

## 激光与光电子学进展

## 分布式光纤传感技术在禁核试核查中的应用前景

刘哲函<sup>1,2</sup>, 曾志<sup>1\*</sup>, 王晓明<sup>2</sup>, 李健<sup>2</sup>, 南德<sup>2</sup>, 刘泽玉<sup>2</sup><sup>1</sup>清华大学工程物理系, 北京 100084;<sup>2</sup>禁核试北京国家数据中心, 北京 100085

**摘要** 地震、次声和水声是《全面禁止核试验条约》(CTBT)规定的3种远距离波形监测技术手段,目前CTBT国际监测系统(IMS)的地震、次声、水声监测台站基本采用传统的电学传感设备。分布式光纤传感技术是一种新型的传感技术,仅利用单根光纤的光学效应即可获得沿线各点处的振动或应变,在禁核试核查监测领域展现出广泛的应用前景。分布式光纤传感技术的原理及发展现状表明,分布式光纤传感技术在地震、次声、水声监测方面可直接应用于探测系统获取振动信息,还可应用于现有光纤通信设施获取信息作为监测数据的补充。基于分布式光纤传感技术的探测系统具备的分布式测量、灵敏度高、稳定性好等特点,为地震、次声、水声等探测设备的改进提供了新思路;但分布式光纤传感系统通道密集、采样率高、数据量大的特点,对监测数据的实时处理提出了新的挑战。此外,分布式光纤传感技术的应用对IMS监测能力所带来的影响还需进一步的研究和评估。

**关键词** 分布式光纤传感; 地震监测; 次声监测; 水声监测

中图分类号 O439 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222420

## Application Prospects of Distributed Optical Fiber Sensing Technique in Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty

Liu Zhehan<sup>1,2</sup>, Zeng Zhi<sup>1\*</sup>, Wang Xiaoming<sup>2</sup>, Li Jian<sup>2</sup>, Nan De<sup>2</sup>, Liu Zeyu<sup>2</sup><sup>1</sup>Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;<sup>2</sup>CTBT Beijing National Data Centre, Beijing 100085, China

**Abstract** Seismic, infrasonic, and hydroacoustic monitorings are three types of remote waveform monitoring techniques stipulated in the Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty (CTBT). Currently, the seismic, infrasonic, and hydroacoustic stations of the CTBT International Monitoring System (IMS) have traditional electrical sensing equipments. The distributed optical fiber-sensing technique is a new sensing method for determining variations in the vibration and strain at each point along the optic fiber based on the optical effect, and it has broad application prospects in the CTBT. The principle and development of the distributed fiber-sensing technique show that it can be directly applied to the detection system for obtaining vibration data during seismic, infrasonic, and hydroacoustic monitorings and applied to existing optical fiber communication facilities for obtaining supplementary information to the monitoring data. The detection system based on the distributed fiber-sensing technique exhibits distributed measurement, high sensitivity, and good stability. This study provides a new approach to improving seismic, infrasonic, hydroacoustic, and other detection equipments. However, the characteristics of the distributed optical fiber-sensing system, such as highly dense channels, high sampling rate, and a large amount of data, pose new challenges to the real-time processing of monitoring data. In addition, the impact of the distributed fiber-sensing technique on IMS monitoring capability should be further investigated.

**Key words** distributed optical fiber sensing; seismic monitoring; infrasonic monitoring; hydroacoustic monitoring

## 1 引言

《全面禁止核试验条约》(CTBT)的宗旨和目标是  
通过禁止一切形式的核武器试验爆炸和其他核爆炸,

防止核武器扩散、促进核裁军、增进国际和平与安全<sup>[1]</sup>。1996年9月24日,CTBT在联合国总部开放供  
签署,我国是最早签署该条约的国家之一,截至目前已  
有186个国家签署条约。CTBT是一个技术性很强的

收稿日期: 2022-08-30; 修回日期: 2022-10-02; 录用日期: 2022-10-07; 网络首发日期: 2022-11-21

通信作者: \*zengzhi@tsinghua.edu.cn

条约,条约所构建的最主要的机制就是对核试验爆炸的核查机制,其建立的国际监测系统(International monitoring system, IMS)由分布全球的监测台站、实验室以及通信基础设施组成。IMS 监测台站是构成 CTBT 条约组织禁核试核查能力的基础,这些台站数据同时还共享给各签约国,是各签约国禁核试核查监测数据的主要来源。目前 IMS 监测台站采用的都是传统的电学传感器,已使用二十多年,运行维护成本高,存在传感器设备更新的需求。

