于测量两种变量,但也引入了温度/应变交叉敏感的问题。研究人员将拉曼散射和布里渊散射结合,以实现能克服温度应变交叉敏感的分布式温度/应变光纤传感系统。

2004年,Alahbabi等^[24]融合ROTDR和BOTDR系统,利用波分复用器分离同一个探测脉冲产生的自发拉曼散射光和自发布里渊散射光,实现了6.3 km的测量距离、5 m的空间分辨率、 3.5°C 的温度分辨率和 $80 \mu\epsilon$ 的应变分辨率。

为了进一步提升布里渊系统的信噪比,研究人员

将BOTDA系统与ROTDR系统相结合。2006年,Brown等^[25]结合BOTDA和ROTDR系统,使用不同的子系统分别测量待测光纤沿线的温度和应变,在总长280 m的光纤上实现温度和应变分离,其空间分辨率为1.5 m,温度测量精度为 1°C ,应变测量精度为 $50 \mu\epsilon$ 。

2013年,Taki等^[26]结合BOTDA和ROTDR系统,并利用循环脉冲编码提升信噪比,实现10 km传感距离、1 m空间分辨率、 3.4°C 温度分辨率。该系统结构如图10所示。

2016年,Zhao等^[27]将多芯光纤空分复用的方法引入BOTDR与ROTDR融合型分布式光纤传感系统中,使BOTDR与ROTDR各自的泵浦脉冲分别工作于多芯光纤的不同芯中,避免了ROTDR所需的高脉冲峰值功率对BOTDR信号的非线性影响,并实现了

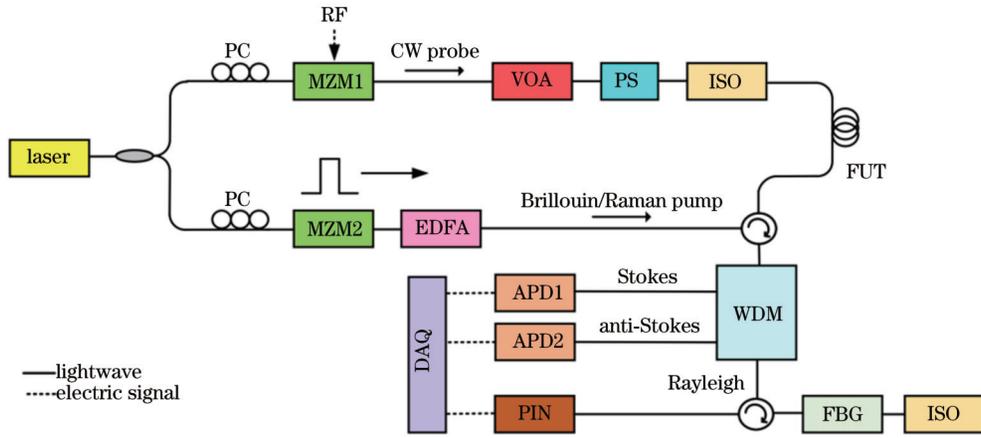


图 10 循环编码的 BOTDA 和 ROTDR 融合系统

Fig. 10 Combined system of cyclic coding BOTDA and ROTDR

6 km 的传感距离和 3 m 的空间分辨率, 温度和应变的分辨率分别为 $2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $40\text{ }\mu\epsilon$ 。

5 结合瑞利散射、布里渊散射和拉曼散射的融合系统

以上介绍的结合两种散射机制的传感系统虽然能实现多参量的测量, 但仍然存在一定的局限性, 无法在实现温度、应变分离的同时测量振动事件。

2023 年, Huang 等^[28] 使用同一单模光纤作为传感光纤, 结合瑞利散射、受激布里渊散射和自发拉曼散射实现了光纤沿线的振动、温度和应变的同时传感和定量测量。如图 11 所示, 该系统将两个相邻光脉冲注入光纤, 利用前一脉冲产生的瑞利散射光实现振动测量, 同时将其作为布里渊传感系统的探测光, 与后一脉冲发生受激布里渊散射, 用于对温度/应变的测量。由于两个脉冲产生的拉曼散射光在频域上高度重合, 无法

