

文章编号: 1005-5630(2023)02-0083-12

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2023.002.011

边海防振动光缆报警线路技术综述

吴志宏¹, 李光伟¹, 邢姗姗¹, 杨沓霖², 张 辉¹, 王志佳¹, 王 超²

(1. 93209 部队, 北京 100085;

2. 复旦大学 材料科学系, 上海 200433)

摘要: 边海防安全是国家安全的重要组成部分, 分布式/准分布式振动光缆报警技术具有长距离、实时报警能力, 可为我国漫长的陆地边境线与海岸线实时入侵检测与报警提供重要技术支撑。分析了散射型、干涉型、光纤光栅型以及多技术复合型振动光缆报警技术的原理、特点及缺陷, 介绍了以上技术在边海防报警线路系统中的具体应用场景及敷设方式, 展望了振动光缆技术在边海防应用前景和发展方向。

关键词: 边海防; 振动光缆; 报警线路

中图分类号: O 439 **文献标志码:** A

Review of vibration optic-cable alarm line technology for border and coastal defence

WU Zhihong¹, LI Guangwei¹, XING Shanshan¹, YANG Talin², ZHANG Hui¹,

WANG Zhijia¹, WANG Chao²

(1. 93209 Forces, Beijing 100085, China;

2. Department of Material Science, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Border and coastal defense is an important part of national security. The distributed or quasi-distributed optical fiber vibration alarm system with long-distance and real-time alarm capability can provide important technical support for real-time intrusion event detection and alarm of the long land border and coastline of PRC. This paper focuses on different types of optical fiber vibration alarm system, such as scattering, interference, fiber Bragg grating and combined types. The principle, characteristics and defects of these technologies are analyzed. As for the technologies mentioned above, their specific application scenario and installation methods are introduced. Finally, the application prospect and development direction of optical fiber vibration alarm system in border and coastal defense are proposed.

Keywords: border and coastal defence; cable vibration; alarm line

收稿日期: 2022-09-26

第一作者: 吴志宏 (1981—), 男, 助理研究员, 研究方向为边海防信息系统与智能感知技术。

E-mail: oneairforce@sina.com

通信作者: 李光伟 (1963—), 男, 正高级工程师, 研究方向为预警探测与信息系统。

E-mail: oneairforce@sina.com

引 言

我国边海防线漫长，边界周边形势复杂，监控管理难度大。为提高边海综合防卫管控能力，经过多年基础设施建设，我国边境沿海一线建设了一批以铁丝网、铁栅栏、拦阻桩为主的物理拦阻设施，并部分加装了振动传感光缆^[1]、脉冲电子围栏^[2]、张力电子围栏^[3]等防越报警装置，实现了对重要边境线和管控区域的物理隔离与防越报警。

振动光缆具有传感距离长、易于敷设、抗电磁干扰能力强、传感灵敏度高优点，被广泛应用于周界安防领域^[4]。本文对振动光缆报警线路技术的原理与特点进行归纳总结，并在此基础上对该技术的具体使用场景进行分析，为推进“智慧边海防”建设，构建边海防立体智能感知体系提供技术支持。

1 振动光缆传感技术

1.1 散射型振动光缆

散射型振动光缆传感技术的原理主要基于光纤中的瑞利散射现象。利用相关原理制作的光时域反射仪(OTDR)^[5-7]和光频域反射仪(OFDR)^[8-13]可用于实现对振动的传感监控。

