

激光与光电子学进展

光网络的通感一体化技术研究前沿

张传彪^{1,2*}, 唐雄燕^{1**}, 王光全¹, 张民², 沈世奎¹

¹中国联合网络通信有限公司研究院, 北京 100048;

²北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876

摘要 光网络的通信和感知一体化是基于光缆资源的一种有效设计,符合通信系统资源融合的发展趋势。利用通感一体化(ICAS)技术,不仅有助于光网络的智能运维,提升网络质量,还能实现密集传感数据采集和新型应用,有效盘活运营商的光纤资产。本文阐述了光网络 ICAS 的潜在使能技术,对基于光纤瑞利散射、拉曼散射和布里渊散射等原理实现的传感技术进行对比分析,并结合相关研究,讨论了光网络 ICAS 技术的多类潜在应用场景,为该技术的推广应用提供思路。

关键词 光纤通信; 光纤传感器; 光纤光学; 光纤特性; 光网络通信和感知一体化

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221419

Research Frontier of Communication and Sensing Integration Technology for Optical Networks

Zhang Chuanbiao^{1,2*}, Tang Xiongyan^{1**}, Wang Guangquan¹, Zhang Min², Shen Shikui¹

¹China Unicom Research Institute, Beijing 100048, China;

²State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract The integration of communication and sensing (ICAS) in optical networks is an effective design based on optical cable resources, and is in line with the development trend of communication system resource integration. The use of this integrated system will not only facilitate the intelligent operation and maintenance of optical networks and improve network quality, but will also expedite intensive acquisition of sensor data and innovation of new applications, effectively revitalizing the optical fiber assets of operators. In this paper, the key technologies of optical-network ICAS system are described. Sensing technologies based on the principles of Rayleigh, Raman, and Brillouin scattering are compared and analyzed. Combined with relevant research, several potential application scenarios of optical-network ICAS technology are discussed, thus providing ideas for the popularization and application of this technology.

Key words optical fiber communications; optical fiber sensors; fiber optics; optical fiber characteristics; integration of optical-network communication and sensing

1 引言

随着第五代移动通信(5G)技术的大规模商用,经济社会的数字化转型逐渐迈向多场景,不仅有效提高了消费者的移动带宽体验,也基于低时延、高可靠的网络特性逐渐衍生出车联网、工业互联网等垂直应用,而新型无线通信系统中融合对物理世界的感知能力,也为上述新型应用的有效实现开辟了途径^[1]。其中

3GPP自GSM时代已开始致力于通信和传感定位的一体化设计,而最近的5G NR R17强调了定位增强功能,为满足定位精度要求较高的工业物联网应用,要求室内定位精度达到厘米级^[2-3]。但目前包括5G NR在内的无线系统,其感知功能都是基于有源网络实体进行定位感知,仅通过交换有限信息来实现一定程度的认知,感知效率较低。且利用蜂窝系统的物理层信号进行主动感知,往往存在频谱资源局限性的问题,系统

收稿日期: 2022-04-26; 修回日期: 2022-06-02; 录用日期: 2022-06-13; 网络首发日期: 2022-06-23

基金项目: 国家自然科学基金(6197032482)、国家重点研发计划项目(2018YFB2200700)

通信作者: *zhangcb65@chinaunicom.cn; **tangxy@chinaunicom.cn

的探测精度较低。

研究人员提出到 6G 时代,不仅要进一步提升网络的智能化水平,还要增强网络的感知能力,如新增环境感知、主动监测、手势识别等多种能力,实现对物理世界的完整感知和人类需求的精准理解,这就需要无线网络能实现无源目标的探测。一般来说无源对象的感知往往是属于雷达研究范畴,随着雷达技术的逐渐成熟,在许多领域都得到广泛使用,如火灾监测、地震探测、自动驾驶等^[4]。在 6G 技术中,将引入高频的毫米波、太赫兹波等,不仅能够实现 Tbps 的无线通信速率,还能有效提高探测的分辨率和探测精度,从而适配各类增值创新应用,比如高精度的导航、地图匹配、图像实时重构、物质分析等^[5]。6G 网络的普惠智能,让无线网络能够精确感知环境,并为网络人工智能的实时决策提供海量可靠数据,最终实现通信与感知的有机赋能,将是 6G 技术的核心功能之一,结合人工智能和机器学习等技术,将有效打通物理世界和数字世界的实时交互,人们将以沉浸式的方式捕捉、获取知识信息,共同构建智能全连接的新时代。并提出了面向 6G 网络的通感一体化(ICAS)技术^[6-7],将实现雷达探测和无线通信功能的融合互补,研究人员对此也进行了广泛的研究工作,如频谱资源共享问题^[8-9]。但目前关于 6G ICAS 技术的研究还主要聚焦在通信性能增强和通信定位方面,系统级别的整体设计方案仍处在起步阶段,对目标感知的参量有限,主要围绕成像与定位应用上,另外由于无线频谱本身特性,自然环境中的路径损耗较大,感知范围有限。

考虑到通信与感知功能的一体化设计是构建智能化、多场景应用融合通信系统的必然趋势,6G 网络有望基于太赫兹这一新频谱来实现无线网络的 ICAS,让通信与感知的传统分立系统最终在资源层面实现共享。与之类似,随着近年来光纤传感技术的不断发展和成熟,基于光纤的传输网络,更天然地具有通信与感知功能一体化的潜力^[10-11]。光纤传感技术几乎与光纤的发明同时出现,利用光纤本身的感知外界物理参量的敏感特性,人们已经开发出一系列的光纤传感器件,充分利用了光纤获取信息和传输信息的双重功能,并由于其轻巧、高灵敏、抗电磁干扰、能够遥测以及能实现分布式传感等优越特性,已经在信息、工业、国防等领域得到较为成熟的应用。

目前运营商铺设的光纤资源往往仅作为单纯的管道功能,其中还有大量未承载业务的“暗光纤(dark fiber)”,容易造成基础资源的浪费。而光纤传感系统和光通信的基本组件是类似的,两者的有效融合能够实现资源复用,尤其是基于光纤的散射效应实现的光纤分布式传感技术,能够在丰富数据采集下获得最佳的经济效益,不仅能有效盘活“暗光纤”资源,还能实现许多创新感知应用。另一方面,随着数据传输需求的不断增长,光纤网络的建设规模和复杂度不断增加,这

使得光网络的运维管理变得越来越重要,亟需一种智能化的监测技术,而光通信与传感技术的融合,能辅助光纤资源的主动感知,实现光缆资源可视化、光纤故障监测等应用,将提升光网络的运维效率,降低业务故障率。因此,新型的光网络 ICAS 技术,或将在未来的数字化社会中扮演重要角色。本文阐述了光网络 ICAS 的潜在使能技术,聚焦分布式光纤传感技术。并根据通信光缆资源的特点,结合相关前沿研究,讨论了光网络 ICAS 技术的潜在应用场景。最后进行总结,并对光网络 ICAS 技术的发展趋势进行了展望。

2 光网络 ICAS 的关键技术

自 20 世纪 70 年代以来,研究人员就在低损耗光纤中探索光纤的背向散射效应^[12-13],并利用散射效应来表征光纤的损耗和缺陷,并由此开发出商用的光时域反射仪(OTDR)^[14],经过改进,如今 OTDR 可以在不影响现网业务的情况下实现光纤链路的检测,这种技术的融合可以视为光网络 ICAS 的雏形。

尽管基于光纤材料的弹光效应、热光效应和倏逝场效应等多种物理效应,人们研发出点式或准分布式的光纤传感器。但对光通信系统来说,点式或准分布式的光纤传感器,很难与现网系统进行融合。而利用光纤的散射效应构建分布式的传感系统,可以让通信光纤本身作为传感单元,充分发挥已广泛覆盖的光缆资源的优势。分布式光纤传感技术作为光网络 ICAS 的关键技术之一,从实现原理上来看,主要包括瑞利散射、拉曼散射和布里渊散射,如图 1 所示。其中散射以瑞利散射为主,这是一种光纤中的弹性散射,即只改变散射的方向,而光子能量不变。另外是频移量约为 10 GHz 的布里渊散射和频移量约为 13 THz 的拉曼散射,这两种典型的非弹性散射过程中,光子的能量发生了改变。下面对这几种实现光网络 ICAS 的关键技术进行详细分析。

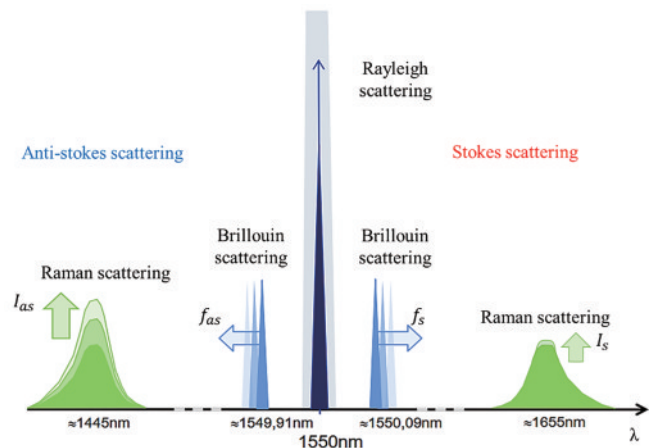


图 1 石英光纤中典型的光散射^[14]

Fig. 1 Typical light scattering in quartz optical fiber^[14]

2.1 瑞利散射

2.1.1 OTDR 系统

上文所述的 OTDR 就是基于瑞利散射实现的典型技术,在光纤的衰减测量、缺陷探测、失效检测和分布式传感等多种应用场景中得到广泛的使用。典型的 OTDR 系统结构如图 2 所示。

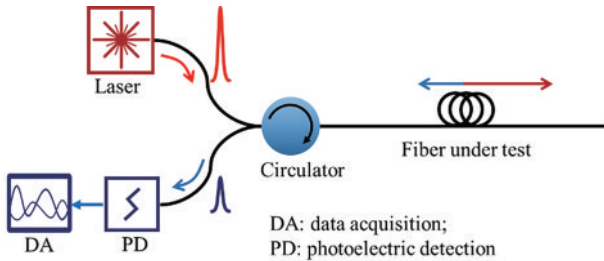


图 2 典型的 OTDR 系统结构示意图^[14]

Fig. 2 Typical OTDR system structure diagram^[14]