随着光纤传感技术的发展,光纤的用途由传输单元拓展到感知单元。利用一根传感光纤可同时实现数万个传感点的测量,完美地融合了光纤传输与感知两种角色,在桥梁铁路等大型基础设施的健康监测、石油管道周界等重要地区的入侵检测、陆地海洋等广阔区域的声波数据采集等应用中获得了广泛应用<sup>[2]</sup>。

本文主要介绍了基于相位敏感型光时域反射(Phase sensitive optical time-domain reflectometry,  $\Phi$ -OTDR)的分布式光纤传感技术原理和基于瑞利散射的分布式光纤传感系统的空间分辨率和灵敏度的计算方法,阐述了 IMS 的地震、次声、水声监测台站的组成和设备类型以及分布式光纤传感技术在地震、次声、水声的应用情况,认为分布式光纤传感技术在 IMS 台站设备升级改造中有一定的应用前景,有可能带来 CTBT 组织及各国禁核试核查能力的变化,需要引起关注。

## 2 分布式光纤传感技术原理

光纤一般以二氧化硅为主要原料,良好的绝缘性、化学稳定性、抗电磁干扰能力使其可用于潮湿、腐蚀、强电磁干扰等各类极端环境条件,质量轻、体积小、纤细柔软等特点使其可用于绕制、内嵌、敷设等各类安装条件,传输速度快、损耗小等特点使其可用于远距离的实时传输。分布式光纤传感技术将光纤既作为传输介质又作为传感体,外界物理量变化直接或间接地改变光纤中光波的振幅、相位、频率、偏振态或波长等参量,通过测量这些参量的变化可实现对光纤任意位置的应力、温度、振动等外界物理量的连续分布式测量<sup>[3]</sup>。

按照测量信息的空间连续性,分布式光纤传感技术可以主要分为准分布式和全分布式两类,准分布式通过在指定位置预置光学装置实现对光纤指定位置的传感,全分布式可以利用整条光纤的任意位置传感。

### 2.1 准分布式传感技术

典型的准分布式传感技术是通过光纤将多个传感单元串接起来,传感单元可分为两种,一种是传感单元独立于传输光纤,通过光纤连接的方式实现多点测量,但连接损耗大、制备难度高导致该种传感单元组网容量较小;另一种是利用光纤的光敏特性,通过紫外曝光技术,在光纤上直接制备传感单元,实现单点插入损耗的降低和规模化制备,以提升光纤集成传感点数目。

常用的准分布式光纤传感单元有光纤布拉格光栅(FBG)和法布里-珀罗干涉腔。同其他光纤传感技术相比,FBG 传感器能够检测温度、应力、应变、位移、加速度等诸多参量信息,且传感信号强、精度高、响应快,不受光源波动和链路损耗变化的影响,抗干扰能力强;通过合理地设计与封装,单个传感器可达到很强的环境耐受能力,同时具有组网复用、方式灵活多样的特点<sup>[4]</sup>。

### 2.2 全分布式传感技术

全分布式传感技术通过测量光纤中的后向散射光参数实现对光纤任意位置参量变化的测量。光在光纤中传导会产生瑞利散射、布里渊散射、拉曼散射等不同散射效应的后向散射光,在入射光波长为  $1.55 \mu\text{m}$  的普通单模光纤中,后向瑞利散射光波长与入射光相同,后向布里渊散射光波长偏移为  $90 \text{ pm}$  左右,后向拉曼散射光波长偏移为  $100 \text{ nm}$  左右,不同的后向散射光信号在频谱上分布如图 1 所示。瑞利散射是光纤中微观折射率不均匀发生的弹性散射,通过测量后向瑞利散射光信号的偏振、强度、相位等的变化可以实现分布式的振动、应变测量;布里渊散射由光纤中声学声子与光子能量交换产生,通过测量光纤上布里渊频移的分布可以实现分布式温度、应力测量;拉曼散射由光纤分子的热振动与光子能量交换产生,通过测量光纤上拉曼散射光强的波动和频率的偏移可以实现对光纤的分布式温度测量<sup>[5]</sup>。在 3 种后向散射效应中,后向瑞利散射光的能量占全部后向散射光能量的 97% 以上,与另外 2 种散射效应相比,瑞利散射光的信噪比最高,弹性散射的属性使其可与入射光进行相干处理提取参数,基于瑞利散射的全分布式光纤传感技术的应用较为普遍。

