doi:10.13756/j.gtxyj.2025.240046.
光通信系统与网络技术
刘可为,谢俊杰,吴冰冰,等.通感一体化光网络的技术、应用与展望[J].光通信研究,2025(2):240046.
Liu K W, Xie J J, Wu B B, et al. Technology, Application and Prospect of Integrated Sensing and Communication of Optical Networks[J]. Study on Optical Communications, 2025(2): 240046.

通感一体化光网络的技术、应用与展望

刘可为,谢俊杰,吴冰冰,李 芳
(中国信息通信研究院 技术与标准研究所,北京 100191)

摘要:通信和感知的融合有助于光网络在资源层面的高效复用,赋能光网络多维感知和泛在通信能力,符合未来光网络的发展演进趋势。通感一体化的光网络可充分利用光纤现网资源,提升网络质量和运维效率,实现多种新型光纤传感技术的低成本、高效率和高可靠的部署和应用。文章阐述了光网络通感一体化的关键技术和当前面临的技术难点,阐述并分析了通感一体光网络的典型应用场景,最后对通感一体化光网络的未来发展进行了展望。

关键词:光通信;光纤传感;光网络;通感一体化
中图分类号:TN929 **文献标志码**:A

Technology, Application and Prospect of Integrated Sensing and Communication of Optical Networks

LIU Kewei, XIE Junjie, WU Bingbing, LI Fang
(Institute of Technology and Standards, China Academy of Information and Communications Technology (CAICT), Beijing 100191, China)

Abstract: The integration of sensing and communication is beneficial of efficiently co-utilizing resources for optical networks. It empowers multi-dimensional sensing and ubiquitous optical communication, which is in line with the future development and evolution of optical network. The integrated optical network with sensing and communication capabilities can fully utilize existing fiber-optic network resources, enhance network quality and operational efficiency, and enable low-cost, high-efficiency, and high-reliability deployment and application of various novel fiber-optic sensing technologies. In this paper, we introduce the key technologies and technical challenges of integrated sensing and communication of optical networks. Then we elaborate and analyze several typical application scenarios. Finally, we discuss the prospective development of integrated sensing and communication of optical networks.

Key words: optical communications; optical fiber sensing; optical networks; integration of sensing and communication

0 引 言

近年来,随着第五代移动通信技术(5th Generation Mobile Communication Technology, 5G)和5G-Advanced的商用进程不断推进,大带宽、低时延和高可靠的移动互联网络催生了大量新型应用(如工业互联网、车联网和元宇宙等)的涌现,加快了经济社会数字化转型和智能工业升级的步伐。在此背景下,业界正积极开展第六代移动通信技术(6th Generation Mobile Communication Technology,6G)愿景研究和技术研发。通信和感知一体化(简称"通感一体化")是针对6G提出的全新关键技术之一,旨在通过提升通信服务质量,构建具备智能感知能力的无线通信网络,在新业务和新应用需求的背景下,实现物理世界、虚拟世界及生物要素的多维融合,为万物智联奠定坚实基础。通感一体化促进了通信和传感系统在资源层面的互惠共享以及功能层面的协同增强,是智能网络迈向多场景融合和多功能集成的必然发展趋势。

除6G外,光纤通信网络(简称"光网络")同样具备通感一体化的潜力。光纤作为构建光网络的基础,具有高灵敏、低成本、抗电磁干扰和小体积等一系列优势,其不仅承载了光网络高带宽、低时延、长距离和高可靠的数据传输功能,还具备温度、振动、应变、折射率、磁场和电场等多参量多节点的状态感知能力。得益于规模化的光缆现网资源和低成本、高可靠的光纤传感技术,光网络的通感一体化目前正处于热点探索阶段:实验方面,全光纤传输系统的

收稿日期:2024-03-22; 修回日期:2024-04-30; 纸质出版日期:2025-04-10
基金项目:国家科技部重点研发计划资助项目(2018YFB2201604)
作者简介:刘可为(1996–),男,四川绵阳人。工程师,博士,主要研究方向为高速光传输、非线性光学及光传感等。
通信作者:刘可为,工程师。E-mail:liukewei@caict.ac.cn

通感一体化[1]、光纤及片上波导的通感集成[2]等的可行性已得到验证；应用方面，通感一体化技术已在光网络智能运维[3-5]、油气管网和电力线缆监测[6-8]、地质环境探测[9-10]和智慧交通[11-12]等领域取得了较好的结果。

本文首先介绍了通感一体化光网络中各种分布式光纤传感的技术原理，并阐述了光网络通感一体化面临的技术难点，随后结合相关热点研究介绍了通感一体化的典型应用场景，最后通过分析通感一体化光网络面临的机遇和挑战，对其未来演进趋势进行了展望。

1　通感一体化光网络的关键技术

1.1　分布式光纤传感技术

分布式光纤传感技术是利用光纤的散射效应，对整个光纤沿线在空间和时间上进行分布式传感的技术。根据原理的不同，光纤中的散射分为瑞利散射、拉曼散射和布里渊散射 3 类。其中，瑞利散射是弹性散射，光子能量在散射前后保持不变；拉曼散射和布里渊散射属于非弹性散射，光子与晶格发生能量交换，散射光相对于入射光均发生频移。

1.1.1　基于瑞利散射

光时域反射(Optical Time Domain Reflectometry，OTDR)是基于瑞利散射原理的典型分布式光纤传感技术。OTDR 可用于测量光纤的衰减分布，实现对光纤链路的断点、缺陷和失效部分的有效检测，其典型装置如图 1(a)所示。激光经过光纤链路中的连接器、结合点和弯曲等时，发生背向瑞利散射，反向传播的瑞利散射光由探测系统接收并处理。该过程通常会重复进行多次并取平均，得到 1 条含有跳变沿的倾斜轨迹，根据倾斜度可计算光纤的衰减，另外，根据跳变沿的发生时间可对链路异常点进行定位。OTDR 已广泛应用于运营商光纤链路运维检测，可视为最早的光网络通感一体化技术。

除 OTDR 之外，人们还利用光纤中更加灵敏的偏振和相位变化，提出了偏振型光时域反射(Polarization-Optical Time Domain Reflectometry，P-OTDR)和相位型光时域反射(Phase-Optical Time Domain Reflectometry，Φ-OTDR)[13]。P-OTDR 在 OTDR 装置的基础上，在发射端和接收端分别放置 1 个起偏器和偏振分析仪，以检测瑞利散射光偏振态沿光纤链路的变化，其典型的系统结构如图 1(b)所示。P-OTDR 的灵敏度较高，还可测量光纤的偏振模色散，但当测量距离较长或环境干扰较强时，随机变化的偏振态会导致信号噪声变大，数据处理难度增加。