激光光源在待测光纤中注入光脉冲,光纤中的微观粒子会对光束造成散射,散射的方向是随机的,主要为瑞利散射,其中部分光束会沿相反的方向反射回来,即反向散射,反向散射的光被 OTDR 接收器接收并分析。在这个过程中,光强由于光纤的损耗发生衰减,在 OTDR 仪表上就会显示出一个倾斜曲线,用于表征光纤的衰减系数。并且通过计算光脉冲返回探测器的延迟时间实现定位,即

$$D = \frac{c}{n} \times \frac{t}{2}, \quad (1)$$

式中: c 为真空中的光速($\approx 2.998 \times 10^8$ m/s); t 为发射光与接收光之间的延迟; n 为待测光纤的折射率值。

在 OTDR 使用过程中,主要关注两个关键参数:一个是动态范围,表征有效探测距离,窄脉冲、高功率的激光光源是保证大动态范围的关键因素,另外光纤中的瑞利散射强度与波长的四次方成反比,但石英光纤的低损窗口在 1550 nm 附近,因此在应用过程中,需对散射强度和损耗情况综合考虑,常见的商用 OTDR 仪表都会提供 1625 nm 作为扫描波长;另一个是空间分辨率,表征观察事件的精细程度,探测器响应度和脉冲宽度是影响空间分辨率的关键因素,其中脉冲宽 τ 与空间分辨率 δL 满足 $\delta L = c\tau/2n$,而宽脉冲又能获得较高的积分信号强度,因此空间分辨率和动态范围是相互制约的。

为了提高传感的灵敏度和其他指标,研究人员利用散射光的相位信息、偏振信息探测光纤链路状态,逐渐发展出了偏振 OTDR (P-OTDR) 和相位敏感 OTDR(φ -OTDR)。

2.1.2 P-OTDR 系统

实际应用的光纤中,由于生产因素或外界环境的影响,导致光纤具有一定的双折射特性,因此其中的散射光具有偏振特性,表征偏振特性的参量包括偏振主轴方向、偏振消光比、偏振模色散和偏振度等,

P-OTDR 就是通过采集这些参量的动态变化数据来实现光纤感知,典型的 P-OTDR 系统结构如图 3 所示。

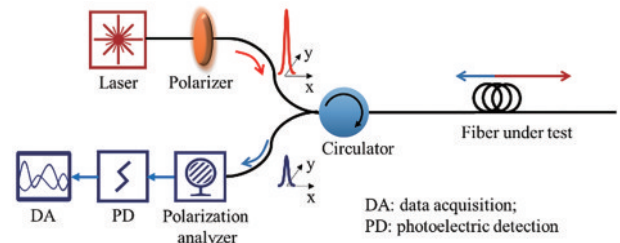


图 3 典型的 P-OTDR 系统结构示意图^[15]

Fig. 3 Typical P-OTDR system structure diagram^[15]

激光光源后的起偏器可以通过改变输入光脉冲的偏振态,实现散射光信号偏振特性的大范围调整,并且在接收端使用可以获得详细偏振信息的偏振分析仪,从而提高分布式传感器的性能。另外,在长距离探测过程中,由于光纤中的双折射现象具有随机分布特性,回波信号的偏振特性也会随时间呈随机性,因此其散射光信号具有较大噪声,为了提高微弱的散射信号的信噪比,需多次测量进行统计平均,以便从中提取两个偏振分量进行统计分析。

值得注意的是,通信光纤的铺设环境复杂,而光纤的偏振特性非常敏感,因此对于架空光缆或复杂管井环境中的光缆来说,使用 P-OTDR 传感技术时,其噪声处理是很大的问题,而对于服役环境较为稳定的海缆来说,P-OTDR 会有一定的适用性^[16]。

2.1.3 C-OTDR 和 φ -OTDR 系统

在 OTDR 系统中,从较长距离光纤端反射回来的散射光信号往往十分微弱,利用直接检测的方法接收灵敏度较低,研究人员提出利用相干接收的方法,采用窄线宽的激光脉冲作为探针光,具有较长的相干长度,回波信号与本振光混频,产生拍频信号,能有效提高散射信号的灵敏度,即 C-OTDR 技术^[17]。这种类型传感器的典型结构如图 4 所示。

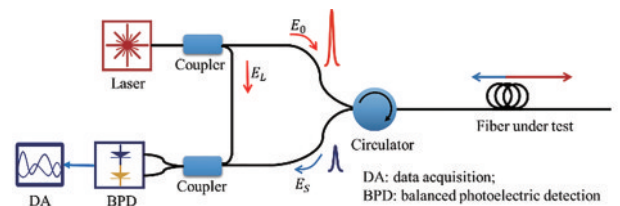


图 4 典型的 C-OTDR 系统结构示意图^[17]

Fig. 4 Typical C-OTDR system structure diagram^[17]

一般来说,C-OTDR 主要用于探测极弱的回波信号,接收信号的强度正比于激光光源的脉宽,可以适当增加脉宽以提高信噪比,但脉宽的增加是以牺牲分辨率为代价的。

另一方面,外界环境变化引起的光纤扰动和光纤内部的缺陷,不仅导致光强的衰减变化、偏振态变化,

也能引起光程变化,及相应的相位变化。并且相位变化较光强衰减、偏振变化更为灵敏。但采用强度检测方法的 OTDR 系统往往使用低相干的光源信号,虽然有利于降低干涉噪声,但光信号的相位信息被掩盖。由此,研究人员提出利用类似 C-OTDR 的传感系统结构实现 φ -OTDR。来自光源的本振信号与背向散射信号在接收端实现外差接收,其获得干涉光的光强可表示为

$$I_{\text{out}} = E_L^2 + r^2 E_0^2 e^{-2\alpha z} \pm 2r\gamma E_L E_0 e^{-\alpha z} \cdot \cos \theta \sin(\Delta\omega t + \Delta\varphi), \quad (2)$$

式中: $\Delta\omega$ 表示频差; θ 表示偏振角; E_L 是本振光场; E_0 是探针光源; r 是背向瑞利散射系数; γ 是与光源线宽相关的相干系数,其中系统关心的传感信息就包含在拍频信号中,即包含相位信息的三角函数:

$$\sin(\Delta\omega t + \Delta\varphi) = \sin\Delta\omega t \cos\Delta\varphi + \cos\Delta\omega t \sin\Delta\varphi, \quad (3)$$

其中的相移是光纤所经历应变、震动等环境事件的精确响应,后续通过快速傅里叶变换(FFT)等数据算法,实现感知信息解调。虽然 φ -OTDR 和 C-OTDR 在系统实现上类似,但两者的应用范围稍有区别:前者关注动态变化信号目标的探测,需适配更快的探测响应和处理算法;后者更常用于静态微弱信号的探测。

在石油工程监测领域得到广泛应用的分布式声学传感(DAS)技术,大都是基于 φ -OTDR 和 C-OTDR 技术实现震动信号的精确测量,如今 DAS 技术在城市管道、海洋地质、冰川等多个领域的传感监测应用中得到更多研究人员的关注^[15,18-19]。值得注意的是,利用光纤干涉原理实现的分布式传感系统,也是一种探测震动的技术方案,如在一些环状光网络结构中可以利用光纤萨格纳克干涉系统,实现震动探测^[20],这里不再展开讨论。

2.2 拉曼散射

光纤拉曼散射也与光纤材料所处的物理条件有关,这一特征可用于开发光纤拉曼传感器,特别是温度传感器。一般来说,光纤材料中的斯托克斯和反斯托克斯拉曼散射同时存在,但两者的散射光强有所不同,其原因是基态和激发态的布居数(N_0 和 N_1 ,即布居在原子核外不同层次位置的电子)有所不同,并且它们近似服从麦克斯韦-玻尔兹曼分布定律:

$$\frac{N_1}{N_0} \propto \exp\left(\frac{-\Delta E}{k_B T}\right), \quad (4)$$

式中: ΔE 是表征材料特征的激发态和基态之间的能隙; k_B 为玻尔兹曼常数。由上述公式可以发现,反斯托克斯拉曼散射与斯托克斯拉曼散射的效率比值 η_a/η_s 是与温度相关的函数,表示为

$$R(T) = \frac{\eta_a}{\eta_s} = \left(\frac{\nu + \Delta\nu}{\nu - \Delta\nu}\right)^4 \exp\left(\frac{-T_0}{T}\right), \quad (5)$$

式中: $\Delta\nu = \Delta E/h$; $T_0 = \Delta E/k_B$; h 是普朗克常量,因此不同材料其温度-散射强度之间的关系是不同的,对于玻

璃态的 SiO_2 材料, $\Delta E \approx 50 \text{ meV}$, 那么对应的 $\Delta\nu \approx 13 \text{ THz}$, $T_0 \approx 600 \text{ K}$ 。从公式中可以发现, $R(T)$ 随温度 T 的升高而增加。根据有关研究^[21], 室温下的反斯托克斯散射强度的温度灵敏度约为 $8 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。另外值得注意的是,上面公式仅对于自发拉曼散射成立,即入射的泵浦光功率小于受激拉曼散射的阈值。针对石英光纤来说,受激拉曼散射的光强阈值约为 10 MW/cm^2 。

一般来说,后向拉曼散射的强度正比于入射的探针光束功率,而且随着光纤的损耗,探针光强和拉曼散射光强都逐渐衰减,但反斯托克斯散射光与斯托克斯散射光的强度之比,与光纤衰减无关,仅与外界温度变化相关,因此利用这一关系,可以实现分布式光纤拉曼温度传感器(RDTS)。典型的 RDTS 系统,如图 5 所示。

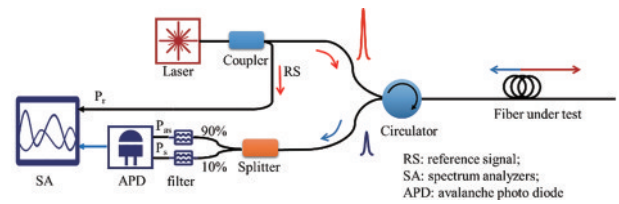


图 5 典型的 RDTS 系统结构示意图^[22]

Fig. 5 Typical RDTS system structure diagram^[22]