直接在频域上将其分离。若直接使用两脉冲的拉曼散射光进行解调将会导致系统空间分辨率的降低。为了解决该问题, 该系统引入脉冲编码方案, 通过调整两脉冲之间的时间间隔实现三位 simplex 编码, 在时域上区分两脉冲各自产生的自发拉曼散射光, 从而可用于温度测量。最终在不损失空间分辨率的情况下解决了布里渊传感系统中温度、应变交叉敏感的问题, 同时实现振动传感。

该系统不同于三种测量系统的简单组合或是使用相对直接的时分复用方案, 使不同子传感系统复用同一光源, 并仅通过接收一个脉冲产生的瑞利散射光来实现振动、温度和应变的同时传感测量, 不仅提升了测量反馈速度, 还具有单端接入光纤测量的优势, 该系统实现近 10 km 的测量距离、10 m 的空间分辨率、 $21.36\text{ }\mu\epsilon$ 的应变测量精度、 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度测量精度和 $10\text{ }\mu\epsilon/\sqrt{\text{Hz}}$ 的振动测量噪声。

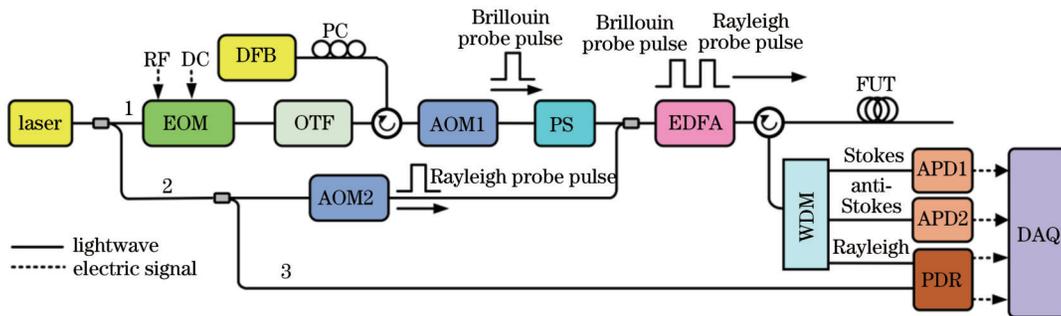


图 11 温度应变可分离的多参量同时测量的融合系统

Fig. 11 Combined system for simultaneous measurement of multiple parameters with separable temperature and strain

6 分布式与其他技术融合的光纤传感系统

除了利用分布式光纤传感技术中不同散射机理之间的相互结合来扩展系统功能或提升性能指标之外, 研究人员还利用分布式光纤传感技术与其他光纤传感

技术的结合来提升系统性能(表 1)。

2013 年, Zhu 等^[29] 结合 φ -OTDR 和 MZI 技术, 利用 φ -OTDR 定位振动, 利用 MZI 测量振动的频率, 扩大系统频率响应范围。该系统的探测光由脉冲光和连续光基底组成, 脉冲光产生的背向瑞利散射光用于 φ -OTDR 的信号解调, 经过传感光纤之后的连续光基

表 1 不同散射机制结合的分布式光纤传感系统方案总结

Table 1 Summary of distributed optical fiber sensing systems based on different scattering mechanism