Φ-OTDR 是衍生于 OTDR 的另一种重要的分布式光纤传感技术[14-15]，通过将低功率的散射信号与高功率的本地光源(Local Oscillator，LO)进行干涉，得到具有中等功率且带有散射信号幅度和相位信息的混频信号，从而大幅度提高了探测系统的灵敏度，其原理装置如图 1(c)所示。Φ-OTDR 采用高相干的窄线宽光源以降低混频信号的噪声，提升了传感系统的信噪比。广泛应用于油气管网检测和地质环境监测的分布式声学传感(Distributed Acoustic Sensing，DAS)[16-17]就是典型的 Φ-OTDR 系统。

在 OTDR(包括 P-OTDR 和 Φ-OTDR 等)系统中，空间分辨率和动态范围是一对相互制约的因素：当激光脉宽较小时，空间分辨率较高，但窄脉宽

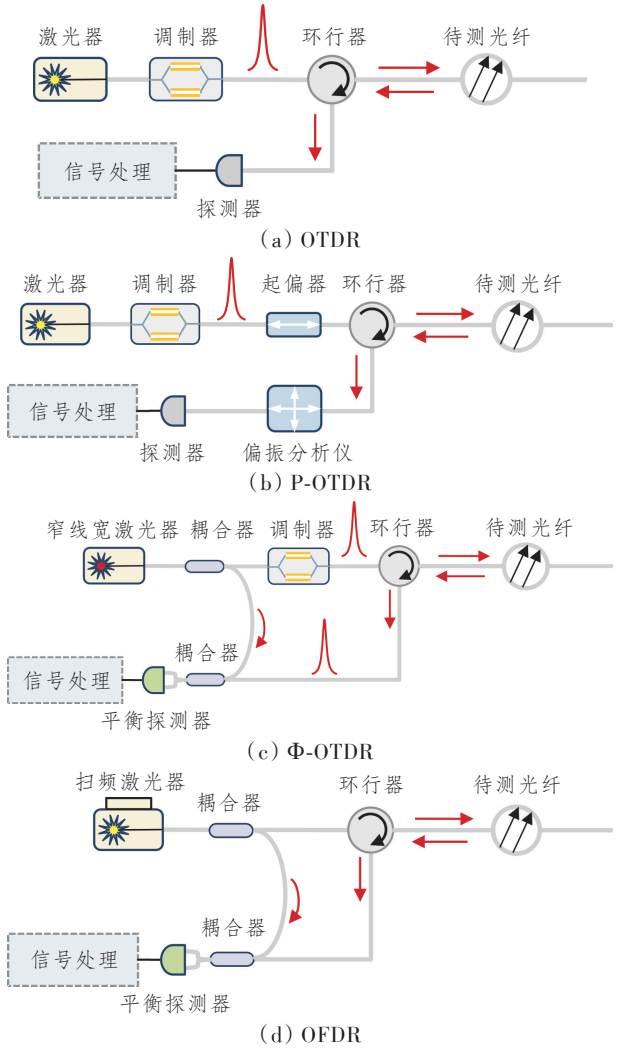


图 1　基于瑞利散射的 4 种典型分布式光纤传感系统装置图

Figure 1　Schematic of 4 typical distributed fiber optic sensing systems based on Rayleigh scattering

导致积分信号强度较低，信号与噪声峰值的比值降低，动态范围变小，最大探测距离变小。尽管如此，在商用 OTDR 系统中，可以在一定范围内调节激光脉宽大小来满足实际的应用需求。

为解决 OTDR 空间分辨率和动态范围的固有矛盾，业界提出了基于类似调频连续波雷达原理的光频域反射（Optical Frequency Domain Reflectometry，OFDR）[18]，系统如图 1(d)所示，使用线性扫频激光器作为光源，一路注入光纤，另一路作为 LO，实现相干检测。OFDR 利用光纤链路中不同位置背向瑞利散射光返回时间的不同（与 LO 干涉形成射频信号的频率不同）在频域上对事件进行定位。OFDR 的空间分辨率取决于激光扫频范围，动态范围取决于探测光的持续时间，其优势是空间分辨率很高，可达厘米甚至毫米量级，但 OFDR 的应用受限于光源线宽、扫频非线性以及扫频光源较高的成本。

1.1.2 基于拉曼散射

拉曼散射是激光在介质中发生的非弹性散射，光子吸收或释放光学声子发生能级跃迁，散射光发生频率上移或下移的过程。频率高于入射光的散射光称为反斯托克斯光，对应光子从基态跃迁至激发态；频率低于入射光的散射光称为斯托克斯光，对应光子由激发态跃迁至基态。拉曼反斯托克斯光对温度较为敏感，而拉曼斯托克斯光对温度的敏感性较低，利用此特性可以将反斯托克斯光作为信号通道，将斯托克斯光作为参考通道，根据两者强度的比值可解调出散射区间的温度信息。

将拉曼散射与 OTDR 结合，实现对光纤沿线温度分布的高精度测量，称为拉曼光时域反射（Raman Optical Time Domain Reflectometry，ROTDR）[19]，或分布式温度传感（Distributed Temperature Sensing，DTS）技术，其典型系统如图 2 所示。使用带通滤波器分别滤出斯托克斯光和反斯托克斯光，并采用高信号增益和高信噪比的雪崩光电二极管（Avalanche Photodiode，APD）对拉曼散射光进行探测。ROTDR 主要存在两大技术难点：一是光纤的自发拉曼散射系数较低，散射信号易受瑞利散射噪声、探测器噪声和接收系统采集卡量化噪声等的影响，因此系统对探测器和接收系统的光电性能要求较高，通常需要较长的时间平均，以提升信噪比，增加了测量时间；二是由于 ROTDR 的温度灵敏度与环境温度成反比[20]，导致其在高温环境下的测量灵敏度会变得较低，限制了其在某些特殊环境中的应用。