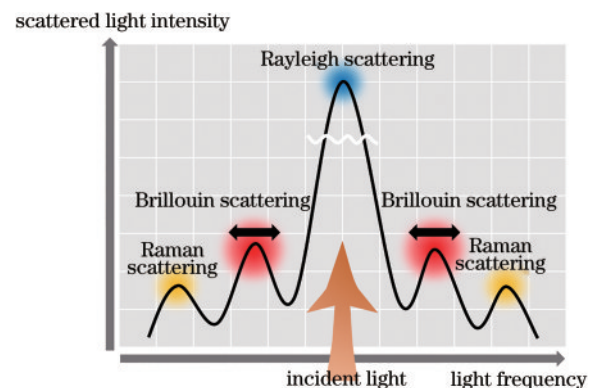


图 1 光纤中的后向散射光谱示意图

Fig. 1 Schematic of backscattering spectra in optical fiber

### 2.3 基于 $\Phi$ -OTDR 的瑞利散射全分布式光纤传感

光纤在拉制过程中会产生热扰动,引起折射率的微观不均匀,微观不均匀结构的尺寸远小于入射光波长(一般小于  $\lambda/10$ )。入射光在光纤中传播时,各个方向都会有瑞利散射光,瑞利散射强度与波长的四次方成反比( $I=k\lambda^{-4}$ ),小部分的散射光向后向传播,形成后

向瑞利散射光。

当外界振动、声波等作用于光纤时,由于机械应力作用及弹光效应,光纤的长度和折射率都将产生微小变化,进而使瑞利散射光的相位发生变化,根据相位变化与外界振动的线性关系可以量化计算振动、应变等参数。

#### 1) 分布式光纤传感空间分辨率计算

通过后向瑞利散射光到达入射端与脉冲光入射的时间差  $\Delta t$  可以计算得到后向瑞利散射点位置  $d$ :

$$d = (c\Delta t)/2n, \quad (1)$$

式中:  $c$  为光速;  $n$  为光纤折射率。

空间分辨率是指能分辨的 2 个相邻时间点间的最短距离:

$$\Delta d = (cT)/2n, \quad (2)$$

式中:  $T$  为入射脉冲光的脉冲宽度(时间长度)。由式(2)可知,分布式光纤传感的空间分辨率由入射光脉冲宽度和光纤折射率决定。

#### 2) 分布式光纤传感灵敏度计算

振动信号作用于光纤时,机械应力的应变效应带来光纤轴向长度发生变化,引起光波相位发生的变化  $\Delta\varphi_1$  为

$$\Delta\varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L, \quad (3)$$

式中:  $\Delta L$  为光纤长度变化;  $\lambda$  为入射光波长。

机械应力使光纤长度发生变化的同时,力的作用还会产生弹光效应使光纤的折射率发生变化,折射率的变化带来光波相位的变化  $\Delta\varphi_2$  为

$$\Delta\varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ -\frac{1}{2} n^3 [(P_{11} + P_{12})\epsilon_1 + P_{12}\epsilon_3] \right\} L, \quad (4)$$

式中:  $P_{11}$ 、 $P_{12}$  为光纤光弹系数;  $\epsilon_1$  为光纤的横向应变系数;  $\epsilon_3$  为光纤的纵向应变系数;  $L$  为作用于光纤的长度,且有  $\epsilon_3 = \Delta L/L$ 。

由应变效应和弹光效应产生光波相位总变化为

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} (L + P_{12}L)\epsilon_3 - \frac{\pi}{\lambda} n^3 (P_{11} + P_{12}) \cdot \left[ \frac{\pi}{\lambda} n^3 (P_{11} + P_{12}) L (1 - \mu) / E - \frac{4\pi}{\lambda} \mu L (1 + P_{12}) / E \right] \cdot p, \quad (5)$$

式中:  $\mu$  为光纤材料的泊松系数;  $E$  为光纤材料的杨氏模量;  $p$  为垂直于光传播方向的应力。

分布式光纤传感灵敏度  $S$  定义为单位应力作用于单位长度光纤时产生的相位变化:

$$S = \frac{\Delta\varphi}{pL} = \frac{\pi}{\lambda} n^3 (P_{11} + P_{12}) (1 - \mu) / E - \frac{4\pi}{\lambda} \mu (1 + P_{12}) / E. \quad (6)$$

常用的普通光纤,光纤折射率  $n$  为 1.45,等效杨氏模量  $E$  为 19.04 GPa,等效泊松比  $\mu$  为 0.3412,  $P_{11}$  为 0.121,  $P_{12}$  为 0.270,当  $\lambda$  为 1.55  $\mu\text{m}$  时,其理论灵敏度

约为  $10^{-4} \text{ rad}/(\text{Pa}\cdot\text{m})$ <sup>[5]</sup>。由理论计算公式可知,分布式光纤传感的灵敏度由光纤的材料特性参数和入射光的波长决定,其反映的是后向瑞利散射光的相位与散射位置所受应力间的线性关系,后向瑞利散射光的相位分辨率由分布式光纤传感系统的相位解调性能决定。