Scattering	Year	Scheme	Parameter	Multiplexing or special fiber	Access	Temperature-strain discrimination
Rayleigh and Brillouin scattering	2016	φ -OTDR/BOTDR ^[4]	Vibration/temperature/strain	—	Single	No
	2022	φ -OTDR/BOTDR ^[5]	Vibration/temperature/strain	—	Single	No
	2021	φ -OTDR/BOTDA ^[6]	Vibration/temperature/strain	—	Double	No
	2020	φ -OTDR/OCC-BOTDA ^[7]	Vibration/temperature/strain	—	Double	No
	2013	COTDR/single-end BOTDA ^[8]	Breaking point/temperature/strain	TDM	Single	No
	2016	φ -OTDR/BOTDR ^[9]	Vibration/temperature/strain	TDM	Single	No
	2018	φ -OTDR/BOTDA ^[10]	Vibration/temperature/strain	TDM/WDM/FDM	Double	No
	2017	φ -OTDR/BOTDA ^[11]	Vibration/temperature/strain	SPM/multi-core fiber	Double	No
	2022	φ -OTDR/BOTDA ^[12]	Vibration/temperature/strain	WDM	Double	No
	2013	OFDR/DPP-BOTDA ^[13]	Temperature/strain	LEAF	Double	Yes
	2014	TW-COTDR/BOTDA ^[14]	Temperature/strain	—	Double	Yes
	2022	CP-OTDR/CP-BOTDA ^[15]	Temperature/strain	Non-uniform fiber	Double	Yes
	2021	COTDR/BOTDR ^[16]	Temperature/strain	—	Single	Yes
2022	φ -OTDR/single-end BOTDA ^[17-18]	Vibration/temperature/strain	—	Single	No	
Rayleigh and Raman scattering	2014	φ -OTDR/ROTDR ^[19]	Vibration/temperature	TDM	Single	No
	2018	φ -OTDR/ROTDR ^[20]	Vibration/temperature	SDM/multi-core fiber	Single	No
	2016	φ -OTDR/ROTDR ^[21]	Vibration/temperature	—	Single	No
	2021	φ -OTDR/ROTDR ^[22]	Vibration/temperature	—	Single	No
	2018	φ -OTDR/ROTDR ^[23]	Vibration/temperature	—	Single	No
Brillouin and Raman scattering	2004	BOTDR/ROTDR ^[24]	Temperature/strain	—	Single	Yes
	2006	BOTDA/ROTDR ^[25]	Temperature/strain	—	Double	Yes
	2013	BOTDA/ROTDR ^[26]	Temperature/strain	—	Double	Yes
	2016	BOTDR/ROTDR ^[27]	Temperature/strain	SDM/multi-core fiber	Single	Yes
Rayleigh Brillouin and Raman scattering	2023	φ -OTDR/single-end BOTDA/ROTDR ^[28]	Vibration/temperature/strain	—	Single	Yes

底和参考光的干涉信号用于 MZI 的信号解调,该系统在总长为 1064 m 的光纤上实现 5 m 的空间分辨率和 10 Hz~3 MHz 的频率响应范围。

2015 年, Fang 等^[30]将单 MI 结构引入 φ -OTDR 系统,利用相位生成载波 (PGC) 的方法在 10 km 传感距离上实现 6 m 的空间分辨率,对于频率为 10 kHz 信号

的解调,信噪比可达 30.45 dB。2016 年,He 等^[31]将频分复用技术与上述系统结合,简化系统结构,扩大 φ -OTDR 的频率响应范围,该系统可实现 3 km 的测量距离、10 m 的空间分辨率和最高 40 kHz 的频率响应,系统结构如图 12 所示。

Ma 等分别将 φ -OTDR 与 MZI 结构^[32]、MI 结构^[33]、SI 结构^[34]相融合,利用法拉第反射镜消除偏振衰落的影响,实现 4 km 光纤链路上 35 kHz 和 65 kHz

频率的两点振动测量。

除了利用干涉式结构来提升传感系统性能之外,分立式光纤传感器也可与分布式光纤传感器结合实现多参量的测量传感。分立式光纤传感器相对于分布式传感器在测量精度和测量范围方面具有优势,但测量点数受限,且需要特殊的光纤结构。实际应用中可通过不同的场景需求来灵活选择分布式光纤传感器或单点式光纤传感器。