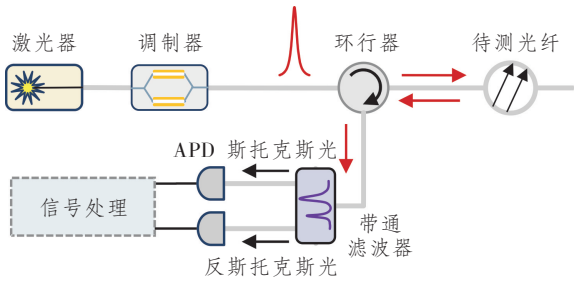


图 2 ROTDR/DTS 典型系统结构装置图

Figure 2 Schematic of typical ROTDR/DTS systems

1.1.3 基于布里渊散射

与拉曼散射类似，布里渊散射也是激光与介质相互作用，光子吸收或释放声子，发生能级跃迁的过程，但布里渊散射对应的是声学声子。当光纤所受外界应力和周围温度发生改变时，材料的声学特性会发生变化导致声速改变，从而改变布里渊频移。布里渊频移量与温度和应变都有关系，在实际测量中，仅测量频移还不足以解调出温度和应变信息，还需额外的独立探测量。一种方法是用 ROTDR 获取温度变化量，扣除温度引起的布里渊频移，反推出光纤的应变，该方案需搭建两套系统，较为复杂；另一种方法是同时获取布里渊散射光频移和功率变化，从而解调温度和应变[21]。

将布里渊散射与 OTDR 结合，可获得光纤链路沿线温度和应变的定位信息，称为布里渊光时域反射（Brillouin Optical Time Domain Reflectometry，BOTDR）[22]，也称为分布式温度应变传感（Distributed Temperature and Strain Sensing，DTSS），其典型装置如图 3 所示。BOTDR 系统采用相干检测方案，使用窄线宽激光器，确保布里渊频移可以获得较高的分辨精度。探测光路中移频器的作用是减小探测光和参考光干涉混频后的频率，降低对探测器的带宽要求。BOTDR 的空间分辨率与激光脉冲的脉宽有关，窄脉宽有利于提升空间精度，但其对应的宽光谱会降低布里渊频移的测量精度，同时会降低动态范围，需根据实际场景选取合适的发射脉宽。

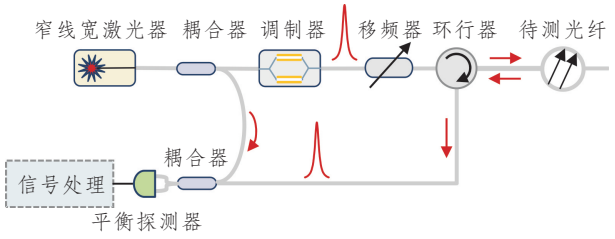


图 3 BOTDR 典型系统结构装置图

Figure 3 Schematic of typical BOTDR systems

BOTDR是基于能量效率较低的自发布里渊散射，长距离传感的信噪比较低。为此，人们提出了布里渊光时域分析（Brillouin Optical Time Domain Analysis，BOTDA）[23]，在光纤另一端打入与泵浦脉冲光对向传输且频差处于布里渊增益谱内的连续探测光，通过激发受激布里渊散射来提高信号强度，增大信噪比和传感距离。BOTDA可支持的传感距离显著增加，但系统结构相比于BOTDR更复杂，部署成本更高。

表1汇总了前文所提7种典型分布式光纤传感技术及其特点。

表1　典型分布式光纤传感技术及其特点汇总

Table 1　Summary of typical distributed fiber optic sensing technologies and their characteristics

散射类型	典型系统	光学参量	传感参量	技术特点
瑞利散射	OTDR	强度	光纤长度、衰减	结构简单，技术成熟
	P-OTDR	偏振	振动、偏振模色散	灵敏度高，但信噪比较低
	Φ-OTDR	相位	振动、应变	灵敏度高，易受无关噪声干扰
	OFDR	频率	插损、回波损耗等	空间分辨率高，但系统复杂
拉曼散射	ROTDR/DTS	强度	温度	相干检测，响应度较低，需时间平均
布里渊散射	BOTDR/DTSS	频移	温度、应变	相干检测，可同时解调双参量
	BOTDA	频移	温度、应变	传感距离长，但系统复杂

除了基于光纤散射原理的分布式光纤传感之外，偏振态（State of Polarization，SOP）监控[24]和光学干涉[25]也是适用于通感一体化的光纤传感技术。SOP监控通常部署于海底光缆和电力光缆的相干光传输系统中，可借助数字信号处理技术对传输后的光学偏振态变化进行分析，在不影响组网方案的情况下即可灵活监测光纤链路的环境参量。而光学干涉法利用光的干涉将相位信息转换为强度信息进行探测，具有结构简单和成本低等优势。

1.2　光网络通感一体化的技术难点

1.2.1　超长距离传感

油气管道、输电线路和通信光缆等线路长度普遍上百公里，超长的传感距离对分布式光纤传感技术提出了很高的要求。然而，延长传感距离并不能单纯地依赖于增加输入光功率，过高的输入功率会激发光纤非线性效应，劣化传输信号的信噪比，并增加与通信信号的串扰风险。实现长距离分布式光纤传感主要有BOTDA/BOTDR和Φ-OTDR两条技术路径。

BOTDA/BOTDR通常采用光脉冲编码方案[26-27]或分布式拉曼放大技术（包含一阶拉曼放大、二阶拉曼放大和混合分区放大等）[28-29]提升信噪比和传感距离。早在2013年，电子科技大学的研究人员就将分布式拉曼放大技术应用于BOTDA，实现了超过150 km的无中继传感[30]。但BOTDA系统较为复杂，且存在探测光对泵浦脉冲消耗所致的非局域效应，需额外采用时分复用或频分复用等手段来抑制[31]。

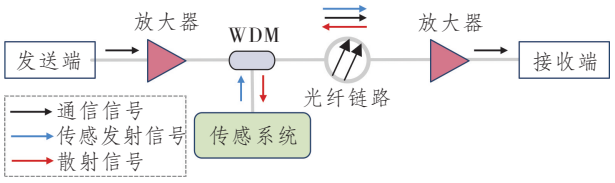
Φ-OTDR最早使用掺铒光纤放大器（Erbium-doped Fiber Amplifier，EDFA）提高泵浦功率来提升瑞利散射信号的强度，但最大功率受限于受激布里渊激射阈值，最大传感距离仅为25 km[32]。随着拉曼分布式放大技术的引入，Φ-OTDR传感距离显著提升，例如采用混合分区放大和外差检测方法，Φ-OTDR已实现了175 km的传感[33]。另一种十分有潜力的技术是远程泵浦放大（Remote Optical Pump Amplifier，ROPA），实际是EDFA和拉曼放大技术的结合：远程泵浦单元发射泵浦光到光纤中，传输到分布在链路适当位置的包含掺铒光纤的远程增益单元，通过将信号光和泵浦光耦合实现无中继放大。目前采用融合Φ-OTDR和BOTDR的ROPA方案，实现了单端最长208 km的传感距离[34]。无论是BOTDA还是Φ-OTDR，传感距离的提升通常都伴随着系统复杂度的增加和设备成本的增大，因此在通感一体化的实际部署中还需同时折衷兼顾成本和传感距离。