其中光纤耦合器将激光脉冲注入到长距离的传感光纤中,传感光纤反射回来的散射光包括瑞利散射光、拉曼散射光和布里渊散射光等多种成分,其中的拉曼散射的反斯托克斯光 P_{as} 比斯托克斯光 P_s 要弱得多,因此前置分束器要实现非对称的分束,典型比例为 $P_{as}/P_s = 90/10$,然后利用两个窄带的滤波器,可将斯托克斯散射光和反斯托克斯散射光区分出来。拉曼频移约为 13 THz ,在 1550 nm 波段处约 100 nm ,在光谱上较容易区分出来,但其中拉曼散射的强度却远远小于瑞利散射(前者约为后者的 $1/1000$),因此要求滤波器有较高的边瓣抑制比。

为了获得散射信号更高的信噪比性能,利用具有内部增益的雪崩光电二极管(APD)实现拉曼散射光的探测。在信号处理方面,也可采用多次数据采集、多次平均的方案实现信噪比的提高。值得注意的是,拉曼散射一般会具有波长相关性,在 1550 nm 处,拉曼散射较强,且光纤损耗也较低^[22]。

而 RDTS 的空间分辨率取决于光脉冲的宽度和探测器的响应率,较小的脉宽可以实现更高的传感分辨率,但短脉冲意味着较少的光强积分,需要更长的数据处理时间,这种类似的矛盾在上文中也有提及,实际应用中值得注意。另一方面,根据 $R(T)$ 的表达式,可以获得拉曼散射的温度灵敏度为

$$\frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = \frac{T_0}{T^2}, \quad (6)$$

式中, $1/R$ 为拉曼散射的参量, 从式(6)中可以发现, 温度灵敏度随着温度的升高而降低, 这对于基于拉曼散射的温度传感器应用来说, 其温度响应范围受到较大影响。

目前, RDTs 在技术上已经成熟, 已广泛商业化生产, 安装在隧道、铁路、电站电缆以及森林等应用场景下, 实现温度检测、火灾监测等。然而, 拉曼散射对于光纤中的应变参量十分不敏感, 因此另一种基于布里渊散射的分布式传感器也受到人们的广泛关注。

2.3 布里渊散射

光纤中的布里渊散射是由光子和声频带声子之间的相互作用产生, 体现在材料分子间的相互作用, 对温度和应变均较为敏感。利用布里渊散射实现分布式传感应用时, 也应注意自发和受激布里渊散射(SBS)的影响情况, 典型的 SBS 阈值约为 1 mW, SBS 的负面影响, 可通过提高光源的线宽进行消除。在布里渊散射过程中, 主要关注布里渊散射的增益, 其增益峰值可表示为

$$g_B(\nu_B) = \frac{2\pi n^7 \rho}{c\lambda\rho V_a \Delta\nu_B}, \quad (7)$$

式中: n 是光纤的折射率; ρ 表示弹光效应系数; c 是真空中光速; λ 是光波长; ρ 表示材料的密度; $\Delta\nu_B$ 表示光谱的半峰全宽; V_a 表示光纤中纵向声波的速率, 又满足 $V_a = \sqrt{Y/\rho}$, Y 是材料的杨氏模量。其中表征光纤特性的 Y 、 ρ 和 n , 会随着光纤的应变和温度等参量

的变化而发生改变, 因此可以用于实现传感应用。

分布式拉曼传感器和分布式布里渊传感器的差异在于, 前者测量散射光的幅度变化, 后者测量散射光的频移量, 在布里渊传感器中需适用窄线宽的激光光源和高分辨率探测器, 来分辨布里渊频移。布里渊频移与温度和应变的关系可以表示为^[23]

$$f_B(\epsilon, T) = f_B(0, T_r)[1 + C_\epsilon\epsilon + C_T\Delta T], \quad (8)$$

式中: C_ϵ 和 C_T 分别为频移的应变和温度灵敏度系数; T_r 为参考温度值。可以看出, 式(8)中包含温度和应变两个参量, 无法从单一的频移公式中解出, 因此还需要另外一个对光纤温度和应变敏感的布里渊散射参量, 且其灵敏度系数需与频移的灵敏度系数相互线性独立。研究发现布里渊散射的强度与温度和应力变化相关^[24], 布里渊散射的功率与温度和应变的关系可以表示为

$$P_B(\epsilon, T) = P_B(0, T_r)[1 + D_\epsilon\epsilon + D_T\Delta T], \quad (9)$$

式中, D_ϵ 和 D_T 分别为功率的应变和温度灵敏度系数, 值得说明的是, 布里渊散射的功率变化可通过与瑞利散射功率值对比取得。且布里渊散射的频移和功率的系数满足 $C_\epsilon C_T / D_\epsilon D_T \neq 1$, 即两组系数之间线性独立, 那么可以通过测量布里渊频移变化 Δf_B 和功率变化 ΔP_B 解调出待测光纤的温度和应变变化值, 并通过解调布里渊回波散射的时间进行事件定位。

利用布里渊散射实现光纤分布式传感器的结构有多种, 如 BOTDR、BOTDA 和 BOFDA, 但后两者待测光纤的两端都需要激光光源的接入, 在现网的光纤中不宜实施。BOTDR 的典型结构如图 6 所示^[25-26]。

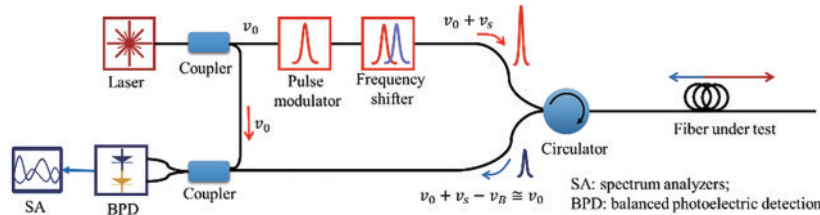


图 6 典型的 BOTDR 系统结构示意图^[25]

Fig. 6 Typical BOTDR system structure diagram^[25]

普通石英光纤的布里渊频移在 1550 nm 约 11 GHz 左右, 一般利用相干监测的系统方法。其中激光光源为单频光源, 经过脉冲调制为脉冲光, 并且为了在探测端避免去分析高频信号, 因此使用循环的频移电路把光源的频率频移至 $\nu_0 + \nu_s$, 其中 $\nu_s \approx \nu_B$, 这样布里渊散射光与本振光通过耦合器的混频, 再由平衡光电二极管探测接收, 从而消除其中的直流分量, 并获得包含光纤传感信息的频移量 $\nu_B - \nu_s$ 。除了图 6 所示采用频移方案的 BOTDR 系统, 还有采用微波外差技术实现的 BOTDR 等^[27]。

与 OTDR 类似, 为了获得较好的传感性能, BOTDR 仍需要高速的信号探测, 并且窄的光源脉冲能获得更好的空间分辨率, 但窄脉宽会导致光频展宽,

进而降低频移的测量精度, 因此在实际应用中也应酌情考虑。基于布里渊散射的光纤分布式传感系统能够同时感知环境应变和温度等多种参量, 在实现新型的传感应用方面具有独特优势, 是目前的研究热点之一, 关于传感系统的改进技术和先进数据处理技术也不断被提出^[28-29], 未来将会在实际工业生产中得到更为广泛的应用。

基于光纤中的散射效应可以构建多种分布式传感系统, 如表 1 所示, 由于所探测的参量各有侧重, 因此传感系统的应用范围也有所区别, 可以结合现网中光缆资源实现不同的新场景应用。值得说明的是, 典型传感系统除了在时域分析回波散射信号, 还可以在频域进行分析, 如 OFDR、BOFDA 等, 但由于这类传感

表 1 光纤中典型的光学散射及分布式传感技术

Table 1 Typical optical scattering and distributed sensing techniques in optical fibers

Scattering type	Optical parameter	Typical system	Sensing parameter
Rayleigh scattering	Amplitude	OTDR	Fiber length, average loss
	Polarization	P-OTDR	Vibration, polarization mode dispersion (PMD)
	Phase	φ -OTDR (C-OTDR)	Sound wave, vibration
Raman scattering	Amplitude	RDTS	Temperature
Brillouin scattering	Frequency shift	BOTDR	Temperature, strain

技术特性的限制,不适合在长距离的现网光缆中实施,这里不再展开阐述。

此外,随着光纤通信技术的不断演进,如新型光纤技术、波分复用技术和可调激光器技术等,有助于构建灵活、融合的光通信系统,并在有效解决通信信号和传感信号的串扰问题之后,可以允许通信信号和传感信号共同高效传递,实现多个传感单元的协同感知,最终形成高效、集成化的光网络的 ICAS 系统。

3 潜在应用场景

实现光网络 ICAS 技术,主要依托通信中的光纤资源,因此潜在的应用场景也主要在光网络的覆盖区域,这样能充分发挥光纤的通信和感知融合的优势,这种技术的融合不仅有效利用了运营商已有的光纤资源,还会对新建光缆资源有指导意义。下面,根据一些相关前沿研究,分别围绕光纤资源运维、智慧城市、管网和结构监测以及地质环境监测等场景,对光网络 ICAS 技术的潜在应用进行阐述分析,为今后光网络 ICAS 技术的推广应用提供参考。

3.1 光缆资源的运维管理

随着通信光缆铺设里程的增长,光网络构成越来越复杂,光纤资源有效的运维和管理变得迫切,亟需一种可满足光缆资源数字化、智能监测的新型技术手段。如上文所述,目前已广泛使用的 OTDR 技术,其利用回波瑞利散射信息,实现光纤链路特征的分析,用于光网络的特征分析、故障排查和网络维护,可视为光网络 ICAS 技术的应用之一。

3.1.1 光缆资源管理

OTDR 不仅可以作为检测光纤质量的辅助手段,还可以结合电子地图等技术,实现光纤资源的真实可视化,满足光缆路由安全检测需求。2020 年,通信运营商 Verizon 和日本 NEC 曾合作发表研究论文^[30],在现网中研究将分布式光纤传感技术与全球定位系统(GPS)结合,对原本定位误差约 15% 的光纤路由信息实现精确还原,定位精度达到 4 m,能够有效提高光缆资源的管理效率,为光缆资源管理技术的改进提供了有效思路,该研究的实验装置如图 7 所示。