在通过相位解调光纤应变进而实现对待测振动事件的波形重构过程中,由于待测声振信号被调制成为光学相位,解调的相位信息通常缠绕在  $[-\pi, \pi]$  之间,通常只有在相邻轨迹之间的相位变化绝对值小于  $\pi$  时使用相位展开算法才有效。天津大学马喆等<sup>[6]</sup>提出一种基于线性调频(LFM)脉冲边带调制的光纤分布式传感动态应变范围扩展方法,兼顾测量灵敏度和动态范围,充分利用高带宽的调制器同时产生调频带宽递增的 LFM 脉冲系列边带,进而实现对不同动态范围事件的同时测量,为分布式光纤传感系统提供一种可靠的动态范围提升方案。

### 3 基于 $\Phi$ -OTDR 的分布式光纤传感技术在 IMS 的应用前景

IMS 监测台网由用于地下核试验监测的 170 个地震台站、用于水下核试验监测的 11 个水声台站、用于大气层核试验监测的 60 个次声台站等监测台站组成。地震台站使用记录地面运动的地震计,将地面振动转换为电压信号;水声台站使用记录水下声波的水听器,将水声压强转换为电压信号;次声台站使用记录空气中次声波的微气压计,将声压转换为电压信号。

#### 3.1 在地震监测中的应用

IMS 地震台站分为台阵和三分向地震台站两种类型,地震台阵由多个垂直向地震计和至少 1 个三分向地震计按照标准形状布设组成,三分向地震台站由 1 个三分向地震计组成,三分向地震计从垂直向、南北向、东西向等 3 个正交方向记录地面运动<sup>[7]</sup>。与地震计测量质点的速度或加速度不同,分布式光纤传感测量光纤沿线的动态应变或应变率。美国加州大学伯克利分校和劳伦斯伯克利国家实验室 Lindsey 等<sup>[8]</sup>在地震的光纤观测研究中认为分布式光纤传感技术是一种新的地震记录方法,并介绍了光纤在地震波观测中的应用情况:位于阿拉斯加州费尔班克斯的一段光纤,其记录的地面运动波形叠加后与同址的传统地震计记录在 0.8~1.6 Hz 频带上的波形有高度的相关性,如图 2 所示;位于北加利福尼亚州的分布式光纤传感阵列记录到了一次地震信号,并通过聚束算法计算出地震波的后方位角和慢度;位于斯坦福大学电信管道中的光纤记录到了一次 2000 多 km 以外的远震信号,利用长度为 7.14 m 的光纤进行测量,记录了此次远震事件的 P 波、S 波。

德国地学研究中心 Jousset 等<sup>[9]</sup>在冰岛西南部沿 15 km 长的通信光纤以 4 m 的空间采样率记录了天然

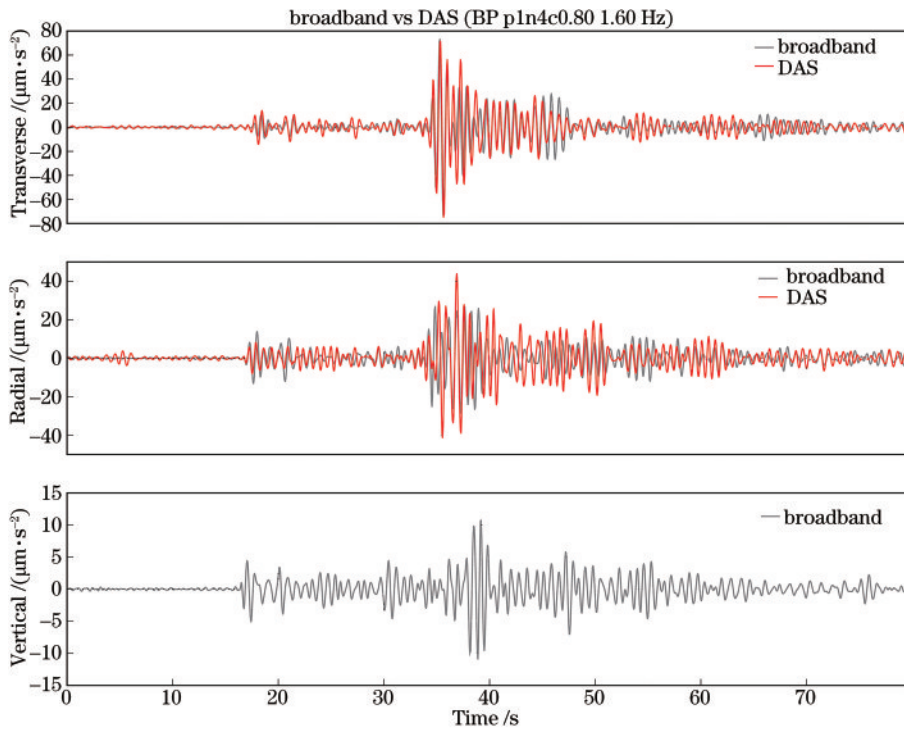


图 2 同址的宽频带地震计与分布式光纤传感波形对比

Fig. 2 Comparison of co-site broadband seismometer and distributed fiber sensing waveforms