1.2.2　通信传感低串扰

通感一体化要求通信系统和传感系统集成，传感信号在光纤现网中与通信信号共传。分布式光纤传感系统光源的脉冲峰值功率通常较高，在与通信信号共传时易受到如交叉相位调制等非线性效应的影响，导致通信信号劣化，误码率增加。高精度的长距离传感要求激光光源具有较窄的脉宽和较高的功率，但这与通信传感信号的低串扰要求互为矛盾。目前，人们通常在脉冲峰值功率和通感低串扰之间采取折衷方案，选取合适的激光输入功率，在保证误

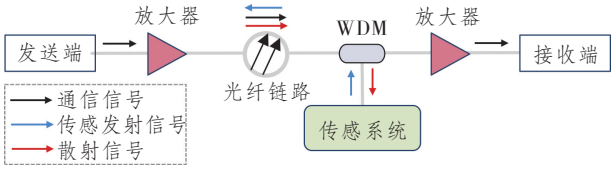
码率达标的前提下，尽可能提高分布式光纤传感的传输距离和精度。

通感集成的普遍做法是使用波分复用器（Wavelength Division Multiplexer，WDM），传感系统使用空闲信道的单独波长，通过 WDM 耦合至光传输网络中。如图 4 所示，光传感系统既可以靠近光通信系统的发送端（前置），也可以放置在靠近通信接收端的位置（后置）。由于后置方案允许传感系统发射的最大功率比前置方案更大，因此得到了更普遍的应用。



（a）前置方案

（a）Forward sensing scheme



（b）后置方案

（b）Backward sensing scheme

图 4 通信系统和传感系统的两种基本集成方式示意图

Figure 4 Schematic diagram of two basic ways of integrating communication and sensing systems

啁啾脉冲传感[35]是一种降低通感信号串扰的潜在方案。啁啾脉冲是指脉冲在不同时间位置（即不同时刻）的瞬时频率不同，当瞬时频率沿脉冲呈现线性变化时，称为线性啁啾脉冲。线性啁啾脉冲最初应用于 Φ-OTDR 系统[36]，当探测脉冲的啁啾量远大于其傅里叶变换极限的谱宽时，光纤所受应力导致的接收频谱变化可线性映射到时域脉冲的时延，仅需采用直接探测法接收散射回波，其优点是结构简单、成本低、灵敏度高且信号无衰减点。相比于传统相干光源泵浦的 Φ-OTDR 系统，该方案在相同的传感性能下，啁啾脉冲的峰值功率更低，因此可有效降低通感信号之间的串扰，但缺点是对啁啾大小的要求限制了目前空间分辨率最低为数米量级，继续提升空间精度存在挑战。值得注意的是，上海交通大学研究人员提出了一种结合啁啾脉冲和非匹配滤波器的 DAS 方案[37]，将啁啾脉冲应用于时间门控 OFDR 系统[38]，其空间分辨率达到 2 m，对于 10 km 外 200 nε 的应变，探测信噪比高达 35 dB。该方案的空间分辨率仅与脉冲啁啾的频率范围和非匹配率有关，与脉宽无关。适当增加啁啾脉冲的脉宽可提升传感信噪比和降低通感信号串扰，且空间分辨率不受影响。

1.2.3 事件模式识别

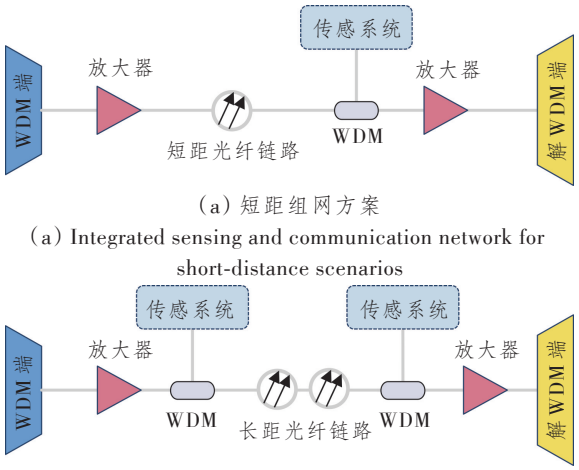
光传感的事件模式识别是指从传感数据中提取有效消息，对检测到的事件进行归类和判定。针对不同的应用场景，事件的识别内容有所不同。例如在光缆运维和管理的场景中，常见的事件类型包括光纤断纤、光缆弯折和接续点反射等；在油气管网监测场景中，事件包括挖掘外破、油气泄漏以及清管操作等；在周界安防场景中，事件包括人员入侵、车船经过和施工噪声等。高效的模式识别算法有利于提升事件识别的准确率、通用性和分类精细度，从而提升系统运行效率。

常见的事件模式识别算法有机器学习和深度学习算法，算法的关键是通过将海量传感数据与事件特征进行匹配，从简单的特征提取到更加复杂抽象的深度特征提取[16,39]。人工智能的广泛应用极大地提升了系统自主学习的效率、泛化能力和可移植性。事件模式识别的 3 个未来发展趋势：一是优化模型结构，发展出泛化能力更强、运算更快和识别率更高的模型；二是提升模式数据质量，通过长期积累的大量优质传感数据，反馈识别模型结构的优化；三是提升服务于模式识别的算力支撑，保障智能模型识别的实时性。

1.2.4 组网技术方案

通感一体化光网络在系统层面的研究内容包括协同组网方案、资源分配、系统接口管控和信号处理等。通感一体化组网方案的设计是关键，一方面要确保通感信号的低串扰，另一方面要尽可能增强光传感的性能。业界普遍采用 WDM 的方式将传感系统并入光通信网络，如图 5 所示，在短距通信跨段情形下（<50 km），采用反向传播组网方案，即传感系统靠近接收端，降低通感的非线性串扰；而在长距离通信跨段，由于超出分布式光纤传感的常规最大传感距离，一般使用多个传感系统分布于链路的合适位置，并在接收端使用滤波器分别滤出各传感信号。传感系统使用的波长通常是空闲的 L 波段或光监控信道（Optical Supervisory Channel，OSC）波段，若涉及多传感系统组网，则需要对各传感信号分配信道传输，可参照光网络的管控手段，对传感网络进行数据提取和管理。