1.1.1 光时域反射仪

OTDR 通过探测光纤中后向散射光强的变化，分析获取光纤沿途各种事件的信息，其基本结构如图 1 所示。

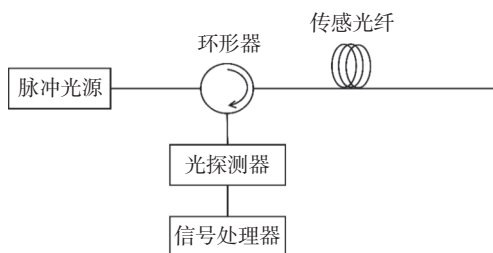


图 1 OTDR 基本结构

Fig. 1 Basic structure of OTDR

光脉冲由脉冲光源产生并注入传感光纤，沿

光纤传输时会产生后向瑞利散射光。散射光经光电探测器收集并转换为电信号后，经信号处理器分析得到事件的位置信息，其表达式为

$$x = \frac{ct_0}{2n} \tag{1}$$

式中： c 为真空中的光速； n 为光纤的折射率； t_0 为信号强度发生变化的时刻。

OTDR 仅能探测光纤中的损耗、断点、弯折等静态事件，多用于光纤质量检测，无法监测外界扰动事件^[5]，因此难以在边海防报警线路中应用。

1.1.2 偏振光时域反射仪

光纤中传输光的偏振状态会受到应力、温度、电场、磁场等影响。偏振光时域反射仪(POTDR)利用窄带激光器产生光脉冲，经起偏器后注入传感光纤，通过检测后向瑞利散射光的偏振态，可以对光纤沿路进行实时监测^[14]。POTDR 的基本结构如图 2 所示，在传统 OTDR 的基础上，于传感光纤和光电探测器的前端分别引入起偏器和检偏器。

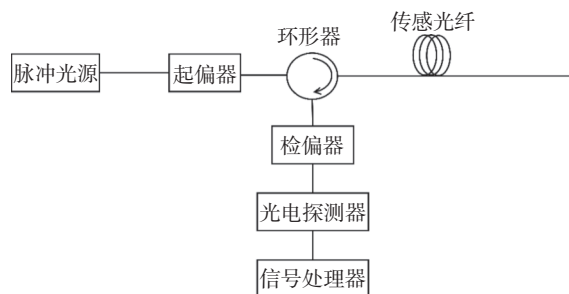


图 2 POTDR 基本结构

Fig. 2 Basic structure of POTDR

在静态情形下，POTDR 可以用于检测光纤的偏振模色散^[15]、偏振相关损耗^[16]和双折射效应^[17]。在动态情形下，利用 POTDR 对于后向瑞利散射光的偏振变化具有快速响应的特点进行振动传感，为了提高系统的响应实时性和信噪比，还可以在 POTDR 种应用数字平均降噪和小波降噪的方法^[18]。但当传感光纤上不同两点受到干扰时，两点产生的散射光的偏振状态会互相影响，从而产生偏振叠加效应，使 POTDR 无法定位多个扰动事件^[14]。因此，对于 POTDR 结构的多点扰动检测是当前研究的重点，目前已经可以

实现双事件检测^[6]和对两个同频率扰动的位置区分^[7]。偏振叠加效应使得多点扰动互相串扰,一旦系统前端出现扰动事件,则后端的光纤系统将无法进行事件检测,这使得 POTDR 系统大多停留在实验室阶段,难以在边海防报警线路中应用。

1.1.3 相位光时域反射仪

1993 年, Taylor 首次提出相位敏感光时域反射仪(Φ -OTDR)的概念^[19]。与传统 OTDR 不同, Φ -OTDR 的光源使用窄线宽的激光器。由于光源线宽窄、相干性好,入射光在光脉冲宽度范围内产生的后向散射光会发生干涉,探测后向散射光干涉后的强度变化,可以准确识别位置信息和振动信号。 Φ -OTDR 基本结构如图 3 所示。

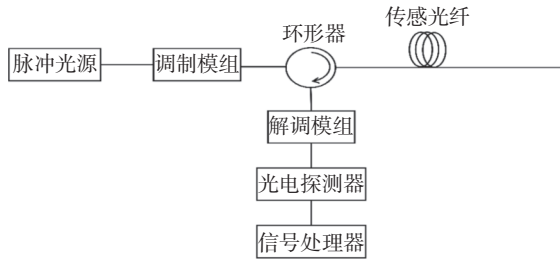


图 3 Φ -OTDR 基本结构

Fig. 3 Basic structure of Φ -OTDR

光纤中后向瑞利散射光的相位对微小的扰动和应力变化很敏感, Φ -OTDR 系统通过对该相位变化的检测,可以实现高灵敏度的振动探测。因为传感光纤远端信噪比较低, Φ -OTDR 仍存在着误报率高、多点定位不准确等问题。目前,对 Φ -OTDR 的研究集中于系统结构和算法的改善,从而提高信噪比,增加系统传感距离。在改善系统结构方面,研究者在 Φ -OTDR 系统中分别引入了一阶和二阶分布式拉曼放大器^[20]、混合分布式放大器^[21-22]。在优化系统算法方面,研究者们将自适应双边滤波算法^[23]、粒子群优化算法^[24]和基于机器学习模型的多维信号检测识别算法^[25]用于 Φ -OTDR 系统的信号去噪。除此之外,还有学者设计并搭建了一种集成 Φ -OTDR 和 BOTDR 的双参量分布式光纤传感系统,可以同时实现对温度和振动的监测^[26]。