地震和人工地震,以前所未有的分辨率识别出正常断层和火山岩脉等构造特征从而推断断层动态过程,通过与传统地震计的比较验证了分布式光纤传感在 0.1~100 Hz 带宽之间的频谱振幅响应,并建议将世界各地的光纤通信网络作为地震计应用于地震监测和地质勘探。

美国加州理工学院地震实验室 Li 等<sup>[10]</sup>将用于微弱地震检测的模板匹配方法应用到内华达 Poro Tomo 项目的分布式光纤传感数据处理中,分布式光纤传感数据去除平均值后的 1~15 Hz 带通滤波波形如图 3 所示。在两周的分布式光纤传感数据中检测到 116 个事件,其中 68 个事件远低于噪声水平,验证了分布式光纤传感和模板匹配相结合具有检测噪声水平以下微震

活动的能力。

虽然近年来分布式光纤传感技术在地震监测领域的应用取得了一定进展,但分布式光纤传感测量系统还存在自噪声高、幅值与相位的转换不准确等问题,而且过高的光源功率会在探测端光相位调制时产生非线性现象导致较高的系统噪声,影响探测的信噪比,目前分布式光纤传感的长度都在 100 km 以内。此外,与传统地震计相比,单根光纤无法测量三分向的振动。

### 3.2 在水声监测中的应用

IMS 水声台站的核心设备为水听器,水听器是被动声呐中的传感单元,使用水声换能器将声能转换为电能,一般采用陶瓷元件的压敏检波器,将伸缩应变转化为电场/磁场激励实现换能<sup>[11]</sup>。分布式光纤传感使用一根光纤实现水声信号的提取,具有结构简单、成本低、可靠性好、空间可连续提取等优势。

光纤的声压灵敏度约为  $-200$  dB/m (re rad/ $\mu$ Pa),无法满足微弱水声信号探测对等效噪声声压的要求,通常将传感光纤缠绕至增敏结构以提升光纤的声压灵敏度<sup>[12]</sup>。增敏方式有分立式和连续式两种:分立式增敏是将传感光纤依次缠绕在多个增敏结构上并进行串联,在光学上空间连续但在声学上空间分立;连续式增敏是将传感光纤连续缠绕至一定长度的增敏结构上,实现对水声信号的高灵敏度和空间连续采集。

基于瑞利散射的分布式光纤传感系统中随机产生的衰落噪声是影响传感探测稳定性的主要因素,利用衰落噪声与光模式的相关性可以有效抑制衰落噪声对信号探测的影响。

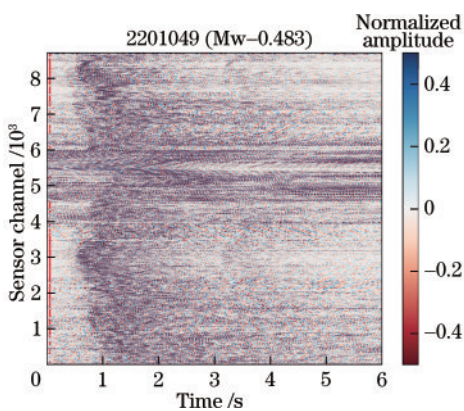


图 3 去均值的分布式光纤传感数据波形(1~15 Hz 带通滤波)  
Fig. 3 Distributed fiber sensing waveforms with mean removed (band pass filtered with 1-15 Hz)

上海交通大学 Chen 等<sup>[13]</sup>提出了一种基于时间门控数字光频域反射计 (Time-gated digital optical frequency domain reflectometry, TGD-OFDR) 的无衰落噪声分布式光纤振动传感方案,引入了内脉冲分频方法和旋转矢量和方法消除了由衰落噪声引起的相位误差,提高了信噪比,实现了长度为 35 km 的被测光纤上两个同时发生的振动的精确定位,信噪比超过 26 dB,振动响应带宽高达 1.25 kHz,空间分辨率接近 5 m,有很好的应用前景。