除了常见的 WDM 组网方案之外，香港理工大



(a) 短距组网方案

(a) Integrated sensing and communication network for short-distance scenarios

(b)长距组网方案

(b) Integrated sensing and communication network for long-distance scenarios

图 5　基于 WDM 的通感一体化组网方案示意图

Figure 5　Schematic diagram of integrating sensing and communication systems based on WDM

学的科研人员还提出了一种创新的组网架构[40]，该方案利用与通信信号同向传输的导频以及来自接收端本地振荡器反向传输的连续波，基于光纤干涉法进行振动传感，同时实现信号传输和数据感知，其可行性已在 1 个 100 km 的 60 GBaud 偏振复用(Polarization Multiplexed, PM)-16 正交幅度调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM)光传输系统中得到了验证。

此外，针对接入网的通感一体化，可根据网络段和传感应用之间的互连情况，设置合理的传感结构，实现通感一体化功能。例如在无源光网络(Passive Optical Network, PON)的分路器输出端利用两路光网络单元(Optical Network Unit, ONU)专用传感链路形成干涉仪，通过对分光器干涉信号进行解调实现干涉传感[41]。除考虑技术可行性之外，组网方案设计还需综合兼顾系统代价和链路预算等因素。通感一体化光网络还需在系统统一管控层面进行设计，通过北向接口将设备管的硬件与网管系统对接，实现通信和感知数据的上报。

2　通感一体化的典型应用场景

2.1　光缆哑资源管理和光网络智能运维

随着通信光缆铺设里程的逐步增加，光网络的规模和体量愈加庞大。将分布式光纤传感技术应用于光网络，通过采集光纤链路的回波信息可获取链路的实时状态，有助于光网络全生命周期的实时监测，实现密集的传感数据采集，保障智能化光网络运维。

OTDR 是最常见的光网络运维手段，可在不干扰现网业务的前提下实现光纤链路监测预警[42]。除 OTDR 之外，Φ-OTDR 也已部署于光缆现网，其应用之一是光缆外破预警。基于人工智能特征识别算法，Φ-OTDR 可对地埋光缆周围环境振动情况进行监测，其优势是可对各类破坏事件展开准确定位，实现主动运维。Φ-OTDR 的另一个应用是光缆同路由监测，即检测光缆同沟同缆风险，避免主备业务出现共享风险，保障网络高可靠运行，其优势在于不开井，在不中断业务的前提下判断同路由风险，降低光缆故障对业务的影响。

除 OTDR 和 Φ-OTDR 外，研究人员还提出了若干光网络智能运维方案，例如光子计数 OTDR[3]、BOTDR[43]和光编码器方案[44]等。这些方案拓展了传统光网络运维技术的边界，尽管由于成本和系统复杂度等原因暂时未成熟商用，但为未来光网络(包括通信运营网和数据中心连接网)智能运维技术方案的演进提供了有益的思路。

2.2　油气管网智能数字化监测

油气管网是国家的重大基础设施，不仅跨度长，而且多处于野外无人监管和复杂地质区域。地质灾害易引起油气管道发生变形，存在泄漏甚至爆炸等安全风险，亟需有效的管网监控手段。基于与管道同期铺设的通信用光缆，采用光纤传感融合的通感一体化技术，可实现长距离和高精度的长输管道结构实时监测[6]。

通感一体化技术在油气管网中主要有 4 大应用：一是防挖掘外破预警，当管道周围发生挖掘施工等异常振动时，采用 DAS 传感技术实现自动监测和预警；二是管体结构健康监测，管道投运一定时间后，由于气液的腐蚀作用和地质环境的变动，管道存在结构形变的安全隐患，可使用分布式光纤传感对管道应变进行检测；三是气液泄漏报警，当管道因自然腐蚀或外破事件发生泄漏时，管道中的气液引起管道本体或周围介质的振动，采用 DAS 等手段对沿线光缆的振动进行传感，并对泄漏位置进行精确定位，也可采用分布式温度传感 DTS 根据异常温度进行泄漏判断；四是清管器追踪，管道内壁长时间运行后会结腊或锈蚀，需使用清管器对管道进行清理，为避免清管器产生卡堵，可采用分布式光纤传感技术对其进行实时跟踪定位。

2.3　地质环境探测和灾害预警

地质环境监测和灾害预警是研究自然环境演变和保护人类生命与财产安全的重要课题。

在水文环境监测方面，使用 DTS 技术实现对待测环境大范围和高空间精度的温度测量，通过获取水域各层的温度数据与历史同期数据进行对比，可进一步分析待测水域的生态环境活动[45-46]。除江河湖泊的水文环境外，DTS 还被广泛应用于土壤湿度以及洞穴、大气和覆雪层等的温度数据测量[47]，为生态环境和生物多样性研究提供了便利技术手段。

在地震监测方面，铺设于世界各地的光纤通信网络可作为地震仪，与传统地震仪相比，使用分布式光纤传感技术可获得更大的监测覆盖范围和密度，因此成为地球灾害评估和勘探的新兴技术方向。例如，美国加州大学伯克利分校的科研人员使用 DAS 技术在 27 km 暗光纤上，以 2 m 间距密集采样记录了 7 个月的地震数据，证明了广泛的光纤网络可以有效地用于一系列地球科学观测任务[48]；同年，该课题组的研究人员利用 DAS 技术在横跨加利福尼亚近海大陆架的 20 km 海缆上进行了为期 4 天的海底应变观测，实验中成功监测到 1 次走滑型海底地震，并由此发现了多个海底断裂带[10]。

2.4 智慧城市管理

通感一体化的城市光纤网不仅是通信承载基座，而且是智能传感网络[49]。分布式光纤传感技术结合光网络内的各种网元和传感设备，通过感测、分析与整合城市运行核心系统的各项关键信息，对包括民生、治安、环境、公共安全、城市服务和工商业活动在内的多种场景需求实现自动化智能响应，共同为智慧城市赋能，助力城市高效治理。

