

# 光学学报

## “分布式光纤传感”专题前言

分布式光纤传感器是一种可以发挥传感合一独特优势的光纤传感器。它利用光纤中的背向散射感知光纤/光缆周边的温度、应变、振动等各种被测量沿着光缆的分布信息。基于分布式光纤传感,一条光缆能够成为一条连续的传感器,可同时获取沿着长达数十 km 甚至上百 km 的光缆各个位置处的被测量信息。例如,一条 10 km 长的光缆,如果用 1 m 的采样间隔进行测量,就成为 1 万个传感器。这样一种神奇的技术,适用于各种长距离、大范围的分布式传感应用场景,包括电力电缆、油气管线、铁路轨道等“线型”基础设施和各种大型结构物的安全监测,以及边境线等各种要地的安全警戒,特别是可以利用各种“线型”基础设施所附设的通信光缆中尚未使用的“暗”光纤实现监测功能,甚至可以利用海底光缆实现地球物理探测和海洋活动监测。因此,分布式光纤传感受到学术界和工业界的高度重视,其发展方兴未艾。

分布式光纤传感器的工作原理包含两个方面:一方面是感知机制,另一方面是定位方法。在感知机制方面,分布式光纤传感器是利用光纤中的背向散射及其干涉的特性实现对各种被测量的传感,主要包括基于瑞利散射的分布式声波传感(DAS)、基于拉曼散射的分布式温度传感(DTS)和基于布里渊散射的分布式温度/应变传感(DTSS)。在定位方法方面,分布式光纤传感器是基于各种分布式光反射计的架构实现定位测量,主要包括光时域反射计(OTDR)、光频域反射计(OFDR)、光相干域反射计(OCDR)等。以上这些不同的感知机制和相应的信号解调方法,与各种定位方法进行相互组合,发展出了多种形式的分布式光纤传感器技术方案。其中,基于 OTDR 进行定位的技术方案最早被提出并最先获得实际应用,例如布里渊光时域反射计(BOTDR)成为最常见的 DTSS,相位敏感光时域反射计( $\Phi$ -OTDR)成为最典型的 DAS。

分布式光纤传感技术的进一步研究发展和推广应用,首先要提升传感性能以满足各种实际应用场景对于测量长度、空间分辨率、动态范围、测量精度等传感性能的要求。基于 OTDR 定位的常规分布式光纤传感器存在着空间分辨率与测量长度相互制约、空间分辨率与测量精度(即应变分辨率或温度分辨率)相互制约的问题,其本质是空间分辨率与系统信噪比的相互制约。OTDR 定位的空间分辨率取决于探测光脉冲的宽度,为了获得更高的空间分辨率,需要减小脉冲宽度;然而越窄的光脉冲携带的光能量越小,导致系统信噪比越低,由此劣化了测量精度,又由于光纤本身具有衰减,低信噪比进而导致了对测量长度的限制。为提升分布式光纤传感器的信噪比,特别是针对 DAS 的信噪比提升,各国研究工作者近年来提出了多种解决办法,这些方法可以分为两类。第一类方法通过采用各种具有增强散射/反射的特种光纤(如散射增强光纤、弱光栅阵列光纤、弱反射点阵列光纤等)来提高系统信噪比。在一定长度内,这种方法对于传感系统信噪比的提升很有效果。然而,由于光纤散射/反射的增强使得光纤衰减增加,以及由于特种光纤相对于普通单模光纤而言价格十分昂贵,这种方法主要适用于较短距离并且需要专门新设传感光缆的应用场景,而不适用于要求采用既设通信光缆实现传感的应用场景。另一类方法

是通过调制解调方案的创新来提高系统信噪比,例如采用啁啾光脉冲和匹配滤波的脉冲压缩方案以及采用光脉冲编码的脉冲压缩方案,都大幅提高了系统信噪比,成功解耦了空间分辨率和测量长度之间的相互制约。对于采用相位解调的 DAS,其信噪比还受到相干衰落现象的严重影响。为解决这个痛点,研究人员发明了旋转矢量求和(RVS)算法,该算法可通过频率分集、空间分集甚至模式分集等检测方案加以实施,可将 DAS 的噪声基底水平降低近 20 dB,即测量精度提高近 20 dB(即提高近百倍),被国内外各研究团队广泛采用。在这些重要进展中,我国研究工作者做出了重要的贡献,引领着相关领域国际前沿的发展,可喜可贺。

分布式光纤传感技术的进一步研究发展和推广应用,还特别需要对各个应用领域开展深入的、有针对性的系统平台技术研究,包括被测量信号的提取、环境扰动的滤除、被测量的模式识别等。在这方面,机器学习方法提供了一个基础框架,具有开发实现高性能被测量模式识别的巨大潜力,也吸引了各国研究工作者投入其中。

对于分布式光纤传感技术的进一步研究发展和推广应用,具有高优先度的研究课题方向还包括标准化和集成化。目前,对于分布式光纤传感器,从性能参数的定义、测量方法,到行业应用实施规范,各种标准都基本处于缺位状态,不利于其在各行业的推广应用。针对这种状况,我国学术团体和标准组织正在筹划启动相应的编制工作。在集成化方面,分布式光纤传感器的模块甚至设备的集成化,对于分布式光纤传感技术在各行业的应用普及将起到巨大的推动作用,例如近期我国科研人员发表的硅基光子集成 DAS 芯片和硅基光子集成 DAS 电光调制器芯片,引发了国内外同行的高度关注。

为了使广大读者和相关领域从业人员能够更加深入地了解分布式光纤传感技术及其最新进展,推动其进一步研究发展和应用普及,《光学学报》编辑部特别邀请了国内分布式光纤传感技术领域的数十位专家,结合近年来该研究领域的代表性研究成果撰写了最新研究综述及研究论文,精心组织了“分布式光纤传感”专题。本专题共出版特邀论文 22 篇,包含 15 篇特邀综述及 7 篇特邀研究论文,内容涵盖了 DAS、DTSS、DTS 等分布式光纤传感的各个方面,介绍了包括传感机制、解调方法、定位方案、信号处理、传感光纤和器件等方面的最新进展,并提供了分布式光纤传感在资源勘探、电力、水听、地震等领域的应用研究案例。相信本专题能给学术界和产业界相关领域广大读者以有益参考,促进相互之间的合作与交流。

张旭苹,何祖源,饶云江

2024-01-01