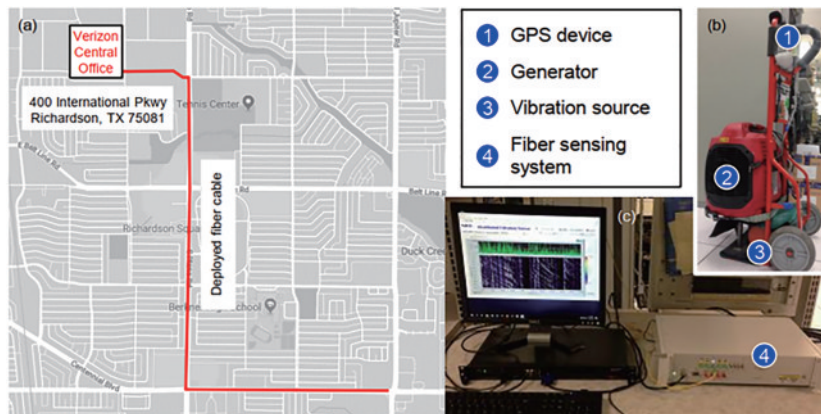


图 7 光纤路由检测实验^[30]。(a) 实验选择的光纤路径;(b) 带 GPS 的机械振动装置;(c) 分布式光纤传感系统

Fig. 7 Fiber optic route detection experiment^[30]. (a) Experimentally selected optical fiber path; (b) mechanical vibration device with GPS; (c) distributed optical fiber sensing system

3.1.2 光缆故障监测

光缆资源的故障监测和故障定位是光网络管理的另一个重要需求,其中无源光网络(PON)作为光网络下沉的关键,也是监测的重点,以保障光网络的业务质量。国际电信联盟电信标准化部门(ITU-T)也针对这

种需求进行了相关标准的制定,但早期的标准如 G. 983. 5 和 G. 984. 1 仍以光网络的冗余备份和保护切换方案为主,这种故障保护机制效率较为低下,往往在光纤故障发现之前就已经导致业务中断,且上述标准并没有对光网络故障进行识别和定位的规定,直到

ITU-T L 系列的标准制定,开始使用 OTDR 进行 PON 的故障监测^[31]。这种监测方式,即在现有的 PON 中附加监测通道,对网络中的故障进行自动识别和定位,从而节约运营商的网络维护费用,降低网络故障导致的业务恢复时间,实现业务的差异化服务和增强服务质量(QoS)保障。此外,也为潜在的增强物理层保护机制铺平了道路。

在 ITU L. 66(2007) 标准中,就预留了 U 波段(1625~1675 nm)用于 PON 的维护,目前光网络的监测技术需求,聚焦在不干扰现网业务的前提下实现光纤链路劣化或故障的监测。除了上述普通 OTDR 技术之外,研究人员提出了多种新型技术方案^[32-36],如波长可调 OTDR 方案、在光网络单元(ONU)端集成 OTDR 方案、BOTDR 方案、光编码器方案等,但考虑

到在接入网中,运营商对于成本是非常敏感的,如基于波长可调 OTDR 技术,其监测信号与业务信号之间的波长间隔将比单波长 OTDR 更加严格,因此技术成本高,而且在实际应用中的容量有限,导致频谱效率很低。上述技术仍需要不断改进,并在市场中加以验证。

Lee 等^[37]提出一种带光纤保护的监测系统,使用有控制单元的光伏变换器来控制开关的运行,实现监测通道的远程重构,如图 8 所示。一个带有控制信息的高光功率信号从中心局(CO)传输到远程节点(RN)。在 RN 中,光伏变换器将光功率信号转换为电信号,然后一个控制单元使用这个电信号来重新配置特定的开关。但这种系统较为复杂,同时也增加了运营成本。

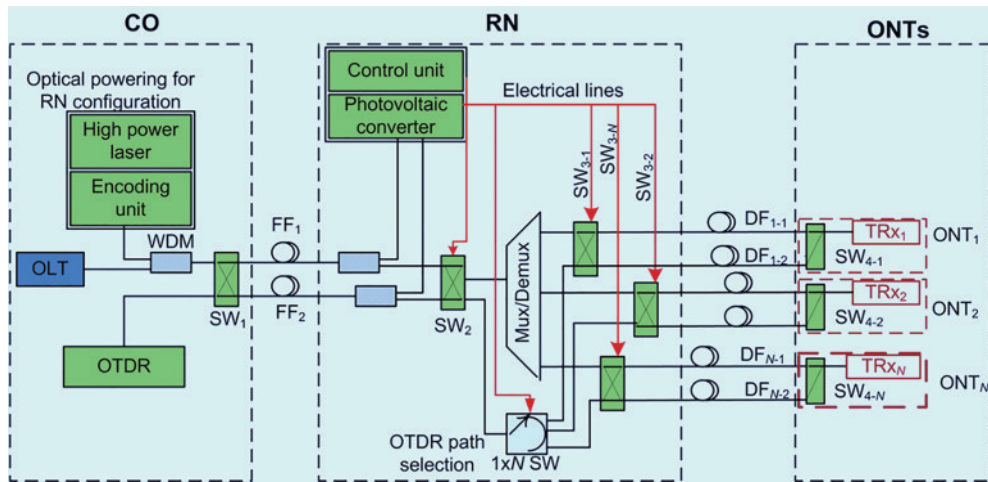


图 8 带保护功能的监测系统^[37]

Fig. 8 Monitoring system with protection function^[37]

来自日本电报电话公司(NTT)的研究人员提出一种基于 BOTDR 的监测系统^[38],利用布里渊频移(BFS)

作为特征信息来区分不同的支路,该系统结构的示意图如图 9 所示。在实验中,研究人员通过控制掺杂浓度

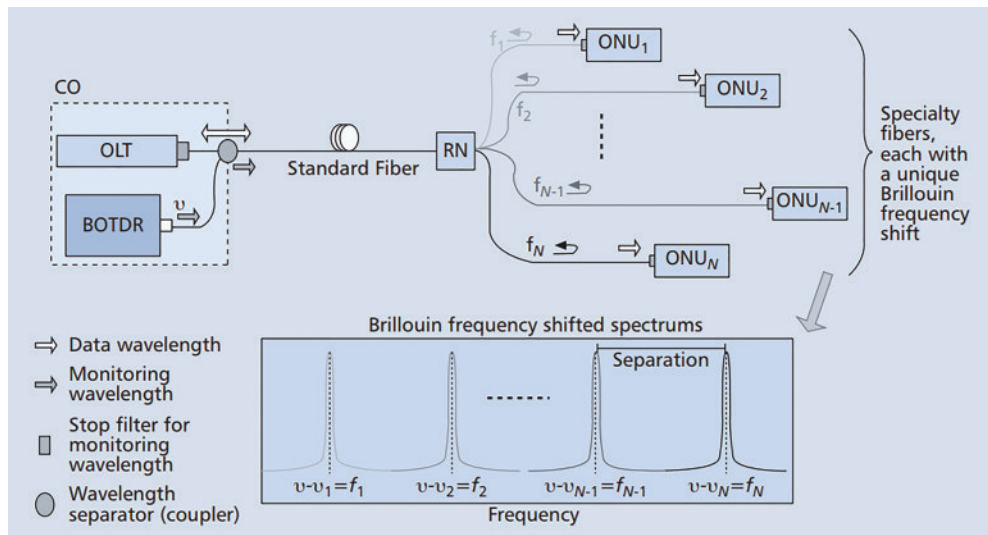


图 9 基于 BOTDR 的光网络监测系统^[38]

Fig. 9 Optical network monitoring system based on BOTDR^[38]

制造了 8 种不同的光纤, 每种光纤具有不同布里渊频移, 可以分别表征 8 个不同支路。通过记录不同支路反射光信号的 BFS 变化, 可以实现特定支路的动态监测, 并通过分析该分支在特定 BFS 处的轨迹, 确定该分支的准确故障位置。在实验中, 监测脉冲波长为 1650 nm, 脉宽为 100 ns, 峰值功率为 26 dBm, 经过链路的放大, 获得了 17.22 dB 的高动态范围。该方案需要为不同支路定制光纤, 方案构建起来较为复杂, 无法成熟商用, 但实验方案为监测技术的改进提供了思路。

随着机器学习和人工智能技术的发展, 在光网络故障监测的应用中融合更加精准的判决算法, 将进一步增强光网络故障的分类和预测等功能, 实现光网络的智能运维。

结合光网络 ICAS 技术可实现光缆资源全生命周期的实时监测, 对潜在故障及时判决预警, 提升光网络服务质量, 降低经济损失。除了运营商网络, 光网络 ICAS 的应用场景还将进一步拓展到数据中心的业务场景, 除了能够实现数据中心光网络的故障监测, 还能在系统中融合温度监测等新型功能模块, 综合提升数据中心的业务质量, 但目前这些新型应用场景仍需要相关研究进行详细论证。

3.2 智慧城市

由于光纤网络是城市基础设施的重要组成部分, 触及城市的各个角落, 光网络 ICAS 技术的推广, 将使基础光纤资源和多种传感设备形成功能互补, 在构建智能城市中发挥巨大优势, 实现城市的智能感知和高效治理^[39-40], 并为电信运营商创造新的收入来源。目前研究较多的领域包括智能安防、智慧交通等领域。

3.2.1 智能安防

来自日本 NEC 公司的研究人员提出一种通信和传感一体化的双向波分复用(WDM)技术方案, 能够在保证业务的前提下, 利用光纤分布式传感技术实现受保护基础设施的入侵检测^[41]。实验中, 研究人员采用低损耗 C 波段(1530~1565 nm)进行数据信号和传感信号的同时传输, 数据信号和传感信号在每根光纤中以相反的方向传播, 以减少相互的非线性干扰, 如图 10(a)所示。并且该系统可以安装多个光纤传感解调器以实现多种环境参量的感知。后续研究人员在数据处理中引入人工智能算法, 通过机器学习训练, 可以根据感知的震动特点区分出不同的入侵行为, 如图 10(b)所示, 这为大量部署的监控摄像头提供了一种更具经济效益的入侵监测替代解决方案。