通感一体化光网络在智慧城市中的应用场景包括智慧交通、智能车轨、火灾预警、桥隧结构监控和施工管控等。例如，道路的交通信息数据可以被道路沿线电缆沟道中已部署光纤传感系统的光缆获取，实现对交通流量和车辆速度等参数的远程测量。2023 年，西班牙纳瓦拉大学的研究人员将脉冲压缩的 DAS 系统应用于长距离交通流量监测中，使用改进的霍夫变换算法对来往车辆进行检测和轨迹追踪，实现了高达 97.7% 的综合流量检测准确率[12]。通感一体化的光纤传感技术可用于城市地铁及轻轨的运行状态检测，与现有的车轨调度系统互为补充，为列车安全运行提供了保障。基于 DTS 技术还可实时监测重点区域（包括仓库、隧道和厂房等）的温度数据，实现快速火灾预警。此外，利用通信光缆作为载体的 DAS 和 BOTDR 等技术可对桥梁结构应力和施工钻孔振动等进行在线监测等。

3 通感一体化光网络的未来展望

3.1 发展机遇

近年来，通感一体化成为多功能多场景融合通信网络发展的大趋势，业界各方对光网络通感一体化技术展开了广泛探究，相关进展如表 2 所示。政府科研课题方面，科技部发布的 2023 年国家重点研发计划包含两项光网络通感一体化课题，分别是信息光子技术“高速光纤通信传感一体化系统与关键技术”和多模态网络与通信“面向海底应用的大容量光通信与海洋信息感知一体化融合系统”。企业方面，在“光华杯”全光运力专题赛中，各省市运营商和研究院等多个参赛方展示了光网络通感一体化在行业中的创新部署和应用情况；华为在第五代固定网络（The 5th Generation Fixed Networks，F5G）的基础上提出了 F5.5G，增加了绿色全光网、实时可靠连接与光纤传感和可视 3 个维度，将光纤传感纳入了未来固网演进的体系。国内外标准化方面，国际电信联盟—电信标准化部门（International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization Sector，ITU-T）SG15 Q8 已立项两项海缆通感相关的标准规范研究，分别是 G.dsssc（专用科学观测海缆系统，2024 年 8 月已正式发布，正式编号为 G.9730.1）[50]和 G.smart（科学观测和可靠通信海缆系统，2024 年 8 月已正式发布，正式编号为 G.9730.2）[51]，ITU SG15 Q6 已立项地面光网络的通感一体化标准研究，名称为 G.dfos（用于地面光传输系统的分布式光纤传感系统）[52]，预计于 2025 年正式发布；中国通信标准化协会（China Communication Standards Association，CCSA）TC6 已立项多个光传感标准和研究课题，包括国家标准“光纤光缆线路维护技术 第 3 部分：基于光传感技术的光缆识别”、行业标准“通信传感一体用窄线宽集成激光器组件”、研究课题“面向分布式光纤传感的光纤光缆技术研究”。2023 年 12 月，CCSA 讨论“通信传感一体用光器件研究”、“通感一体化光网络架构及关键技术”研究课题立项；IMT-2020（5G）推进组已开展通感算一体化的光传感技术及关键器件研究，并发布了《面向通感算一体化光网络的光纤传感技术》白皮书[53]。

此外，通感一体化光网络产业正持续深化发展。一是需求不断增长，终端应用方如电信运营商、油气勘探工程企业、土木建筑承建方和智慧工业企业等对光纤传感的市场需求显著增加；二是产业规模不

表2　光网络通感一体化的研究进展汇总

Table 2　Research progress on integration of sensing and communication for optical networks

发布时间	发布/研究单位	项目/标准/课题名称
2022	ITU-T SG15 Q8	G.dsssc专用科学观测海缆系统
2022	ITU-T SG15 Q8	G.smart科学观测和可靠通信海缆系统
2022	ITU-T SG15 Q6	G.dfos用于地面光传输系统的分布式光纤传感系统
2022.04	华为技术有限公司	F5.5G
2023	科学技术部	高速光纤通信传感一体化系统与关键技术
2023	科学技术部	面向海底应用的大容量光通信与海洋信息感知一体化融合系统
2023.02	CCSA	研究课题《面向分布式光纤传感的光纤光缆技术研究》
2023.09	IMT-2020(5G)推进组	《面向通感算一体化光网络的光纤传感技术》白皮书
2023.12	CCSA	行业标准《通信传感一体用窄线宽集成激光器组件》
2023.11	CCSA	讨论研究课题《通信传感一体用光器件研究》立项
2023.12	CCSA	推荐国标《光纤光缆线路维护技术 第3部分:基于光传感技术的光缆识别》
2023.12	CCSA	讨论研究课题《通感一体化光网络架构及关键技术》立项

断扩大,光纤传感的低成本、高可靠性和抗电磁干扰等特点使其在日益增长的传感器市场占据了不可替代的席位,推动了光纤传感产业规模扩张;三是产业链不断完备,通信方面,国内已有包含通信芯片供应商、设备制造商和运营商在内的完整产业生态链,传感方面,光纤光缆及特种传感光纤制造商、各类光传感相关配套的光纤器件、光电器件及信号处理芯片及模块等的产业链正持续强化和完善。

未来的光网络还应具备信息流交互处理及广域智能协作的能力,可同时实现物理和数字空间感知、泛在协同通信和智能数据运算的“通感算一体化”光网络逐渐成为新的研究热点。通感算融合的新型光网络将在算力网络和人工智能的加持下,形成低时延大带宽通信、多维状态感知、算力高效调度的多元协同和互惠增强的网络架构体系,实现物理和数字世界的多维感知和实时交互,为海量用户提供更加丰富的沉浸式体验,构建智慧连接新时代。

3.2　面临挑战

光网络通感一体化在技术层面存在3大挑战:一是噪声抑制和处理,复杂环境和恶劣工况易导致光传感信噪比的下降和系统灵敏度的降低,目前在提高光纤传感系统的信噪比和抗干扰性与利用算法抑制数据噪声等方面仍需优化解决方案;二是通感系统性能的不确定性,在不同的环境和工况下,传感系统的参数性能可能差异较大,对传感数据模型的搭建和事件的识别能力带来一定挑战;三是海量传感数据的传输和安全问题,分布式光纤传感数据的传输和处理给链路和服务器带来了较大的压力,数据筛选的准确度和时效性难以保证,且数据信息敏感性和传输链路安全性的保障措施较为薄弱。

在产业和应用层面,主要存在4大挑战:一是光纤传感技术种类较多,需求和应用场景呈现多样化的特征,可满足各类特定应用要求的技术方案和产品性能要求也各不相同,目前尚缺乏通感一体光器件统一的标准规范体系;二是光纤传感产品多面向定制化应用,尚缺乏完备的测评体系,难以有效对各厂商光纤传感产品水平进行分级评判,不利于通感一体化相关器件和设备的规模化量产;三是我国光传感产业链合作机制较为薄弱,上游厂商难以通过规模应用和迭代验证来突破传感用光芯片的可靠性和量产等关键问题;四是通感一体化部署的投入产出比尚不明确,光纤分布式传感系统多为针对具体应用需求和场景定制化设计,规模化部署成本相对较高,在一定程度上阻碍了终端应用企业的投入意愿。