Φ -OTDR 可以实现对振动的长距离、高分辨率探测,因此在未来边海防报警线路中具有广阔应用前景。随着距离的增加, Φ -OTDR 的单点采样率会大幅降低,同时在长距离的入侵探测

应用中, Φ -OTDR 对系统组成中的激光器和采集模块要求较高,成本也相应提高,一定程度上限制了其应用。

1.1.4 光频域反射仪

对于 OTDR 来说,空间分辨率的量级主要为米级。为了能达到毫米级的空间分辨率,研究者们开始将目光转向光频域反射仪(OFDR),其基本结构如图 4 所示。

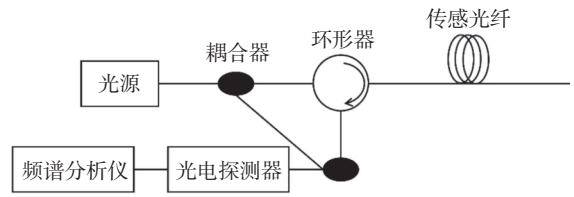


图 4 OFDR 基本结构

Fig. 4 Basic structure of OFDR

目前,使用可调谐激光器,OFDR 实现了空间分辨率为毫米级的探测^[8]。OFDR 可以实现较高的空间分辨率,但传感距离受到光源的相干长度、相位噪声和偏振状态的限制。为提高传感距离,研究者提出了相位噪声补偿^[9]、双边带相位噪声消除^[10]、加入光 IQ 调制器^[11]、应用自相关算法^[12]等方法,以及非相干 OFDR^[13]。OFDR 适用于短距离、高分辨率的振动信号监测,可应用于边海防报警线路中。

1.2 干涉型振动光缆传感技术

干涉型振动光缆传感技术发源于 20 世纪 70 年代,是目前市面上振动光缆传感的主流技术。干涉型振动光缆传感是利用光弹效应,外界物理场的变化会引起光纤的长度 L 、纤芯折射率 n 、光纤直径 d 等物理量发生变化,从而导致传输光相位的变化,通过探测相位改变来获取扰动信息

$$\Delta\varphi = \beta\Delta L + L\Delta\beta = \beta L \frac{\Delta L}{L} + L \frac{\partial\beta}{\partial n} \Delta n + L \frac{\partial\beta}{\partial d} \Delta d \quad (2)$$

干涉型振动光缆传感技术主要利用干涉仪将相位变化转换为光强的变化,双光束干涉时,干涉光的光强可表示为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\Delta\varphi \quad (3)$$

式中: I_1 和 I_2 分别为两束相干光的光强; $\Delta\varphi$ 为两束光的相位差。根据结构的不同,干涉仪

可分为 Sagnac 型^[27-32]、Mach-Zehnder 型^[33-36]、Michelson 型^[37-38]，以及复合型^[39-43]。

1.2.1 萨格纳克(Sagnac)干涉仪

Sagnac 干涉仪基本结构如图 5 所示^[27]，光源发出的光由 3 dB 耦合器分为两束，在传感光纤环中分别沿顺时针和逆时针传播，回到耦合器时发生干涉。当环路没有受到外界扰动作用时，两个方向传输光的光程相等，干涉光的相位恒定。而当环路某一位置受到外界扰动作用时，两束光产生不同的相位变化，干涉光的相位随之发生改变，从而改变干涉光的光强，通过对光强变化的分析，可以实现对外界扰动的定位以及扰动信号的还原。目前国内已有相关基于 Sagnac 干涉仪的智能光纤安防系统投入应用^[28]。为提升系统准确度和可靠性，研究者们进一步提出使用双波长光源^[29]、保偏光纤^[30]，以及双 Sagnac 环^[31]的结构。