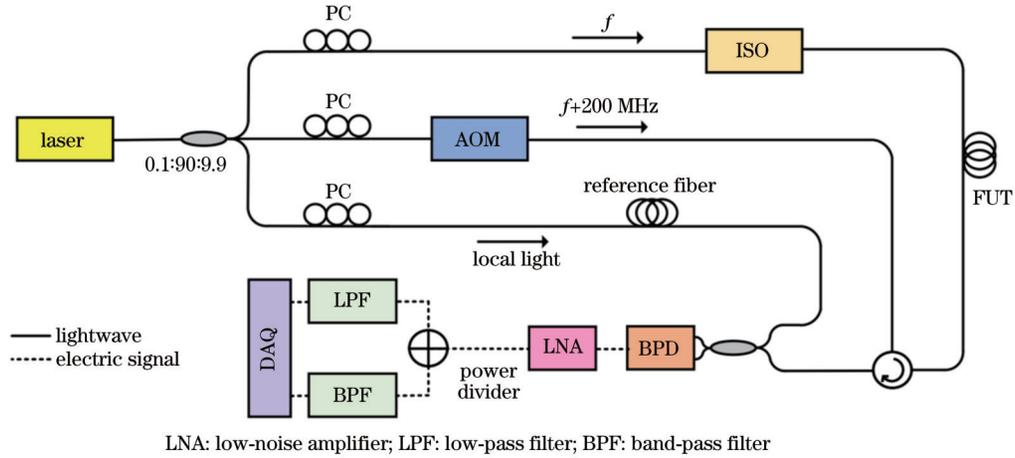


图 12 结合干涉式结构的分布式光纤传感系统

Fig. 12 Distributed optical fiber sensing system combined with interferometric structure

2018 年, Li 等^[35]利用超短光纤布拉格光栅 (USFBG) 阵列和双波长的脉冲, 实现了分布式静态应变和动态振动的同时测量。在该系统中, 探测脉冲经 USFBG 的反射光功率变化可用于测量静态应变, 可以通过接收并分析 3×3 耦合器的三路输出光来解调反射光的相位变化, 进而解调振动信号。该系统可实现总长为 2 km 光纤上 964 个 USFBG 的传感, 应变测量精度达到 ne 级别, 振动测量频率最高可达 12.5 kHz。

2014 年, Lan 等^[36]通过光开关将 BOTDA/BOTDR 系统与光纤布拉格光栅 (FBG) 系统以时分复用的形式相结合, 以监测混凝土梁的预应力。

2019 年, Li 等^[37]结合 BOTDA、FBG 和长周期光

纤光栅 (LPFG) 来实现分布式的静态应变和多离散点的动态应变的同时测量。如图 13 所示, 该系统利用 EDFA 对 BOTDA 的泵浦脉冲以及连续探测光进行放大, 同时利用 EDFA 产生的 ASE 光作为 FBG 及 LPFG 的探测光, 在接收端前利用密集光波分复用器 (DWDM) 将 BOTDA 的探测光与 FBG 反射谱及 LPFG 透射谱分离, 并利用不同的探测器进行独立探测。实验中使用总长为 1 km 的传感光纤, 并在 200 m、400 m、600 m 处分别设置一个 FBG, 在 800 m 处设置一个 LPFG, 最终实现 10 cm 空间分辨率和 1.52 °C 温度分辨率的分布式温度测量, 以及光栅处的大动态范围应变 (2900~5000 $\mu\epsilon$) 测量。

