

# 光纤通感融合系统集成技术专题简介

吕超<sup>1,2</sup>, 郭团<sup>3\*</sup>, 顾仁涛<sup>4</sup>

1. 香港理工大学, 香港 999077

2. 中山大学, 广州 510006

3. 暨南大学, 广州 510632

4. 北京邮电大学, 北京 100876

\* 通信作者. E-mail: tuanguo@jnu.edu.cn

随着人工智能、大数据、云计算等技术的迅猛发展, 全球数据流量呈爆炸式增长, 光纤通信网络作为信息传输的基石, 其覆盖范围与传输容量持续扩大. 与此同时, 光纤本身对温度、应变、振动等外界参量具有高灵敏度, 这使其天然具备了作为分布式传感器的潜力. 在这一背景下, 基于光纤的“光通感融合”技术应运而生, 旨在利用同一根光纤、同一套系统, 同时实现高速数据传输与高精度环境感知. 该技术不仅能极大提升现有光纤基础设施的利用效率及可靠性, 为通信网络的自身运维提供智能监测手段, 更能赋能智慧城市、海底地震监测、智能电网、交通监控等广阔应用领域, 是未来信息基础设施发展的关键方向之一.

为集中展示该领域的最新研究成果与前沿进展, *SCIENCE CHINA Information Sciences* 在 2026 年 69 卷第 6 期出版了“光纤通感融合系统集成技术”专题 (Special Topic: Integrated Optical Fiber Communication and Sensing Systems). 专题共收录文章 6 篇, 包括 3 篇综述和 3 篇研究论文, 内容覆盖了从基础理论、核心技术到典型应用的全链条, 系统梳理了当前光纤通感融合系统集成技术的发展脉络与挑战.

面向光通感融合技术的理论根基与技术革新, 综述“Towards converged networks: a review of integrated optical fiber sensing and communication”全面剖析了 3 种核心传感范式: 基于后向瑞利散射的分布式声波传感 (DAS)、基于前向传输的光学相位传感, 以及基于前

向传输的偏振态 (SOP) 传感. 文章对比了它们在空间分辨率、传感距离、系统复杂度和成本等方面的优劣, 指出 DAS 在短距离内提供卓越的空间定位精度, 而前向相位/偏振方案则在超长距离 (如跨洋海缆) 监测中更具优势. 论文还探讨了这些技术与现代相干及强度调制直接检测通信系统的集成方案, 包括波分复用 (WDM)、空分复用 (SDM)、非线性损伤抑制以及硬件共享架构, 并展望了未来向多参量、混合架构和智能化的演进路径.

从系统集成的视角系统归纳当前光通感融合技术的研究进展和技术类型, 综述“A review of optical fiber integrated sensing and communication systems”将现有方案划分为“基于背向散射”和“基于前向传感”两大技术路线. 在背向散射部分, 详细讨论了基于瑞利散射的 DAS 技术在共纤传输中的非线性干扰抑制、扩频编码、长距离探测等关键技术; 在前向传感部分, 系统阐述了基于 SOP 和基于光相位的传感机理, 及其与 WDM、SDM、数字子载波复用等先进光通信技术的融合方案. 此外, 论文还介绍了基于数字信号处理的通信驱动传感机制, 如导频辅助和功率分布估计, 展示了如何“零开销”地从通信信号中提取环境信息. 该文为研究人员提供了清晰的通感融合技术图谱.

面向海洋大范围、长距离、实时动态感知这一重大需求, 综述“Intelligent submarine environmental monitoring based on fiber-optic integrated sensing and