Sagnac 结构具有互易性，无外界扰动时干涉光的相位和偏振态相同，保持稳定。在光源的选择方面，宽谱光源可以有效抑制相干噪声，提升系统性能。若扰动发生在 Sagnac 环的对称中

心位置附近，则两束光会同时发生相位改变，干涉光的相位变化较小，使扰动难以被探测。为解决 Sagnac 环的对称中心检测盲区问题，研究者提出了一种直线型 Sagnac 结构^[32]，并且相比于环状结构，直线型结构易于在实际应用中铺设，提高了实用性。

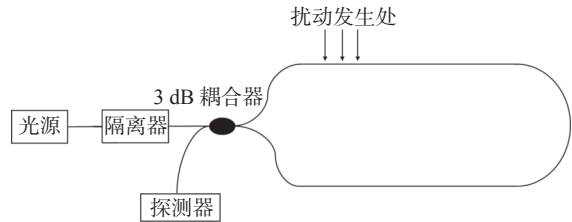


图 5 Sagnac 干涉仪基本结构
Fig. 5 Basic structure of Sagnac interferometer

1.2.2 马赫-曾德(Mach-Zehnder)干涉仪

Mach-Zehnder 干涉仪的基本结构如图 6 所示^[33]。光源发出的光通过光纤耦合器分为两束，分别进入参考光纤和传感光纤，然后在另一个光纤耦合器处产生干涉信号，通过对干涉相位的解调得到扰动信息。

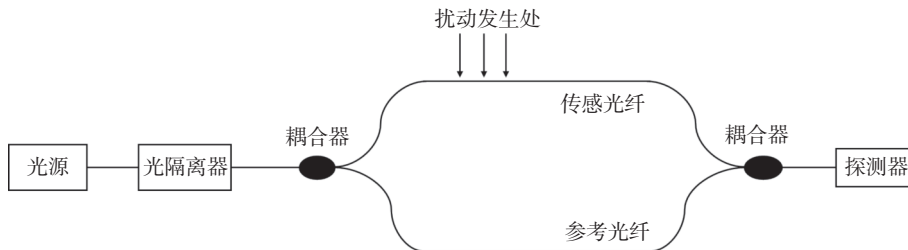


图 6 Mach-Zehnder 干涉仪基本结构
Fig. 6 Basic structure of Mach-Zehnder interferometer

Mach-Zehnder 干涉仪结构简单，且光纤中的光束单向传输，相干噪声较低。但基本的 Mach-Zehnder 结构仅能探测扰动的发生，定位比较困难，且在实际使用中很难控制传感臂和参考臂等长，对光源也有较高的要求。目前已有研究者提出了多种类型的双 Mach-Zehnder 干涉结构^[34-35]以提高传感精度和传感距离，除此之外还可以与 Φ -OTDR 相结合以降低误报率和实现同时多点报警^[36]。

1.2.3 迈克尔逊(Michelson)干涉仪

Michelson 干涉仪的基本结构如图 7 所示。光源发出的光经过 3dB 耦合器后分为强度相同

的两束光，分别进入长度相同的传感光纤和参考光纤中，在光纤末端经反射镜反射回到耦合器发生干涉，通过对干涉相位的解调得到扰动信息。

该结构能够使传感距离不受相干长度的限制。使用法拉第旋转镜作为反射镜可使两光路的偏振保持一致，消除偏振衰落。理想的 Michelson 干涉仪要求传感光纤和参考光纤等长，这在实际应用中难以实现。此外，该结构需要相干性较好的光源，这也增加了系统的成本。为提升 Michelson 干涉仪的性能，研究者提出了双输出^[37]、非平衡 Michelson 干涉仪^[38]等结构。