国防科技大学 Lu 等<sup>[14]</sup>针对分布式振动测量中噪声衰减的问题,提出了一种基于  $\Phi$ -OTDR 的多波长算法,利用相位载波 (Phase-generated carrier, PGC) 算法从干涉信号强度中提取瑞利后向散射光的相位变化。三波长的  $\Phi$ -OTDR 比单波长的  $\Phi$ -OTDR 在 100 m 的传感光纤上衰落信道数量减少了 10 个,且三波长的  $\Phi$ -OTDR 的相位解调过程与单波长的  $\Phi$ -OTDR 相同,没有增加额外的信号后处理工作量,为  $\Phi$ -OTDR 提供了一种沿着整个光纤进行低相位噪声实时分布式振动的传感方法。

中国科学院上海光学精密机械研究所顾金凤等<sup>[15]</sup>提出了多芯光纤分布式声传感方案,克服了单模分布式光纤传感系统性能的限制,有效地抑制了信号衰落,实现了更可靠的外界扰动信号的重构,为实现更高信噪比的分布式光纤传感系统提供了新思路。

凭借高可靠性和空间连续拾取水下声信号的优势,分布式光纤传感技术在水声监测领域的研究和应用将越来越广泛。

### 3.3 在次声监测中的应用

IMS 次声台站是由 4~8 个次声探测阵元组成的次声阵列,每个阵元有一个高灵敏度微气压计作为次声传感器<sup>[16]</sup>。目前应用较为广泛的次声传感器是电子

式的传声器,按传感器工作方式主要分为电容式、电动式、压电式和驻极体式等类型<sup>[17]</sup>,工作原理基本都是通过传感膜片将声能转换为电学信号。电学次声传感器是有源的,不能在强磁场、易燃易爆等特殊环境中应用,次声传感器弱电信号特点决定了其难以进行远距离传输,换能膜片的材料导致其难以应用于潮湿、腐蚀等恶劣环境。光纤由于其材料的特性,可较好地解决上述问题,基于光纤的声压传感器是近年来研究的热点。

与将光纤置于地下和水中检测地震和水声信号不同,次声在空气中的振动以微气压波动形式传播,将光纤直接置于空气中难以通过光纤形变或振动来检测微气压扰动,一般需要借助膜片、腔体、光栅等增敏结构,通过敷设、绕制、干涉等增敏技术实现对微气压扰动的检测。基于光纤的声压传感器主要分为强度调制型和干涉型两大类:强度调制型的工作原理为将传统的传感膜片替换为光反射膜,光反射膜发生形变时改变反射光的强度;干涉型的工作原理为传感膜片发生形变时干涉腔长度的改变引起干涉条纹的变化。因此,分布式光纤传感技术在次声监测中的应用只能是点式传感模式,通过光纤将多个次声传感单元串接,实现多个次声探测阵元的组阵,提升对次声信号的探测能力。

### 3.4 小结

CTBT 议定对 IMS 的地震台站、水声台站、次声台站提出符合作业手册规定的技术要求,台站作业手册由各缔约国代表组成的 CTBT 筹备委员会核查工作组 (B 组) 决定, B 组每年举行两次会议,对台站作业手册进行讨论和更新,目前一致达成的对地震、水声、次声台站传感器关键技术指标的最低要求,如表 1 所示。

表 1 传感器关键技术指标的最低要求

Table 1 Minimum requirements for key technical indicators of sensors

Characteristics	Minimum Requirement		
	Seismometer	Hydrophone	Microbarometer
Passband /Hz	0.02-16	1-100	0.02-4
Sensor noise	At least 10 dB below minimum earth noise at the site over the passband	At least 10 dB below Urick's deep ocean low noise curve	At least 18 dB below minimum acoustic noise (Minimum noise level at 1 Hz: ~5 mPa)
Sampling rate	$\geq 40$ samples per second	$\geq 240$ samples per second	$\geq 10$ samples per second
Resolution/ Sensitivity	18 dB below the minimum local seismic noise	$\leq 60$ dB per $\mu\text{Pa}$ (1 Hz band); $\leq 81$ dB per $\mu\text{Pa}$ (wideband)	$\geq 1$ count per 1 mPa
Dynamic range /dB	$\geq 120$	$\geq 120$	$\geq 108$

根据表 1 中 IMS 作业手册对台站关键技术指标要求,结合目前先进的分布式光纤传感设备(以英国 Silixa 公司最新发布的 iDAS<sup>TM</sup> 设备为例,如图 4 所示)的技术指标进行对比分析。

1) 信号通带: iDAS<sup>TM</sup> 设备的频率响应范围为

0.001 Hz~50 kHz,可以满足 IMS 作业手册中对各类台站传感器的通带指标要求。

2) 传感器噪声: iDAS<sup>TM</sup> 设备的自噪声指标为  $2 \mu\text{e}/\sqrt{\text{Hz}}@1 \text{ kHz}$ ,与 IMS 作业手册中要求的台站与环境本底噪声比较的指标单位不一致,无法直接比较;