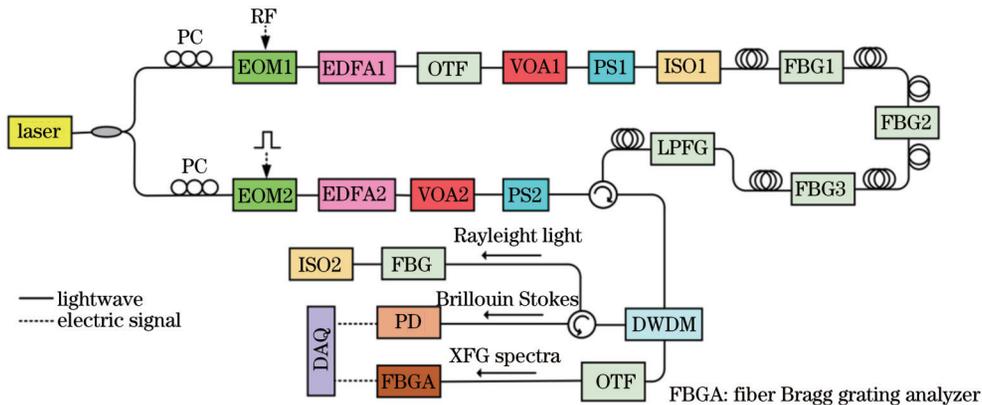


图 13 BOTDA 与多种光纤光栅结合的融合系统

Fig. 13 Combined system of BOTDA with various fiber gratings

7 研究展望

随着大规模传感监测需求的不断增加,研究者们提出了越来越多的融合型分布式光纤传感系统,使得传感效果不断提升。未来应重点在器件复用度、传感性能及与数据处理和实际应用的结合等方面研究融合型分布式光纤传感系统。

融合型分布式光纤传感系统的天然优势之一是对不同原理传感系统中器件的复用,可以在实现多种传感功能的情况下,显著降低系统的成本。研究创新的方案设计以及新型的光电信号分离器件,使融合系统尽可能复用更多的器件,并无损地分离多种不同散射光产生的信号,是体现融合型分布式光纤传感系统优势的关键问题。同时研究创新的方案设计,利用不同信号之间的不同物理机理,实现对单一参量传感性能的提升或实现对交叉敏感效应的高精度分离,也是一个重要的研究方向。

近年来,机器学习等数据处理方法与分布式光纤传感系统结合的研究逐渐涌现^[38-39]。使用数据处理方法可以在不增加系统硬件复杂度和成本的前提下扩展系统的应用场景、提升系统的性能。因此,结合数据处理方法实现不同特征信号的提取和分类以及系统性能的提升也是多机理融合的分布式光纤传感系统未来的重要研究方向。

在实际传感应用中,融合型分布式光纤传感系统可提供更为丰富的传感信息。如何与实际应用深入结合,从传感系统的设计、传感光缆的布设以及多传感信息的使用等方面进行总体考虑和设计,使不同的传感信息能够更加灵敏、有差异地反映监测对象的状态,以及与大数据、机器学习算法等进行结合,是实现融合型分布式光纤传感系统在实际应用中落地的重要方向。

参 考 文 献

- [1] 赵艳夺,王目光,张静,等.高空间分辨率大带宽分布式光纤振动传感系统[J].光学学报,2022,42(19):1906004.
Zhao Y D, Wang M G, Zhang J, et al. Distributed optical fiber vibration sensing system with high spatial resolution and large bandwidth[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(19): 1906004.
- [2] 倪家升,刘铁根,尚盈,等.用于石油物探的分布式光纤声波地震检波器[J].激光与光电子学进展,2022,59(3):0306006.
Ni J S, Liu T G, Shang Y, et al. Distributed fiber-optic acoustic seismic geophone for petroleum geology exploration[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(3): 0306006.
- [3] 王花平.分布式光纤传感器与被测结构的界面效应影响分析[J].光学学报,2022,42(2):0206004.
Wang H P. Influence of interfacial effect between distributed optical fiber sensors and monitored structures[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(2): 0206004.
- [4] Peng F, Cao X L. A hybrid Φ /B-OTDR for simultaneous vibration and strain measurement[J]. Photonic Sensors, 2016, 6(2): 121-126.
- [5] Zhou X, Wang F, Liu Z, 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.