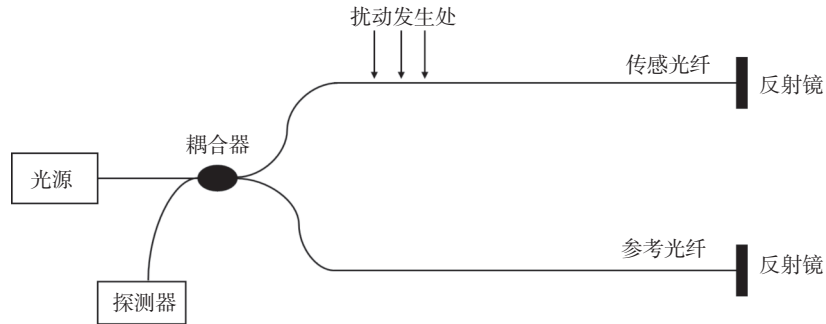


图 7 Michelson 干涉仪基本结构

Fig. 7 Basic structure of Michelson interferometer

1.2.4 复合干涉仪

为降低成本, 实现更高效的检测, 研究者还提出了复合干涉结构来满足实际应用的需要。报道中使用最多的复合干涉结构为 Sagnac 与 Mach-Zehnder 干涉仪的结合(见图 8)^[39]。在此

基础上, 后续发展出了时分复用与波分复用的复合结构^[40]、可调节测量范围的干涉仪结构^[41]等。此外, Sagnac 与 Michelson 复合干涉仪的研究^[42-44]也被陆续报道出来, 基于这种结构的系统可以实现对扰动事件的监测和定位。

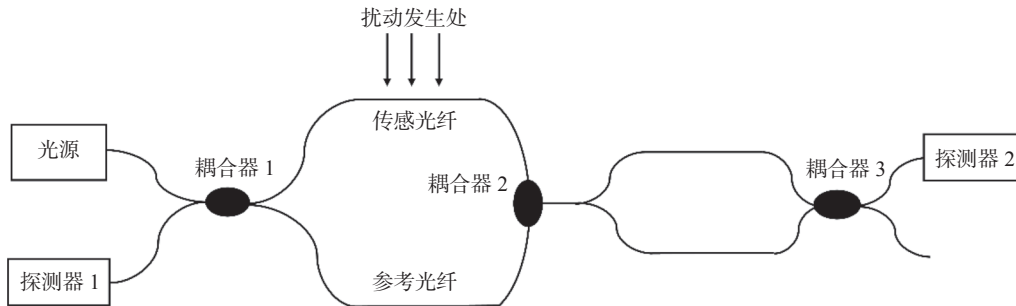
图 8 Sagnac 与 Mach-Zehnder 干涉结构结合的复合干涉仪^[39]

Fig. 8 Sagnac and Mach-Zehnder compound interferometer

干涉型分布式光纤传感技术具有灵敏度高、结构简单且稳定、易于解调的优点, 目前已经有很多成功的应用案例并且正在逐步实现产品化, 是当前比较适用于边海防振动光缆报警线路的技术。

1.3 光纤光栅型振动传感技术

光纤布拉格光栅(FBG)传感技术是常用于振动传感的准分布式光纤传感技术。利用光纤纤芯的紫外光敏特性, 通过使用紫外光的照射, 使纤芯折射率发生周期性变化, 形成衍射光栅。具有一定带宽的光束入射到光纤光栅后, 波长为布拉格中心波长的光会发生反射, 其余波长的光将发生透射。对于光纤纤芯有效折射率为 n_{eff} 、周期为 Λ 的光栅, 其布拉格中心波长为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda_B \quad (4)$$

当外界物理场如温度、应变等作用于光纤光栅上时, 光纤光栅的有效折射率和周期会发生变化, 可以通过检测反射光的中心波长的变化来实现对外界物理场变化的监测。

基于光纤光栅的准分布式光纤传感系统是在光纤上级联多个布拉格中心波长不同的光纤光栅, 处在不同位置的光栅会有不同波长的反射光, 探测每个光栅的反射光波长改变, 则可以实现对光纤沿线光栅处的物理量测量。为实现长距离的探测, 提出了优化光路结构、改良光器件的方法来降低系统损耗, 并引入光放大器。研究者提出了可调谐激光器结合掺铒光纤放大器、拉曼放大器的 FBG 传感系统, 将传感距离提高至 300 km^[45]。基于 FBG 的光纤传感技术较为成熟, 但在边海防这种大范围振动传感系统应用、安装和使用, 还需进一步研究。

1.4 多技术复合型振动光缆传感技术

多技术复合型振动光缆传感技术是指结合散射型、干涉型、光纤光栅型等两种或两种以上不同原理而衍生的振动光缆传感技术，以实现多功能、多场景、高效率的检测。如 OTDR 技术可