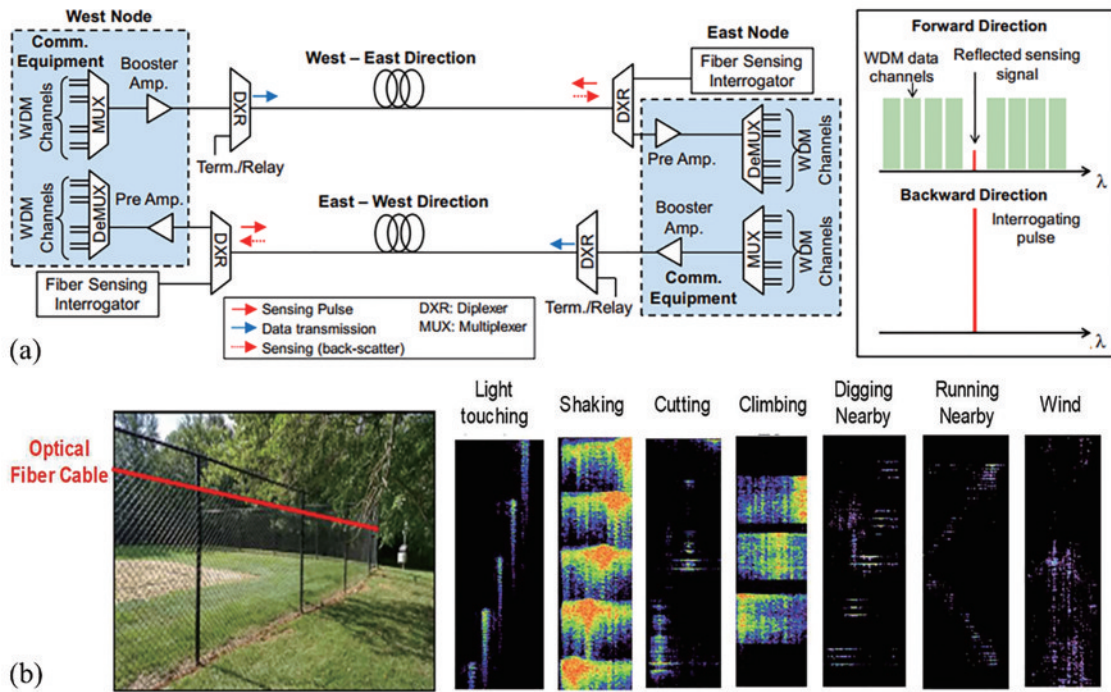


图 10 分布式光纤传感技术实现入侵监测^[41]。(a) 双向传输系统; (b) 实验结果

Fig. 10 Intrusion monitoring by distributed optical fiber sensing technology^[41]. (a) Bidirectional transmission system; (b) experimental result

3.2.2 智慧交通

考虑到现实中光缆建设往往复用现有的道路资源^[42], 进行施工铺设, 因此研究人员可以在通信系统中增添传感模块, 通过对车辆震动特性的感知, 实现交通车辆的状态监测。

2019年, Version 和 NEC 就曾合作在得克萨斯州达拉斯地区进行实地研究, 利用通信光缆进行现场实验^[43-44], 实验所用的光缆长度约 55 km, 在 C 波段预留 3 个 50 GHz 的光通道波段用于传感信号传输, 两个波长选择开关(WSS)用于实现通信信号和传感信号的复

用,如图 11(a)所示。并且为了减少光纤非线性串扰,传感模块发射的高功率脉冲沿通信信号相反方向传播。经过 110 km 的传输,该 400 Gb/s 通信系统的误码率小于 2.2×10^{-2} ,传感信号融合前后均未观察到明显

的信号退化。研究人员对传感信号进行数据处理,通过频谱瀑布图提取出交通车辆状态信息,所获得的平均车速与视频统计的车速非常接近,相差小于 1.5%,而总车流量的相差小于 6.5%,如图 11(b)所示。

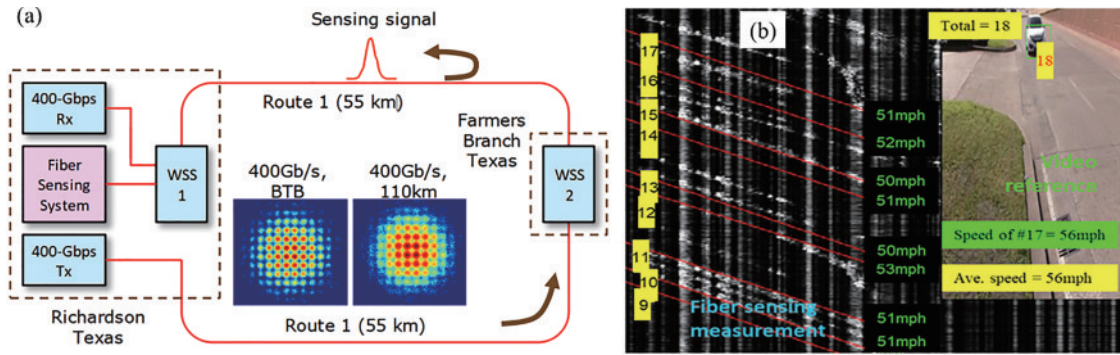


图 11 利用分布式光纤传感技术实现交通监测^[43-44]。(a)系统设置;(b)车辆状态监测

Fig. 11 Traffic monitoring using distributed optical fiber sensing technology^[43-44]. (a) System setup; (b) vehicle condition monitoring

来自意大利的研究人员在 2021 年利用安格里市一个数据中心的一段光缆资源,也进行了现场实验^[45],对分布式光纤传感技术在交通车辆监测应用中的检测效果进行了研究,如图 12(a)所示。监测采用的光源脉宽为 50 ns,能够获得 5 m 的空间分辨率,采集到的数据利用霍夫变换进行车辆特征识别,如图 12(b)所示。在 1 h 的车流监测实验中,456 辆车通过事件的检测成

功率为 73% 左右,剩余的 27% 的案例中,一些轻型车辆通过时留下的痕迹与噪声太接近,利用霍夫变换数据处理方法无法探测到。进一步地,研究人员提出利用阈值判决来区分轻型和重型车辆,如图 12(c)所示,这弥补了传统道路监控无法对车辆称重的空白。这项研究也表明,光网络 ICAS 技术可充分挖掘光纤基础设施,拓展用于执行交通监控,而无需额外的安装成本。

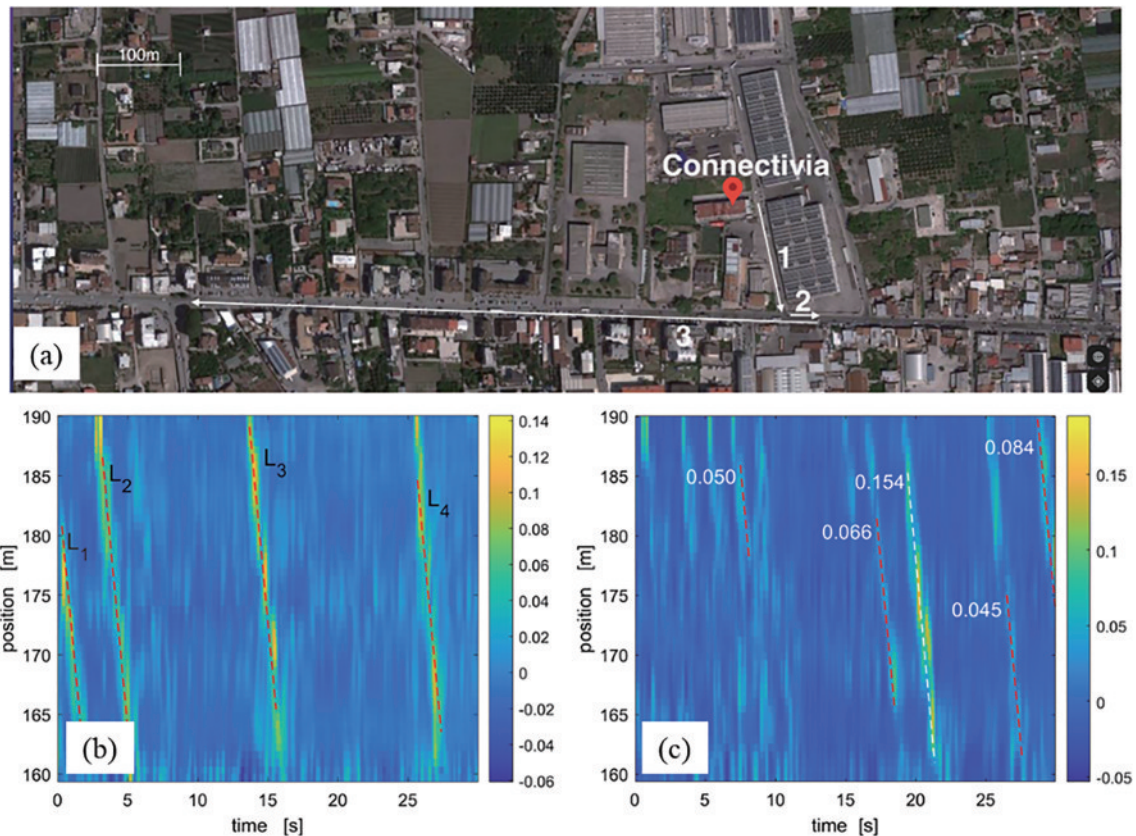


图 12 交通监测实验^[45]。(a)实验所用运营商光缆的路由标识;(b)基于霍夫变换算法的数据处理;(c)基于判决阈值的车辆特征提取
Fig. 12 Traffic monitoring experiment^[45]. (a) Routing identification of carrier optical cable used in experiment; (b) data processing based on Hough transform algorithm; (c) vehicle feature extraction based on decision threshold

3.3 管网和结构监测

在电力网线和油气管线等领域,由于需要实时传输调度控制、告警等信息,往往会在建设输电线或石油管线的同时,建设专有的光纤网络以满足上述通信需求。同时,为了保证管网的正常运行和及时维护,其工作状态的监测十分关键。而利用光网络 ICAS 技术,可以实现现有光纤资源的融合复用,同时满足通信和传感功能。

3.3.1 智能电网监测

目前我国电力网中的光纤资源规模已超过 10^6 km,其中主要采用了光纤复合架空地线(OPGW)的安装

方式,即把光纤安装在架空输电线的地线中,兼具地线与通信的双重功能。由于电网的覆盖范围广、服役环境复杂,为了提高电网的防灾能力和服务质量,需要准确感知输电线路状态,如线路的结冰、驰振状态等,并能为输电线路提供故障预警,这也是构建智能电网的基础^[46]。

基于分布式光纤传感技术,研究人员提出利用 OPGW 网络实现电力线的结冰状态监测,并在实际 500 kV 的输电线中进行了实验验证^[47],基于 BOTDR 技术对回波散射信号的频移解调,实现了最长为 64 km 的线路结冰状态监测,如图 13 所示。