Measurement Technology	Phase coherent distributed acoustic sensor with linear amplitude and phase response	Weight	24 kg
Optical architecture	Balanced interferometric phase detection to achieve the ultimate shot-noise performance down to pico-metre resolution	In-built Triggering	PXI Trigger Input, SMB Jack
Finest Sampling Resolution	0.25 m	In-built synchronization	GPS Antenna Input SMB Synchronisation Clock Output SMB
Sampling Frequency [1]	1 kHz – 100 kHz	External connectors	Ethernet: 2 x Gigabit Ethernet Port, RJ45; 2 x 10Gb SFP+ Port
Finest Spatial Resolution [2]	1 m		USB: 4 x Type-A USB 2.0 Port; 2 x USB 3.0 Port
Frequency Range	0.001 Hz to 50 kHz		Display 2 x DisplayPort
Self-noise (Noise floor) @ 1 kHz [pe per sqrt Hz]	2 pe per sqrt Hz @ 1 kHz		Data: 2 x PCIe x4 Cable Port
Dynamic Range @ 10 Hz [dB power]	>100 dB @ 10 Hz		GPIO Port, Micro D-Sub 25P
Interrogation range	up to 50 km		COM Port, D-sub9 serial
Gauge length	10 m gauge length optimised for seismic applications. Other gauge length available 3 m		LAN PTP (RJ45)
Fibre Compatibility	Standard single mode fibre (Multimode fibre can also be used but may have a worse performance)		Power Inlet IEC 60320-1 C20, use with IEC 60320-1 C19 power outlet
Physical dimensions	Rack mounted, 178 mm×444 mm×518 mm (H×W×D)		Fibre: E2000/APC
			Max data capacity
		Laser Product Category	Class 1
		Compliance	CE/UKCA/FCC

图 4 英国 Silixa 公司 iDAS™ 设备技术指标  
Fig. 4 Specifications of iDAS™ from Silixa in UK

与传统的传感器尤其是电学传感器电子线路中的元器件或放大电路等所引入的传感器噪声相比,分布式光纤传感用作传感器的光纤可以认为基本没有传感器噪声。

3) 采样率: iDAS™ 设备的采样频率为 1~100 kHz, 其上限由传感光纤的长度决定, 一般的经验换算结果是长度为 10 km 的光纤最高采样频率为 10 kHz, 长度为 5 km 的光纤可以达到 20 kHz, 其采样频率的下限也已远超 IMS 作业手册中对各类台站传感器的采样率指标要求。

4) 分辨率/灵敏度: iDAS™ 设备的相关指标为 1 m 的空间分辨率, 是指最好的情况下可以在 1 m 的光纤传感长度条件下实现信号源的检测; 根据前文普通光纤理论灵敏度约为  $10^{-4}$  rad/(Pa·m) 的估算结果, 带入光纤传感长度后约为  $10^{-4}$  rad/Pa, 最终的分辨率指标还取决于设备的相位分辨率。此外, IMS 作业手册中对不同类型台站的分辨率/灵敏度指标形式也不尽相同, 无法给出对比结论。

5) 动态范围: iDAS™ 设备的动态范围指标为 >100 dB@10 Hz, 低于 IMS 作业手册中的动态范围指标要求, 且 iDAS™ 设备的指标为指定频点的动态范围指标。

通过对比分析可知, IMS 作业手册对台站关键技术指标的最低要求并不高, 目前的分布式光纤传感设备在信号通带指标、采样率指标方面远超车手册要求, 在传感器噪声指标方面可以认为满足手册要求, 在分辨率指标方面需要结合设备的相位分辨率指标确定, 在动态范围指标方面略低于手册要求。总体来看, 基于分布式光纤传感技术的设备大体上可以满足 IMS 不同类型台站的关键技术指标要求, 随着分布式光纤传感技术的不断进步, 其在 IMS 台站的升级换代中有广

阔的应用前景。

## 4 结 论

IMS 监测设施运行已二十多年, 部分设备老化、技术落后, 有强烈的升级换代的需求。分布式光纤传感技术具有低成本、高灵敏度、抗干扰性强、实时性好以及泛在特性等优势, 在 CTBT 国际监测系统地震、次声、水声台站设备升级改造中有良好的应用前景, 但分布式光纤传感系统目前还存在系统噪声高、频率幅值响应曲线缺失等问题, 全分布式传感的通道位置还难以准确定位, 实际测量中光纤的弯曲对振动的响应效率还有待标定。