以实现精确的定位，而干涉型技术则可以做到更好的模式识别和获得更好的线性度。

1.5 技术应用分析

振动光缆技术应用分析如表 1 所示。

表 1 振动光缆技术应用分析比较
Tab. 1 Analysis and comparison of application of vibration optical cable technology

技术分类	感应扰动频率响应	监测光纤长度	空间分辨率	实际应用中的问题
OTDR	-	-	-	仅能探测静态事件，无法监测外界扰动事件
POTDR	扰动信号 5 kHz ^[6]	2 km ^[6]	10 m ^[6]	偏振叠加效应使得多点扰动互相串扰，误报率漏报率高。
Φ-OTDR	随监测光纤长度增加而减小	175 km ^[22]	25 m ^[22]	相对造价高；空间分辨率会随着监测长度变长而变差；传感光纤远端信噪比较低、误报率增高、定位精度恶化。
OFDR	-	50~152 km ^[10,15]	cm~mm ^[8,13]	传感长度受到激光源的相干长度、相位噪声和偏振状态的限制，造价高。
Sagnac干涉仪	振动信号 50 kHz ^[32]	~10 km ^[32]	-	环对称结构使系统定位困难，且传感光纤对称中心点探测灵敏度低。
Mach-Zehnder干涉仪	振动信号 50 kHz ^[35]	320 km ^[35]	31 m ^[35]	基本M-Z结构定位困难，双臂等长难以实现，且对光源要求较高，系统稳定性略差。
Michelson干涉仪	-	-	-	理想的Michelson干涉结构所要求的双臂等长难以实现，系统稳定性略差。
复合干涉仪	振动信号 50-100 kHz ^[43]	120 km ^[45]	35 m ^[45]	多扰动点的探测和定位较差，但系统稳定性好，造价较低。
光纤光栅型准分布式光纤传感技术	-	300 km ^[44]	-	基于FBG的光纤传感技术较为成熟，误报率偏高。

2 振动光缆报警线路系统探测及敷设方式

2.1 系统探测方式

根据系统探测方式，可将边海防振动光缆报警线路系统分为定位型系统、防区型系统和混合型系统。

2.1.1 定位型系统

定位型系统是基于分布式振动光缆传感原理，当扰动发生在光缆上时，系统不仅可以检测扰动的能量、频率，还可以得到扰动发生的位置信息。前文提到的诸多振动光缆传感技术都可以实现该功能。当入侵行为发生时，行为产生的扰动会调制光纤中的光信号，通过信号处理模块可

以计算出入侵扰动的位置信息、能量信息和频率信息等，从而实现对入侵行为的定位和报警。

定位型系统可以探测出振动信号发生的精确位置，具有监测距离长，施工难度低等优点，但存在系统结构复杂，造价成本高，抗损毁性差的问题，同时如果相关识别算法不完善，也会有较高的误报率和漏报率。定位型系统结构如图 9 所示。

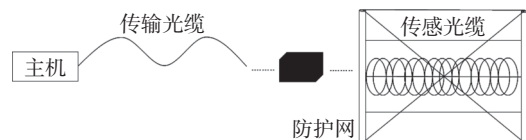


图 9 定位型系统结构示意图
Fig. 9 Structure of positioning system

2.1.2 防区型系统

防区型系统是指将监控区域人为划分成物理防区，每个防区采用独立的振动光缆传感系统进

行检测, 对入侵扰动行为的能量、频率信息进行捕捉和分析, 并对入侵行为进行报警, 报警发生的位置对应系统所监测的物理防区位置。

防区划分, 应以能明确区分发生报警场所作为依据来划分, 同时防区范围不宜过大(一般直线距离不超过 1 km), 且防区设置应有利于迅速判断入侵位置, 弯折多的区域可适当增加防区数量。防区型系统一般采用的是物理分区的方法, 将整个防控区域按需求划分为若干个防区, 防区的系统探测报警参数应独立配置且独立工作。同一防区的安装载体、探测灵敏度要求应保持一致, 同时防区的长度应结合配套光电监控设备前