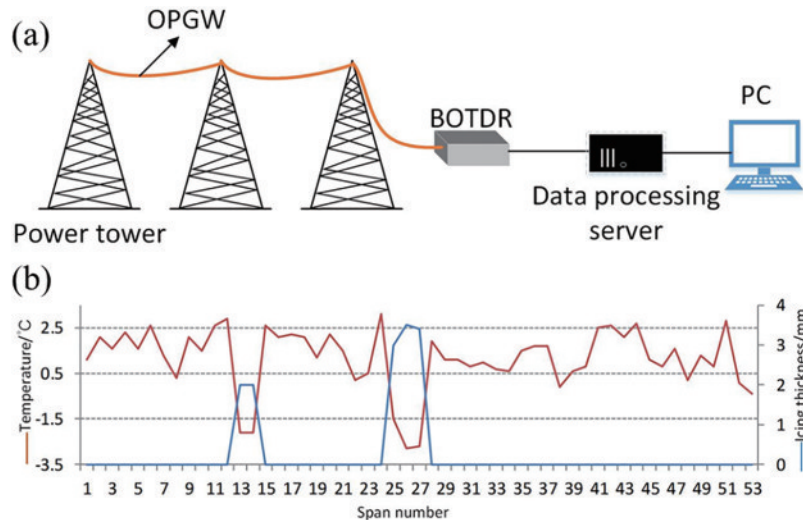


图 13 变电站之间的高压线路监测实验^[47]。(a) 系统示意图;(b) 线路温度与结冰情况监测

Fig. 13 High-voltage line monitoring experiment between substations^[47]. (a) System schematic diagram; (b) temperature and icing monitoring of line

另外,利用 OPGW 网络覆盖范围广的特性,还可以实现特定环境的动态监测,研究人员就曾实验分析了 OPGW 光纤的偏振态与大风、雷击等环境变化之间的关系,如美国 Ciena 与 Verizon 曾合作进行为期半年左右的实验研究^[48],分析环境雷击事件的时间和定位信息与 OPGW 光纤特性之间的响应情况,并得出光纤 SOP 瞬态与雷击之间存在 95% 的相关性的结论,这也为人们对自然环境的观测提供了一种有趣的技术思路。

3.3.2 油气管线

目前我国油气长输管线总里程近 17×10^4 km,由于管道的铺设常常需要穿越复杂地质和特殊地貌,地质灾害引起的场地变形已是造成埋地管道破坏失效的主因之一,极易造成管道失效,引发油气泄漏等重大安全问题。与此同时,由于有通信需求,油气管道常伴随安装通信的光缆,因此分布式光纤传感技术可以用来实现管道结构的安全监测^[49]。如在 2016 年,研究人员就曾利用 φ -OTDR 技术对长距离天然气管道进行安全监测^[50],并将模式识别技术用于管道损伤事件的分类,获得了较好的实验结果。

2021 年,中国的研究团队也报道了利用通信光纤实现管道安全监测的现场实验研究^[51],实验所用管道结构位于江西宜春市的一处丘陵地带,管道长度约 690 m,如图 14 所示。实验采用 BOTDR 和 φ -OTDR 等多种分布式光纤传感技术,分别获取管道环境的应变、温度和震动等各类参量,并通过建立事件模型,实现了土壤侵蚀、油气泄漏和岩崩等多种管道灾害事件的识别分析。研究表明,现网中的光缆基础设施可以作为实现管道灾害监测的传感资源。

另外还发现,在基于分布式光纤传感技术的各类研究工作中,通过多维特征参量进行事件的分类提取,往往需要准确高效的数据算法,算法的选择对于传感器最终的效果影响较大^[52-53]。传感信号的数据处理方法,一般包括信号的分割去噪预处理、特征提取和分类等几个步骤,其中,信号特征的提取和分类较为关键,对此研究人员提出了多种技术方案^[54-55],如时域特征提取、频域特征提取、上下文特征向量整合提取等,在信号的特征分类方面可以使用典型的分类器,如支持向量机(SVM)、关联向量机(RVM)、采用人工神经网络(ANN)等分类方案。

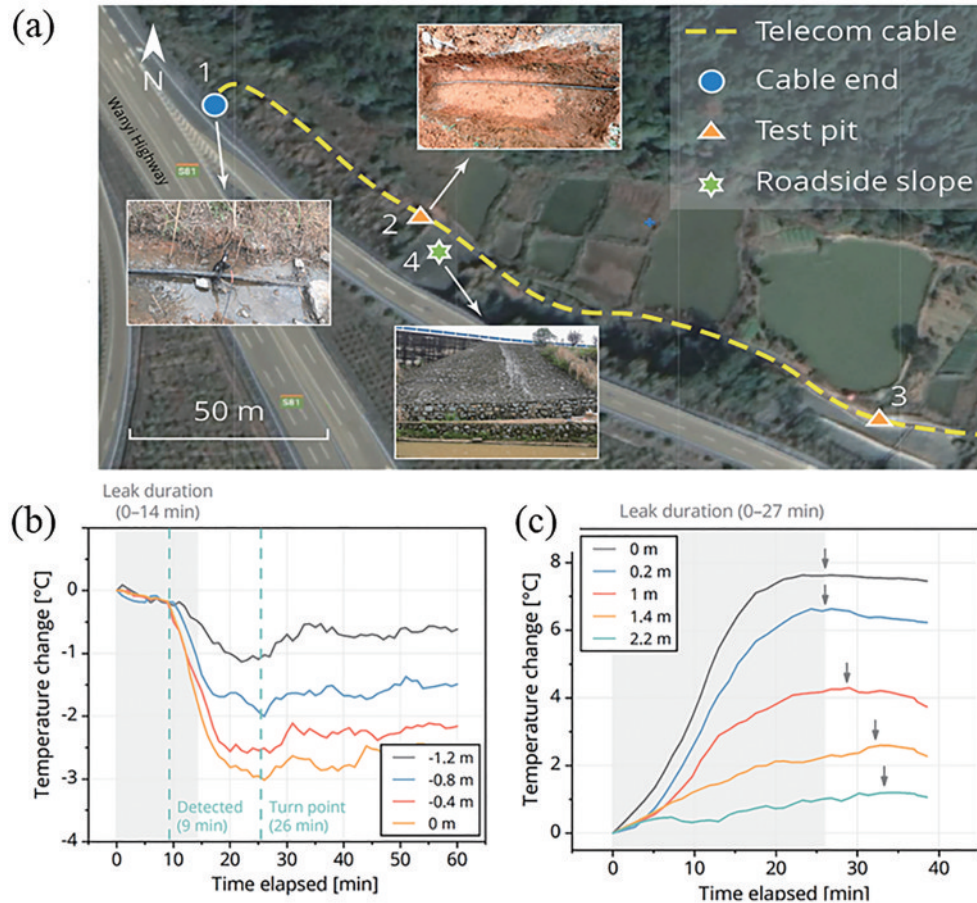


图 14 利用通信光缆实现管道监测^[51]。(a)实验场位置标识;(b)气体泄漏监测;(c)漏油监测

Fig. 14 Pipeline monitoring by communication optical cable^[51]. (a) Location identification of experiment; (b) gas leak monitoring; (c) oil spill monitoring

在文献[18]中,研究人员采用一维卷积神经网络(CNN)进行特征提取,使用SVM分类器来代替CNN网络中的软max层来进一步优化分类,并在输油管道监测的事件分类应用中进行了验证,平均准确率达到

98%,识别性能优于基于固定特征的机器学习方法,如图15所示。随着用于事件监测系统的数据处理技术不断完善,尤其是多事件混合的模式识别算法的成熟,光网络ICAS技术将适用于更多的应用场景。

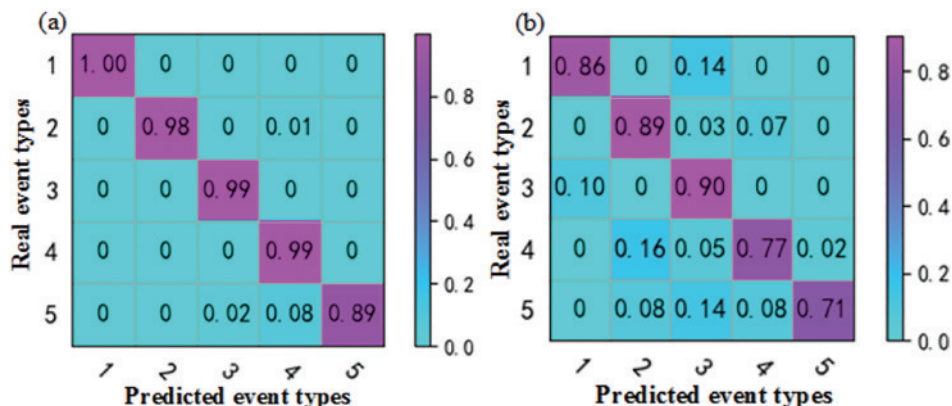


图 15 用于特征识别的混淆矩阵^[18]。(a)一维卷积神经网络的方法;(b)传统的机器学习方法

Fig. 15 Confusion matrix for feature recognition^[18]. (a) One-dimensional convolutional neural network method; (b) traditional machine learning method

3.3.3 桥梁结构

类似地,在桥梁结构中,由于需长时间服役,在整个周期过程中,往往会经历不良震动或超重载荷等损

伤,积累后就会发生变形、裂纹等灾害,因此桥梁监测技术是相关研究人员比较关注的问题。而利用分布式光纤传感技术实现桥梁结构监测^[56],不仅能满足多参

量同时监测的需求,还能与桥梁上的通信需求融合,在有效控制成本的前提下实现快速部署和远程实时监测,这也是光网络 ICAS 技术潜在的应用场景,相比单独安装的传感系统更具有价值,在未来光网络建设的规划中可以进一步进行评估验证。

3.4 地质环境监测

目前全球已经敷设的通信光缆覆盖范围非常广,跨越多种地质环境,传统上的光缆资源往往专用于通信需求,且由于光缆施工的成本较高,典型的商业模式是在前期就部署比实际所需要多的纤芯数量。与此同时光通信技术不断改进,单芯光纤容量不断增加,这就产生了许多未承载业务的光纤资源,即“暗光纤”,因此除了上文所述的复用带业务光纤资源实现分布式传感技术之外,也可以利用“暗光纤”资源实现分布式传感网络,这或将为全球地质环境监测带来更为广阔的研究视角,相比传统的卫星遥感、地震台等地质环境监测方案,光纤方案能够实现更为密集数据点采集下的良好经济效益,这类应用也是目前光网络 ICAS 技术的研究热点之一。