- [6] Coscetta A, Catalano E, Cerri E, et al. Hybrid Brillouin/Rayleigh sensor for multiparameter measurements in optical fibers[J]. Optics Express, 2021, 29(15): 24025-24030.
- [7] Wang B Z, Ba D X, Chu Q, et al. High-sensitivity distributed dynamic strain sensing by combining Rayleigh and Brillouin scattering[J]. Opto-Electronic Advances, 2020, 3(12): 20001301-20001315.
- [8] Zhang X P, Hu J H, Zhang Y X. A hybrid single-end-access BOTDA and COTDR sensing system using heterodyne detection[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(12): 1954-1959.
- [9] Zhang J D, 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.
- [10] Fu Y, Wang Z N, Zhu R C, et al. Ultra-long-distance hybrid BOTDA/ Φ -OTDR[J]. Sensors, 2018, 18(4): 976.
- [11] Dang Y L, Zhao Z Y, 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.
- [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, 2022, 31(1): 287-300.
- [13] Zhou D P, Li W H, Chen L, et al. Distributed temperature and strain discrimination with stimulated Brillouin scattering and Rayleigh backscatter in an optical fiber[J]. Sensors, 2013, 13(2): 1836-1845.
- [14] Kishida K, Yamauchi Y, Guzik A. Study of optical fibers strain-temperature sensitivities using hybrid Brillouin-Rayleigh system [J]. Photonic Sensors, 2014, 4(1): 1-11.
- [15] Wang Y, Bao X Y. Single-shot hybrid CP- ϕ OTDR/CP-BOTDA system for simultaneous distributed temperature/strain sensing[C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2022, March 6-10, 2022, San Diego, California. Washington, DC: Optica Publishing Group, 2022: Th2A.15.
- [16] Clément P, Gabet R, Lanticq V, et al. B-OTDR solution for independent temperature and strain measurement in a single acquisition[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(18): 6013-6020.
- [17] Huang L J, He Z Y, Fan X Y. Simplified single-end Rayleigh and Brillouin hybrid distributed fiber-optic sensing system[J]. Science China Information Sciences, 2023, 66(2): 129404.
- [18] Huang L J, Fan X Y, He Z Y. Hybrid distributed fiber-optic sensing system by using Rayleigh backscattering lightwave as probe of stimulated Brillouin scattering[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(13): 4374-4380.
- [19] 周进.多参数分布式光纤传感系统关键技术研究[D].重庆:重庆大学,2015.
Zhou J. Research on key technologies of multi-parameter distributed optical fiber sensing system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [20] Zhao Z Y, Dang Y L, Tang M, et al. Enabling simultaneous DAS and DTS through space-division multiplexing based on multicore fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(24): 5707-5713.
- [21] Muanenda Y, Oton C J, Faralli S, et al. Hybrid distributed acoustic and temperature sensor using a commercial off-the-shelf DFB laser and direct detection[J]. Optics Letters, 2016, 41(3): 587-590.
- [22] Zhou Z X, Tian L, Han Y S, et al. Distributed vibration and temperature simultaneous sensing using one optical fiber[J]. Optics Communications, 2021, 487: 126801-126806.
- [23] Zhang Y X, Cai Y S, Xiong F, et al. A hybrid distributed optical fibre sensor for acoustic and temperature fields reconstruction[J]. Optics Communications, 2019, 435: 134-139.