此外, 信息设施基建的发展和光纤的普及, 拓展了传感数据的来源, 特别是海底通信光缆等给各国禁核试核查能力带来的影响也需要充分评估。分布式光纤传感数据的通道密集、数据量大、信号微弱、多因素作用等特点, 对分布式光纤传感数据的处理和分析也带来了技术挑战。

## 参 考 文 献

- [1] 司政亚, 苏珊, 刘森. 全面禁止核试验条约组织 (CTBTO) 筹备委员会核查工作组 (B 组) 会议相关的技术名词解释[J]. 震灾防御技术, 2018, 13(2): 480-492.  
Si Z Y, Su S, Liu S. Explanation of technical terms related to the extraordinary session of working group B for CTBTO[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2018, 13(2): 480-492.
- [2] 艾凡. 基于离散增强光纤的分布式传感关键技术与应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.  
Ai F. Research on key technologies and applications of distributed sensing based on discrete enhanced fiber[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.

- [3] 郑百超, 王学锋, 薛渊泽, 等. 光纤传感技术的发展趋势[C]//第四届航天电子战略研究论坛论文集(新型惯性器件专刊). 北京: 航天电子发展战略研究中心, 2018: 93-100.  
Zheng B C, Wang X F, Xue Y Z, et al. The development trend of the optical fiber sensing technology [C]//Proceedings of the 4th Aerospace Electronics Strategic Research Forum (Special Issue on New Inertial Devices). Beijing: Aerospace Electronics Development Strategy Research Center, 2018: 93-100.
- [4] 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.
- [5] 蒋鹏. 基于瑞利散射的分布式光纤振动传感技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.  
Jiang P. Research on distributed optical fiber vibration sensor based on Rayleigh backscattering light[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.
- [6] 马喆, 王逸璇, 江俊峰, 等. 光纤分布式声传感的动态范围扩展方法研究[J]. 光学学报, 2021, 41(13): 1306008.  
Ma Z, Wang Y X, Jiang J F, et al. Research on dynamic range expansion method of fiber-optic distributed acoustic sensing[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(13): 1306008.
- [7] 叶青, 钟卫星. 国际监测系统(IMS)地震台站技术系统[J]. 国际地震动态, 2016, 46(11): 28-34.  
Ye Q, Zhong W X. Technical system of IMS network[J]. Recent Developments in World Seismology, 2016, 46(11): 28-34.
- [8] 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): 792-799.
- [9] 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.
- [10] Li Z F, Zhan Z W. Pushing the limit of earthquake detection with distributed acoustic sensing and template matching: a case study at the Brady geothermal field[J]. Geophysical Journal International, 2018, 215(3): 1583-1593.
- [11] 王燕, 李健, 王晓明, 等. CTBT 国际监测系统水声监测网络概况[J]. 地震地磁观测与研究, 2020, 41(6): 120-131.  
Wang Y, Li J, Wang X M, et al. An overview of the hydroacoustic network of IMS for CTBT[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2020, 41(6): 120-131.
- [12] 孟洲, 陈伟, 王建飞, 等. 光纤水听器技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(13): 1306009.  
Meng Z, Chen W, Wang J F, et al. Research progress of fiber optic hydrophone technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(13): 1306009.
- [13] Chen D, Liu Q W, He Z Y. Phase-detection distributed fiber-optic vibration sensor without fading-noise based on time-gated digital OFDR[J]. Optics Express, 2017, 25(7): 8315-8325.
- [14] Lu Y, Zhang X L, Liang C L, et al. Fading noise reduction in distributed vibration measurements utilizing multi-wavelength based  $\Phi$ -OTDR[C]//26th International Conference on Optical Fiber Sensors, September 24-28, 2018, Lausanne, Switzerland. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2018: TuE21.
- [15] 顾金凤, 卢斌, 杨竣淇, 等. 多芯光纤分布式声传感[J]. 光学学报, 2021, 41(7): 0706003.  
Gu J F, Lu B, Yang J Q, et al. Distributed acoustic sensing based on multi-core fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(7): 0706003.
- [16] 林源根, 姜猛, 王晓航, 等. 次声监测在 CTBT 核查中的应用[C]//国家安全地球物理丛书(七): 地球物理与核探测. 西安: 西安地图出版社, 2011: 96-103.  
Lin Y G, Jiang M, Wang X H, et al. Infrasound monitoring technique and its applications in CTBT verification[M]//National security geophysics series (7): geophysics and nuclear detection. Xi'an: Xi'an Map Press, 2011: 96-103.
- [17] 刘理. 基于光纤干涉仪的低频声波传感技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.  
Liu L. Research of fiber-optic interferometer based low-frequency acoustic sensing technology[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.