3.4.1 水文监测

来自美国俄勒冈州立大学的 Selker 团队^[57-58],从 2006 年开始,就致力于利用分布式光纤温度传感(DTS)系统进行水文环境监测的研究工作,由于该校位于美国西海岸的俄勒冈州的科瓦利斯市,该地区降水丰富,有多条河流,独特的水文环境为研究人员进行生态科学研究提供了丰富的现场实验场所。该研究过程持续至今,不仅充分验证了 DTS 系统对于水文生态环境监测应用的有效性,并且利用 DTS 系统采集的大量环境参量数据为水文环境研究和濒危生物的保护提供了高价值支撑。

与传统的离散时间点、离散空间点的传统测温技术相比,使用 DTS 系统实现待监测水文环境的量化分析具有显著的优势。光缆作为一个无源的温度计,可以快速实现较大空间的覆盖。随着 DTS 技术的进步,该技术在土壤、大气、深海等多种应用环境中又进行了多种实验研究,且在自然水文环境中的研究越来越受到关注。研究人员对典型应用领域进行了统计,如图 16 所示^[59],其中河流河床、井下钻孔和土壤湿度调查最为广泛。

早在 1996 年,研究人员就曾在法国南部和瑞士北部之间的日内瓦湖中进行现场实验,利用湖底已铺设的通信光纤,获得湖底完整的温度变化数据^[60],如图 17 所示。该测试方案是基于布里渊散射实现的 DTS 系统,在测温时实现空间分辨率约为 1 m。越来越多的现场实验已经证实利用普通商用的通信光缆实现水文环境监测的应用潜力,这将为地球环境的监测提供新的技术选择。

3.4.2 地震监测

地震监测是地质环境监测应用中的一项长期且重

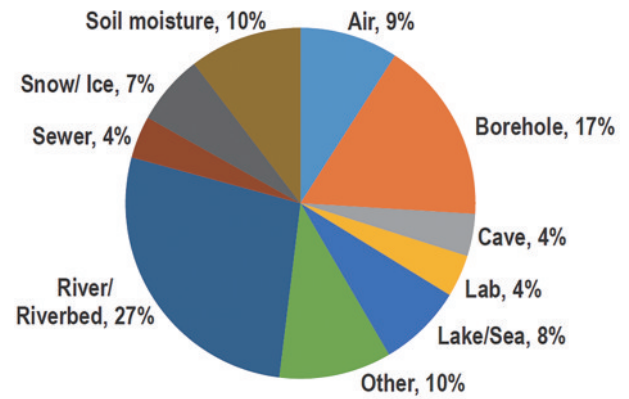


图 16 文献统计 DTS 在各领域应用分布占比情况^[59]

Fig. 16 Proportion of DTS application in various fields according to literature statistics^[59]

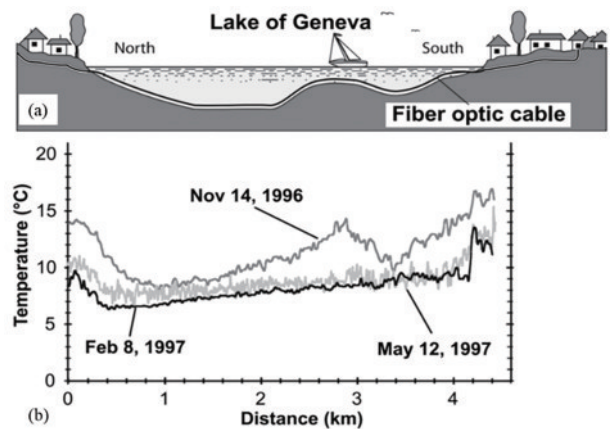


图 17 日内瓦湖底温度测试实验^[60]。(a) 所用原有光缆资源示意图;(b) 实验获得的温度数据

Fig. 17 Temperature test at bottom of Lake Geneva^[60].

(a) Schematic diagram of original optical cable resources;

(b) temperature data obtained in experiment

要的任务^[61],采用分布式光纤传感技术实现地震监测,能够充分利用通信光缆基础资源,扩展现有监测网络的覆盖范围和采样密度,有效弥补传统地震仪观测数据不足的情况。如实现海床地质的详细测绘,进而更好地预测海底地震和海底火山的活动情况,其对于极端海啸的提前预警有重要意义。利用通信光缆实现地震监测,是光网络 ICAS 技术在地质环境监测中的重要应用。

德国地球科学研究中心的研究人员就曾在冰岛上,利用其本地运营商 Mila 的通信光缆资源,进行地震监测的验证实验^[62],并在实验中发现雷恰内斯区域断裂带新的地质演变特性。实验所用的 15 km 光缆铺设于 1994 年,实验采样频率设置在 1000 Hz,空间采样分辨率为 4 m,这种利用长距离通信光缆实现的大范围的地质监测,能有效提高地震识别和定位能力,并为精确的地质表征提供数据。

2019 年,美国伯克利国家实验室的研究人员利用美国能源部在加州铺设的 ESnet(美国能源网)光缆中

的部分“暗光纤”,结合分布式传感技术,对近地地表特征和地质地震等事件监测进行了实验研究^[15],实验中所用光纤位置从加州西萨克拉门托到加州伍德兰约 27 km,所用传感器设备为英国 SILIXA 公司生产的 iDAS 产品,用于采集感知数据,采集频率为 500 Hz,空间分辨率为 2 m。通过 DAS 监测噪声环境下的地质剪切波速度,研究人员利用蒙特卡罗反演策略反演出监测区域的土壤地质环境分布情况,并且研究人员利用该 DAS 系统成功识别到发生在墨西哥恰帕斯的一次 8.1 级地震事件。

由于陆地光缆往往铺设在道路附近,利用这类光纤进行地震监测应用时,要考虑噪声对光纤感知数据的干扰情况,必要时需配合独立地震仪实现数据的互补,另外受限于光纤回波散射信号的强度,单根光纤的探测距离约为几十千米,因此更大范围的地震探测应用需要多个光纤传感单元的组合,这类相关研究目前还是空白^[63]。

相比来说,位于海洋环境下的海底光缆,其环境噪声较小,更有利于实施光纤分布式传感技术,目前全球海缆部署达 10^6 km 数量级,利用海底光缆实现海洋环境的观测将具有巨大的成本优势^[16,20]。

2019 年,同样是美国伯克利国家实验室,其研究人员在位于横跨加州近海大陆架的一段用于科学研究的通信光缆上,进行了基于 DAS 技术的海床地质结构的监测研究^[19,64],如图 18 所示,该光缆系统建于 2003 年,

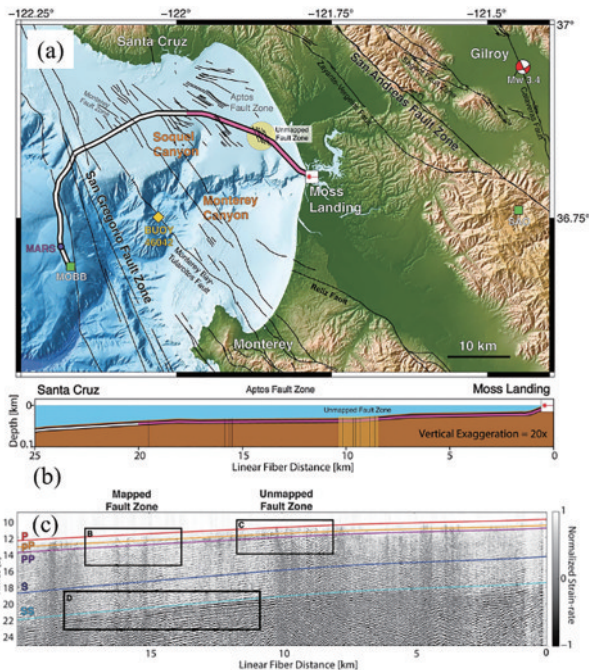


图 18 地震监测实验^[19,64]。(a) 所用海缆系统的示意图; (b) 海缆的截面图; (c) 光纤传感器获取的地震断裂带数据

Fig. 18 Earthquake monitoring experiment^[19,64]. (a) Schematic diagram of sea cable system; (b) cross-sectional drawings of sea cable; (c) seismic fault zone data obtained by optical fiber sensors

是第一个太平洋海底地震观测台。现场实验中,研究人员根据一场小型地震事件,检测出多个未曾标注的海底断层带。该研究还跟踪了北太平洋风暴周期内的海况动态,研究数据为海洋动力学研究提供了很有价值的参考。研究实验所用光缆长度为 20 km,采样分辨率为 10 m,实验过程持续约 4 天,采样到的传感数据达 3.2 TB。

基于现有和未来拟建设的海底光缆基础设施,除了用于监测海床地质环境变化和海底地震事件之外,利用同样的传感原理,或许还可以实现海底核武器爆炸实验监测、海洋预警、海洋地震评估等特殊活动的感知。相信未来会有更多的实验研究,如获取更详细的面波特性和数据等,进一步支撑光网络 ICAS 技术在海洋领域的应用。

4 结束语

光网络的 ICAS 设计能够充分发挥光缆基础设施的优势,实现多维传感数据的密集采集,为光网络的运维管理提供新思路,也有助于实现多领域的创新应用,辅助万物智联时代的全场景感知。本文对光纤 ICAS 的天然融合特性进行了阐述,对基于光纤瑞利散射、拉曼散射和布里渊散射等物理原理实现的多种关键使能技术也进行了详细的分析,并结合相关前沿研究,综合阐述了光网络 ICAS 技术多场景中的应用情况。但目前光网络的 ICAS 技术研究处于初始阶段,仍存在多方面的问题需要解决,如:

1) 通信和传感信号串扰问题。在 PON 的集中式监测应用中,随着客户端数量的增加,势必要求更加精细的频带控制,以保证光纤中传感信号和通信信号的低串扰,对光源和滤光片等提出更高的要求,这会让监测系统的部署成本显著增加;

2) 通信和传感系统组件的集成化问题。为了实现通感一体深层次的融合,势必需要在系统组件层面做进一步的集成设计,而对于传感信号常用的 U 波段,部分光器件在该波段的特性仍缺乏充分的研究,技术标准化方面的工作也较为欠缺,需要学术界与产业界进行紧密合作,在设计、制造和应用等多方面共同推进;

3) 实时数据处理问题。从现场实验情况来看,尤其是长距离监测应用,解调器获取的原始数据量常常日均在几十 TB,因此需要高效的传感数据处理和参量特征提取技术,才能保证传感监测的实时性。随着人工智能算法、机器学习以及边缘计算等新技术的融入,并最终形成通感算一体的系统架构,相信这一问题也会得到一定解决。