- [24] Alahbabi M N, Cho Y T, Newson T P. Simultaneous distributed measurements of temperature and strain using spontaneous Raman and Brillouin scattering[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5502: 488-491.
- [25] Brown K A, Brown A W, Colpitts B G. Combined Raman and Brillouin scattering sensor for simultaneous high-resolution measurement of temperature and strain[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6167: 616716.
- [26] Taki M, Signorini A, Oton C J, et al. Hybrid Raman/Brillouin-optical-time-domain-analysis-distributed optical fiber sensors based on cyclic pulse coding[J]. Optics Letters, 2013, 38(20): 4162-4165.
- [27] Zhao Z Y, Dang Y L, Tang M, et al. Spatial-division multiplexed hybrid Raman and Brillouin optical time-domain reflectometry based on multi-core fiber[J]. Optics Express, 2016, 24(22): 25111-25118.
- [28] Huang L J, Fan X Y, He H J, et al. Single-end hybrid Rayleigh Brillouin and Raman distributed fibre-optic sensing system[J]. Light: Advanced Manufacturing, 2023, 4(2): 16.
- [29] Zhu T, He Q, Xiao X H, et al. Modulated pulses based distributed vibration sensing with high frequency response and spatial resolution[J]. Optics Express, 2013, 21(3): 2953-2963.
- [30] Fang G S, Xu T W, Feng S W, et al. Phase-sensitive optical time domain reflectometer based on phase-generated carrier algorithm[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(13): 2811-2816.
- [31] He H J, Shao L Y, Li Z L, et al. Distributed vibration sensing with high frequency response based on frequency division multiplexing[C]//Optical Fiber Communication Conference, March 20-22, 2016, Anaheim, California. Washington, DC: OSA, 2016: M2D.1.
- [32] Ma P F, Sun Z S, Liu K, et al. Distributed fiber optic vibration sensing with wide dynamic range, high frequency response, and multi-points accurate location[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 124: 105966.
- [33] Sun Z S, Liu K, Jiang J F, et al. Dynamic phase extraction in an ameliorated distributed vibration sensor using a highly stable homodyne detection[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(23): 27005-27014.
- [34] Sun Z S, Liu K, Jiang J F, et al. Distributed vibration sensing with high frequency response by using WDM based integrated scheme[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020, 53(15): 155106-155112.
- [35] Li Z Y, Tong Y H, Fu X L, et al. Simultaneous distributed static and dynamic sensing based on ultra-short fiber Bragg gratings[J]. Optics Express, 2018, 26(13): 17437-17446.
- [36] Lan C G, Zhou Z, Ou J P. Monitoring of structural prestress loss in RC beams by inner distributed Brillouin and fiber Bragg grating sensors on a single optical fiber[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2014, 21(3): 317-330.
- [37] Li F, Zhao W G, Xu H B, et al. A highly integrated BOTDA/XFG sensor on a single fiber for simultaneous multi-parameter monitoring of slopes[J]. Sensors, 2019, 19(9): 2132.
- [38] 薛康, 刘琨, 江俊峰, 等. 基于YOLOv5s模型的光纤振动传感事件精准检测研究[J]. 光学学报, 2023, 43(2): 0228001.
- [39] Xue K, Liu K, Jiang J F, et al. Optical fiber vibration sensing detection with high accuracy based on YOLOv5s model[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(2): 0228001.
- [39] 于森, 张耀鲁, 何禹潼, 等. 变分模态分解-排列熵方法用于分布式光纤振动传感系统去噪[J]. 光学学报, 2022, 42(7): 0706005.
- Yu M, Zhang Y L, He Y T, et al. Variational mode decomposition and permutation entropy method for denoising of distributed optical fiber vibration sensing system[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(7): 0706005.

Multi-Mechanism Distributed Fiber-Optic Sensing Technology

Huang Linjing¹, Zhou Xiao^{2,3}, Fan Xinyu^{1*}, Wang Feng^{2,3**}, Zhang Xuping^{2,3}, He Zuyuan¹

¹State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

²Key Laboratory of Intelligent Optical Sensing and Manipulation, Ministry of Education, Nanjing University, Nanjing 210023, Jiangsu, China;

³College of Engineering and Applied Science, Nanjing University, Nanjing 210023, Jiangsu, China

Abstract

Significance Internet of Things (IoT) technology is an important part of the new generation of information technology. The IoT is a huge network formed by combining various information devices and sensors. This huge network is based on various types of sensors, and the sensor, as a bridge between the physical world and the digital world, is an integral part of the IoT architecture. Distributed fiber-optic sensing (DFOS) technology is widely used in many fields because of its long-distance, large-range, high-precision, and multi-point measurement capabilities.