引用格式: 吕超, 郭团, 顾仁涛. 光纤通感融合系统集成技术专题简介. 中国科学: 信息科学, 2026, 56: 1579–1580, doi: 10.1360/SSI-2026-0244  
Lu C, Guo T, Gu R T. Special topic: integrated optical fiber communication and sensing systems. *Sci Sin Inform*, 2026, 56: 1579–1580, doi: 10.1360/SSI-2026-0244

communication system”的作者团队系统介绍了基于自主研发 DAS 系统的海底光缆监测应用. 团队开发了基于时域微分与加权标距的动态范围扩展算法、基于三层结构复用的相位衰落抑制技术, 以及结合自监督学习与迁移学习的深度学习降噪算法, 显著提升了 DAS 在复杂海洋环境下的探测性能. 通过在珠江口海底光缆上的实地部署, 该系统成功实现了长达 10 个月的海浪频谱分析、地震事件检测与定位、基于船舶尾波的光缆路径重定位, 以及基于深度学习数据集的船舶检测与“暗船”识别. 该研究展示了将既有海底通信光缆升级为大规模、实时、低成本的海洋环境监测网络的巨大潜力.

聚焦于在真实部署的电信光缆上实现通感融合的工程挑战, 论文“Integrated sensing and communications over deployed terrestrial and submarine telecom cables”详细比较了基于瑞利背向散射 (如相位光时域反射 OTDR) 与基于前向传输 (相位/偏振) 两种技术路线在网络兼容性、信噪比、空间分辨率和环境采样率等方面的本质差异. 针对背向散射传感, 论文探讨了编码、啁啾脉冲、光频域反射 (OFDR) 以及时间交织等技术如何提升信噪比和采样率, 并指出了长距离探测中累积应变导致的多普勒效应问题. 针对前向传感, 论文阐述了利用双向广义互相关进行事件定位的原理, 并展示了如何利用相干接收机中的现有数字信号处理模块 (如均衡器系数) 提取相位和偏振信息, 实现“零额外硬件”的传感功能. 该工作为通感融合技术从实验室走向现网部署提供了重要的设计指导.

针对电力光传输网对多参量监测的迫切需求, 论文“Optical fiber communication and distributed multi-parameter sensing integrated network for smart power grid applications”提出并验证了一种高容量通感融合系统. 该系统采用双外差探测架构和反向传播波分

复用技术, 在单根光纤中实现了布里渊光时域反射仪 (BOTDR) 和 DAS 的共纤、协同解调. 在 100.977 km 的现场光纤链路上, 该系统在维持 100 Gbit/s PM-QPSK 高速传输 (光学信噪比  $>23$  dB, 误码率  $\sim 10^{-1}$ ) 的同时, 实现了 40 m 空间分辨率的温度和应变测量 (BOTDR 精度 2 MHz) 以及 1 Hz 低频振动的检测 (DAS 相位噪声 0.37 rad). 更重要的是, 该系统成功应用于 500 kV 高压线的覆冰监测, 通过测量振动频率变化预测了 10 mm 冰层厚度, 并实时跟踪直流融冰过程中温度升至 30°C 的完整过程, 展示了通感融合技术在智能电网中的巨大应用潜力.

针对前向相位传感方案对昂贵窄线宽激光器的依赖问题, 论文“Machine-learning-enhanced phase-based vibration sensing in coherent DSCM systems under commercial ECLs”提出了一种基于机器学习的低成本解决方案. 该工作利用生成对抗网络构建数字孪生系统, 以解决实验传感数据稀缺的问题, 并生成了大规模数据集用于训练多层感知器 (MLP) 和引入注意力机制的增强型 MLP (AMLMP). 实验结果表明, 在 100 kHz 线宽商用外腔激光器 (ECL) 条件下, 对于 10 kHz 振动信号, MLP 方案相比传统带通滤波器将传感信噪比 (SSNR) 提升了 13 dB, 而 AMLMP 方案凭借注意力机制对关键特征的聚焦, 进一步将 SSNR 提升了 20 dB. 该研究证明了机器学习可以有效克服激光器相位噪声限制, 为实现低成本、高性能、灵活的通感融合系统开辟了新路径.

综上所述, 本专题收录的 6 篇文章从系统架构、关键技术、核心算法到典型应用, 全方位展示了光通感融合技术的最新进展. 相关成果不仅深化了对通感融合机理的理解, 也为推动其在海底观测、智能电网、城市监测等领域的实际应用奠定了坚实基础. 衷心感谢所有作者、审稿专家为本专题顺利出版所付出的辛勤努力.