随着相关领域的不断发展,光网络 ICAS 技术有望在未来变得更加可靠,并能指导光网络新的建设,合理布局光缆资源,满足全场景感知的需求,也将为数字孪生等更高阶的应用提供强大的物理世界感知能力。

参 考 文 献

- [1] Viswanathan H, Mogensen P E. Communications in the 6G era[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 57063-57074.
- [2] di Taranto R, Muppisetty S, Raulefs R, et al. Location-Aware Communications for 5G Networks: how location information can improve scalability, latency, and robustness of 5G[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2014, 31(6): 102-112.
- [3] Heidari E, Gladisch A, Moshiri B, et al. Survey on location information services for Vehicular Communication Networks[J]. *Wireless Networks*, 2014, 20(5): 1085-1105.
- [4] Amin M G, Zhang Y D, Ahmad F, et al. Radar signal processing for elderly fall detection: the future for in-home monitoring[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2016, 33(2): 71-80.
- [5] Yang B, Cao X L, Xiong K, et al. Edge intelligence for autonomous driving in 6G wireless system: design challenges and solutions[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2021, 28(2): 40-47.
- [6] Mu J S, Gong Y, Zhang F P, et al. Integrated sensing and communication-enabled predictive beamforming with deep learning in vehicular networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(10): 3301-3304.
- [7] Cui Y H, Liu F, Jing X J, et al. Integrating sensing and communications for ubiquitous IoT: applications, trends, and challenges[J]. *IEEE Network*, 2021, 35(5): 158-167.
- [8] He Q, Wang Z, Hu J B, et al. Performance gains from cooperative MIMO radar and MIMO communication systems[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2019, 26(1): 194-198.
- [9] Li B, Petropulu A P, Trappe W. Optimum co-design for spectrum sharing between matrix completion based MIMO radars and a MIMO communication system[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(17): 4562-4575.
- [10] 苑立波, 童维军, 江山, 等. 我国光纤传感技术发展路线图[J]. *光学学报*, 2022, 42(1): 0100001.
Yuan L B, Tong W J, Jiang S, et al. Road map of fiber optic sensor technology in China[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(1): 0100001.
- [11] Yan Y X, Zheng H, Zhao Z Y, et al. Distributed optical fiber sensing assisted by optical communication techniques [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(12): 3654-3670.
- [12] Kapron F P, Maurer R D, Teter M P. Theory of backscattering effects in waveguides[J]. *Applied Optics*, 1972, 11(6): 1352-1356.
- [13] Smith R G. Optical power handling capacity of low loss optical fibers as determined by stimulated Raman and Brillouin scattering[J]. *Applied Optics*, 1972, 11(11): 2489-2494.
- [14] Barnoski M K, Jensen S M. Fiber waveguides: a novel technique for investigating attenuation characteristics[J]. *Applied Optics*, 1976, 15(9): 2112-2115.
- [15] 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: 1328.
- [16] Zhan Z W, Cantono M, Kamalov V, et al. Optical polarization-based seismic and water wave sensing on transoceanic cables[J]. *Science*, 2021, 371(6532): 931-936.
- [17] Shim H K, Cho K Y, Takushima Y, et al. Correlation-based OTDR for in-service monitoring of 64-split TDM PON[J]. *Optics Express*, 2012, 20(5): 4921-4926.
- [18] Wu H J, Chen J P, Liu X R, 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.
- [19] Cheng F, Chi B X, Lindsey N J, et al. Utilizing distributed acoustic sensing and ocean bottom fiber optic cables for submarine structural characterization[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 5613.
- [20] 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.
- [21] Hartog A H, Leach A P, Gold M P. Distributed temperature sensing in solid-core fibres[J]. *Electronics Letters*, 1985, 21(23): 1061-1062.
- [22] Samson P J. Analysis of the wavelength dependence of Raman backscatter in optical fibre thermometry[J]. *Electronics Letters*, 1990, 26(3): 163-165.
- [23] 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.
- [24] Parker T R, Farhadiroushan M, Handerek V A, et al. Temperature and strain dependence of the power level and frequency of spontaneous Brillouin scattering in optical fibers[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(11): 787-789.
- [25] 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.
- [26] Maughan S M, Kee H H, Newson T P. 57-km single-ended spontaneous Brillouin-based distributed fiber temperature sensor using microwave coherent detection [J]. *Optics Letters*, 2001, 26(6): 331-333.
- [27] Ohno H, Naruse H, Yasue N, et al. Development of highly stable BOTDR strain sensor employing microwave heterodyne detection and tunable electric oscillator[J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4596: 74-85.
- [28] Koyamada Y, Sakairi Y, Takeuchi N, et al. Novel technique to improve spatial resolution in Brillouin optical time-domain reflectometry[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(23): 1910-1912.
- [29] Wang F, Zhang X P, Lu Y G, et al. Spatial resolution analysis for discrete Fourier transform-based Brillouin optical time domain reflectometry[J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(2): 025202.
- [30] Xia T J, Wellbrock G A, Huang M F, et al. First proof that geographic location on deployed fiber cable can be determined by using OTDR distance based on distributed

- fiber optical sensing technology[C]//2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 8-12, 2020, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2020.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] de Mulder B, Chen W, Bauwelinck J, et al. Nonintrusive fiber monitoring of TDM optical networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(1): 305-317.
- [34] Zhang X, Ning N. A PON monitoring scheme for online fault detection and localization[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(3): 1-6.
- [35] Iida D, Honda N, Izumita H, et al. Design of identification fibers with individually assigned Brillouin frequency shifts for monitoring passive optical networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(5): 1290-1297.
- [36] Zhu M, Zhang S Y, Li G X, 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.
- [37] Lee J H, Choi K M, Moon J H, et al. A remotely reconfigurable PON architecture for efficient maintenance and protection[C]//2009 Conference on Optical Fiber Communication, March 22-26, 2009, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2009.
- [38] Honda N, Iida D, Izumita H, et al. In-service line monitoring system in PONs using 1650-nm Brillouin OTDR and fibers with individually assigned BFSs[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(20): 4575-4582.
- [39] Awwad E, Dorize C, Guerrier S, et al. Detection-localization-identification of vibrations over long distance SSMF with coherent $\Delta\phi$ -OTDR[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(12): 3089-3095.
- [40] Luch I D, Boffi P, Ferrario M, et al. Vibration sensing for deployed metropolitan fiber infrastructure[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(4): 1204-1211.
- [41] Aono Y, Ip E, Ji P. More than communications: environment monitoring using existing optical fiber network infrastructure[C]//Optical Fiber Communication Conference 2020, March 8-12, 2020, San Diego, California, USA. Washington, D.C.: OSA, 2020: W3G.1.
- [42] Durairajan R, Barford P, Sommers J, et al. InterTubes: a study of the US long-haul fiber-optic infrastructure[C]//SIGCOMM'15: Proceedings of the 2015 ACM Conference on Special Interest Group on Data Communication, August 17-21, 2015, London, UK. New York: ACM Press, 2015: 565-578.
- [43] Huang M F, Salemi M, Chen Y H, 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.
- [44] Wellbrock G A, Xia T J, Huang M F, et al. First field trial of sensing vehicle speed, density, and road conditions by using fiber carrying high speed data[C]//2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 3-7, 2019, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2019.
- [45] Catalano E, Coscetta A, Cerri E, et al. Automatic traffic monitoring by ϕ -OTDR data and Hough transform in a real-field environment[J]. Applied Optics, 2021, 60(13): 3579-3584.
- [46] Ding Z W, Zhang X P, Zou N M, et al. Phi-OTDR based on-line monitoring of overhead power transmission line[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(15): 5163-5169.
- [47] Sun J X, Zhang Z G, Li Y M, et al. Distributed transmission line ice-coating recognition system based on BOTDR temperature monitoring[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(12): 3967-3973.
- [48] Charlton D, Clarke S, Doucet D, et al. Field measurements of SOP transients in OPGW, with time and location correlation to lightning strikes[J]. Optics Express, 2017, 25(9): 9689-9696.
- [49] 王辰, 刘庆文, 陈典, 等. 基于分布式光纤声波传感的管道泄漏监测[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1006005.
- Wang C, Liu Q W, Chen D, et al. Monitoring pipeline leakage using fiber-optic distributed acoustic sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1006005.
- [50] Tejedor J, Martins H F, Piote D, et al. Toward prevention of pipeline integrity threats using a smart fiber-optic surveillance system[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(19): 4445-4453.
- [51] 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.
- [52] 张旭苹, 丁哲文, 洪瑞, 等. 相位敏感光时域反射分布式光纤传感技术[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0106004.
- Zhang X, Ding Z, Hong R, et al. Phase sensitive optical time-domain reflective distributed optical fiber sensing technology[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0106004.
- [53] 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.
- [54] Sun Q, Feng H, Yan X Y, et al. Recognition of a phase-sensitivity OTDR sensing system based on morphologic feature extraction[J]. Sensors, 2015, 15(7): 15179-15197.
- [55] Tejedor J, Macias-Guarasa J, Martins H F, et al. A novel fiber optic based surveillance system for prevention of pipeline integrity threats[J]. Sensors, 2017, 17(2): 355.
- [56] Lu Y L, Zhu T, Chen L, et al. Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR[J].

- Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(22): 3243-3249.
- [57] 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.
- [58] Hall A, Selker J S. High-resolution temperature modeling of stream reconstruction alternatives[J]. River Research and Applications, 2021, 37(7): 931-942.
- [59] 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.
- [60] Selker J S, Thévenaz L, Huwald H, et al. Distributed fiber-optic temperature sensing for hydrologic systems[J]. Water Resources Research, 2006, 42(12): 1-8.
- [61] Lindsey N J, Martin E R, Dreger D S, et al. Fiber-optic network observations of earthquake wavefields[J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(23): 11792-11799.
- [62] Jousset P, Reinsch T, Ryberg T, et al. Dynamic strain determination using fibre-optic cables allows imaging of seismological and structural features[J]. Nature Communications, 2018, 9: 2509.
- [63] Li Z F, Shen Z C, Yang Y, et al. Rapid response to the 2019 Ridgecrest earthquake with distributed acoustic sensing[J]. AGU Advances, 2021, 2(2): e2021AV000395.
- [64] 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.