However, most of the DFOS sensing systems use a single scattering mechanism. The parameters measured by a single scattering mechanism are limited, so it fails to fully and accurately reflect the real state of the measured object, and it is difficult to fully and effectively meet the needs of health monitoring or automatic control. In order to solve the problem that the conventional DFOS system only uses a single scattering mechanism, researchers have proposed a series of DFOS sensing systems with multi-mechanism in recent years, using the same system to measure multiple parameters. In this paper, the multi-mechanism DFOS technology developed in recent years is reviewed, and the different multi-mechanism DFOS systems and their performances are classified from the perspective of different scattering mechanisms (Table 1).

Progress There are three kinds of scattering in optical fibers, namely Rayleigh scattering, Brillouin scattering, and Raman scattering. DFOS systems that use only one of these scattering mechanisms measure limited parameters. The multi-mechanism DFOS systems can measure more parameters by using multiple scattering mechanisms in one system, so as to reflect the state of the measured object more comprehensively.

The multi-mechanism DFOS systems are divided into five categories according to the sensing mechanism used. The system combining Rayleigh scattering with Brillouin scattering can be used not only to measure temperature, strain, and vibration but also to separate the response of temperature and strain. Systems that combine Rayleigh scattering with Raman scattering can be used for sensing temperature and vibration events. Systems that combine Brillouin scattering with Raman scattering are generally used to separate system responses due to temperature and strain.

The methods of combining scattering mechanisms in the systems are different. In this paper, these combination methods are divided into two categories: the combination based on multiplexing (wavelength division multiplexing, space division multiplexing, and time division multiplexing) and the combination of different scattered light generated by the same probe light. Multiplexing-based combination methods are straightforward in principle, but complex systems often require special sensing fibers or sacrifice measurement speed. The system using different scattered light of the same probe light has a simple setup, but special modulation and demodulation schemes are required. In addition, there may be an influence between different scattering mechanisms when the different scattering of the same probe light is used in the same system.

In addition to the combination of different kinds of scattered light in optical fibers, we also enumerate distributed sensing systems using scattered light and single point optical fiber sensing systems using interference structures or gratings. Compared with distributed sensing systems, single-point optical fiber sensing systems have the advantages of high precision and large measurement range, but the number of measured points is limited, and special optical fiber structures (such as fiber grating) are required. In practical applications, distributed fiber optic sensors or single-point fiber optic sensors can be flexibly selected according to different scenario requirements.

Conclusions and Prospects Finally, the prospect of multi-mechanism DFOS technology is provided. With the increasing demand for large-scale sensing and monitoring, researchers have proposed more and more multi-mechanism DFOS systems to measure more parameters and improve sensing performance. The future development of multi-mechanism DFOS systems should focus on the aspects of system complexity, sensing performance, data processing, and practical applications.

One of the natural advantages of multi-mechanism DFOS systems is the multiplexing of components in a sensor system with different mechanisms, which can significantly reduce the cost of the system when multiple sensing functions are implemented. The data processing method expands the application scenarios, increases the functions of the system, and improves the performance of the system without increasing the complexity and cost of the system hardware. Finally, how to deeply integrate the multi-mechanism DFOS systems with practical applications is an important direction. In order to achieve this direction, the design of the sensor system, the layout of the sensor cable, and the use of multi-sensor information should be considered and designed.

Key words sensors; fiber scattering; multi-mechanism; fiber optics; fiber-optic sensing