4　结束语

光网络的通感一体化可高效助力信息基础设施的智能化和数字化进程,是实现未来智能融合通信网络的必然发展趋势。本文对通感一体化光网络的关键技术和难点进行了阐述,随后结合相关前沿研究进展,介绍了现阶段通感一体化光网络的典型应用场景,最后对其未来发展进行了展望。

为持续推动光网络通感一体化进程,业界应在技术难点突破、核心器件攻关、标准规范制定、融合场景探索和应用模式优化等方面协同发力:一是突破系统设计、智能算法和组网架构等方面的现有技术难点;二是加强光芯片材料和工艺的研发,实现关键核心器件攻关突破;三是建立健全通感一体化光

网络的器件、设备和系统等的标准规范体系；四是探索融合应用场景，为数字孪生和元宇宙等未来产业的发展提供强大基础支撑；五是优化智能运维和通感融合服务等应用模式，为光网络通感一体化的深入部署注入有效动能。

参考文献：

[1] He H, Jiang L, Pan Y, et al. Integrated Sensing and Communication in an Optical Fibre[J]. Light, Science & Applications, 2023, 12(1): 25.

[2] Ou X, Qiu Y, Luo M, et al. Integrated Optical Sensing and Communication (IOSAC) System based on Hybrid-waveguide Structures[J]. Advanced Materials Technologies, 2024, 9(3): 2300998.

[3] Amaral G C, Garcia J D, Herrera L E Y, et al. Automatic Fault Detection in WDM-PON with Tunable Photon Counting OTDR [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(24): 5025-5031.

[4] Zhang X, Ning N. A PON Monitoring Scheme for Online Fault Detection and Localization[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(3): 7229006.

[5] 李鸿，刘武，罗鸣. 基于机器学习的光网络监测与优化方法[J]. 光通信研究，2024(3)：230046.
Li Hong, Liu W, Luo M. Optical Network Monitoring and Optimization Methods based on Machine Learning [J]. Study on Optical Communications, 2024 (3): 230046.

[6] Yin J, Li Z W, Liu Y, et al. Toward Establishing a Multiparameter Approach for Monitoring Pipeline Geohazards via Accompanying Telecommunications Dark Fiber[J]. Optical Fiber Technology，2022, 68: 102765.

[7] Sun J, Zhang Z, Li Y, et al. Distributed Transmission Line Ice-coating Recognition System based on BOTDR Temperature Monitoring[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(12): 3967-3973.

[8] 柏彬，俞越中，赵会龙，等. 光纤分布式传感系统在变电站维护中的应用[J]. 光通信研究，2023(1)：53-57.
Bai B, Yu Y Z, Zhao H L, et al. Application of Optical Fiber Distributed Sensing System in Substation Maintenance[J]. Study on Optical Communications, 2023(1): 53-57.

[9] Chen S，Zhu K, Han J, et al. Photonic Integrated Sensing and Communication System Harnessing Submarine Fiber Optic Cables for Coastal Event Monitoring [J]. IEEE Communications Magazine, 2022, 60(12): 110-116.

[10] Lindsey N J, Dawe T C, Ajo-Franklin J B. Illuminating Seafloor Faults and Ocean Dynamics with Dark Fiber Distributed Acoustic Sensing [J]. Science, 2019, 366(6469): 1103-1107.

[11] Huang M F, Salemi M, Chen Y, et al. First Field Trial of Distributed Fiber Optical Sensing and High-speed Communication over an Operational Telecom Network [J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(1): 75-81.

[12] Corera I, Piñeiro E, Navallas J, et al. Long-range Traffic Monitoring based on Pulse-compression Distributed Acoustic Sensing and Advanced Vehicle Tracking and Classification Algorithm[J]. Sensors，2023，23(6)：3127.

[13] Zhang Z, Bao X. Distributed Optical Fiber Vibration Sensor based on Spectrum Analysis of Polarization-OTDR System[J]. Optics Express, 2008, 16(14): 10240-10247.

[14] Koyamada Y, Imahama M, Kubota K, et al. Fiber-optic Distributed Strain and Temperature Sensing with very High Measurand Resolution over Long Range Using Coherent OTDR [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(9): 1142-1146.

[15] 章诗宇，吴江，李明，等. 基于ROPA技术的超长跨距φ-OTDR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 φ-OTDR Sensing System based on ROPA Technology [J]. Study on Optical Communications, 2024 (2): 220076.

[16] Wu H, Chen J, Liu X, et al. One-dimensional CNN-based Intelligent Recognition of Vibrations in Pipeline Monitoring with DAS [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(17): 4359-4366.

[17] Zuo J, Zhang Y, Xu H, et al. Pipeline Leak Detection Technology based on Distributed Optical Fiber Acoustic Sensing System [J]. IEEE Access, 2020, 8: 30789-30796.

[18] Ding Z, Wang C, Liu K, et al. Distributed Optical Fiber Sensors based on Optical Frequency Domain Reflectometry: a Review[J]. Sensors, 2018, 18(4): 1072.

[19] Ukil A, Braendle H, Krippner P. Distributed Temperature Sensing:Review of Technology and Applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(5): 885-892.

[20] 张传彪，唐雄燕，王光全，等. 光网络的通感一体化技术研究前沿[J]. 激光与光电子学进展，2023，60(1)：221419.
Zhang C B, Tang X Y, Wang G Q, et al. Research Frontier of Communication and Sensing Integration Technology for Optical Networks [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(1): 221419.

[21] Horiguchi T, Shimizu K, Kurashima T, et al. Development of a Distributed Sensing Technique Using Brillouin Scattering[J]. Journal of Lightwave Technology, 1995, 13(7): 1296–1302.

[22] Ohno H, Naruse H, Kihara M, et al. Industrial Applications of the BOTDR Optical Fiber Strain Sensor[J]. Optical Fiber Technology, 2001, 7(1): 45–64.

[23] Bao X, Dhliwayo J, Heron N, et al. Experimental and Theoretical Studies on a Distributed Temperature Sensor based on Brillouin Scattering[J]. Journal of Lightwave Technology, 1995, 13(7): 1340–1348.

[24] Zhan Z, Cantono M, Kamalov V, et al. Optical Polarization-based Seismic and Water Wave Sensing on Transoceanic Cables[J]. Science, 2021, 371(6532): 931–936.

[25] Marra G, Clivati C, Luckett R, et al. Ultrastable Laser Interferometry for Earthquake Detection with Terrestrial and Submarine Cables[J]. Science, 2018, 361(6401): 486–490.

[26] Soto M A, Bolognini G, Di Pasquale F. Analysis of Optical Pulse Coding in Spontaneous Brillouin-based Distributed Temperature Sensors[J]. Optics Express, 2008, 16(23): 19097–19111.

[27] Liang H, Li W, Linze N, et al. High-resolution DPP-BOTDA over 50 km LEAF Using Return-to-zero Coded Pulses[J]. Optics Letters, 2010, 35(10): 1503–1505.

[28] Rodriguez-Barrios F, Martin-Lopez S, Carrasco-Sanz A, et al. Distributed Brillouin Fiber Sensor Assisted by First-order Raman Amplification[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(15): 2162–2172.

[29] Soto M A, Bolognini G, Di Pasquale F. Optimization of Long-range BOTDA Sensors with High Resolution Using First-order Bi-directional Raman Amplification[J]. Optics Express, 2011, 19(5): 4444–4457.

[30] Jia X H, Rao Y J, Yuan C X, et al. Hybrid Distributed Raman Amplification Combining Random Fiber Laser based 2nd-order and Low-noise LD based 1st-order Pumping[J]. Optics Express, 2013, 21(21): 24611–24619.

[31] 饶云江. 长距离分布式光纤传感技术研究进展[J]. 物理学报, 2017, 66(7): 158–176.
Rao Y J. Recent Progress in Ultra-long Distributed Fiber-optic Sensing[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(7): 158–176.

[32] Juarez J C, Taylor H F. Field Test of a Distributed Fiber-optic Intrusion Sensor System for Long Perimeters[J]. Applied Optics, 2007, 46(11): 1968–1971.

[33] Wang Z N, Zeng J J, Li J, et al. Ultra-long Phase-sensitive OTDR with Hybrid Distributed Amplification[J]. Optics Letters, 2014, 39(20): 5866–5869.

[34] Liu J, Li M, Xu J, et al. 208 km 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.

[35] Fernández-Ruiz M R, Costa L, Martins H F. Distributed Acoustic Sensing Using Chirped-pulse Phase-sensitive OTDR Technology[J]. Sensors, 2019, 19(20): 4368.

[36] Pastor-Graells J, Martins H F, Garcia-Ruiz A, et al. Single-shot Distributed Temperature and Strain Tracking Using Direct Detection Phase-sensitive OTDR with Chirped Pulses[J]. Optics Express, 2016, 24(12): 13121–13133.

[37] Chen D, Liu Q, Wang Y, et al. Fiber-optic Distributed Acoustic Sensor based on a Chirped Pulse and a Non-matched Filter[J]. Optics Express, 2019, 27(20): 29415–29424.

[38] Wang S, Fan X, Liu Q, et al. Distributed Fiber-optic Vibration Sensing based on Phase Extraction from Time-gated Digital OFDR[J]. Optics Express, 2015, 23(26): 33301–33309.

[39] Sun Q, Feng H, Yan X, et al. Recognition of a Phase-sensitivity OTDR Sensing System based on Morphologic Feature Extraction[J]. Sensors, 2015, 15(7): 15179–15197.

[40] Yan Y, Lu L, Wu X, et al. Simultaneous Communications and Vibration Sensing over a Single 100-km Deployed Fiber Link by Fiber Interferometry[C]//2023 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Diego, CA, USA: IEEE, 2023: 10116754.

[41] Boffi P, Di Luch I, Ferrario M, et al. Exploitation of Deployed Telecommunication Fiber Infrastructures for Sensing Applications[C]//2020 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). Bari, Italy: IEEE, 2020: 9203016.

[42] Rad M M, Fouli K, Fathallah H A, et al. Passive Optical Network Monitoring: Challenges and Requirements[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(2): S45–S52.

[43] Honda N, Iida D, Izumita H, et al. In-service Line Monitoring System in PONs Using 1 650 nm Brillouin OTDR and Fibers with Individually Assigned BFSS[J].

Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(20): 4575-4582.

[44] Zhu M, Zhang S, Li G, et al. Cost-effective Fiber Fault Monitoring Using MLMW-OOCs in High-capacity PONs Considering User Geographical Distribution[J]. Computer Communications, 2019, 136: 1-9.

[45] Hall A, Chiu Y C, Selker J S. Coupling High-resolution Monitoring and Modelling to Verify Restoration-based Temperature Improvements[J]. River Research and Applications, 2020, 36(8): 1430-1441.

[46] Selker J S, Thévenaz L, Huwald H, et al. Distributed Fiber-optic Temperature Sensing for Hydrologic Systems[J]. Water Resources Research, 2006, 42(12): e2006wr005326.

[47] Shanafield M, Banks E W, Arkwright J W, et al. Fiber-optic Sensing for Environmental Applications: Where We Have Come From and What Is Possible[J]. Water Resources Research, 2018, 54(11): 8552-8557.

[48] Ajo-Franklin J B, Dou S, Lindsey N J, et al. Distributed Acoustic Sensing Using Dark Fiber for Near-surface Characterization and Broadband Seismic Event Detection[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 1328.

[49] Di Luch I, Boffi P, Ferrario M, et al. Vibration Sensing for Deployed Metropolitan Fiber Infrastructure[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(4): 1204-1211.

[50] ITU-T G. 9730.1-2024, Dedicated Scientific Sensing Submarine Cable System[S].

[51] ITU-T G. 9730.2-2024, Scientific Monitoring and Reliable Telecommunications Submarine Cable Systems[S].

[52] ITU-T G. dfos-2022, Distributed Fibre Optic Sensing System for Terrestrial Optical Transmission System[S].

[53] IMT-2020(5G)推进组. 面向通感算一体化光网络的光纤传感技术[EB/OL]. (2023-09-01)[2023-12-01]. https://www.imt2020.org.cn/html//default/zh/chengguofabu/yanjiubaogao/list-2.html?index=3.
IMT-2020 (5G) Promotion Group, Fiber Optic Sensing Technology for the Integration of Communication, Sensing and Computing for Optical Networks [EB/OL]. (2023-09-01) [2023-12-01]. https://www.imt2020.org.cn/html//default/zh/chengguofabu/yanjiubaogao/list-2.html?index=3.