端覆盖的距离进行设置。

防区型系统结构示意图如图 10 所示, 系统主机通过传输光缆连接各个物理防区的前端模块和传感光缆。每个防区的传感光缆独立工作且无串扰。防区型系统造价成本相对较低, 配合良好的振动识别算法可以保证整个系统拥有较低的误报率。由于各个防区间工作相互不影响, 所以防区型系统的抗损毁性好。相对于定位型系统, 防区型系统的施工难度较高, 需要配合长距离的传输光缆, 并在各个防区需熔接具有复杂拓扑结构的光纤网络。

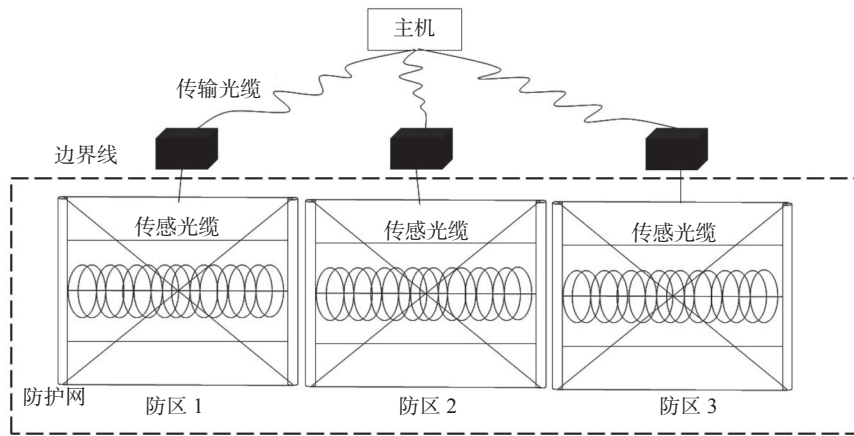


图 10 防区型系统结构示意图

Fig. 10 Structure of defense-zone system

2.1.3 混合型系统

混合型系统如图 11 所示是在系统建设中同时敷设定位型系统和防区型系统, 利用防区型系统的线性采集和识别判断优势, 结合定位系统位

置判别准确优势, 实现高性能的区域防入侵监控系统。混合型系统具有低误报、准确判断入侵时间位置等优点, 缺点是建设成本高, 施工复杂。

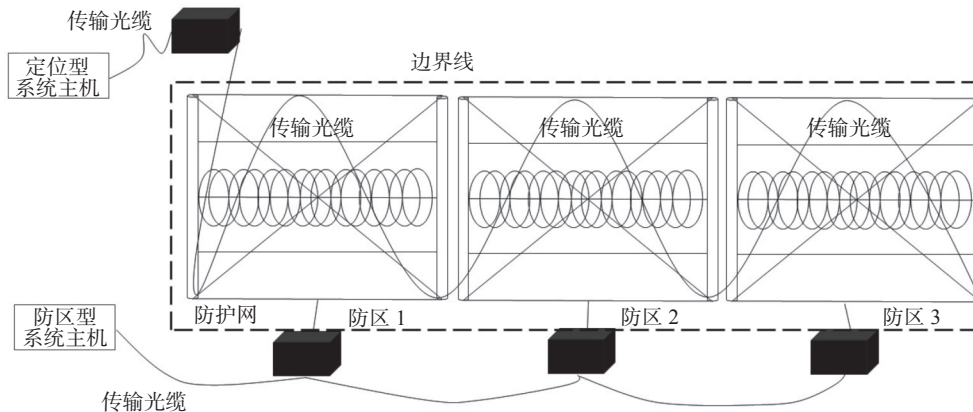


图 11 防区混合定位型系统结构示意图

Fig. 11 Structure of Defense-zone hybrid positioning system

2.1.4 系统组成方式分析

定位型、防区型、混合型系统分析如表 2 所示。

表 2 系统组成方式分析
Tab. 2 Analysis of system composition

系统类型	施工难度	系统成本	告警位置精度	抗损毁性	误漏报率
定位型系统	低	高	高	差	较高
防区型系统	高	低	低	好	较低
混合型系统	高	高	高	好	低

2.2 敷设方式

振动光缆报警线路系统根据传感光缆敷设方式不同可分为挂网式、地理式和下水式。

2.2.1 挂网式系统

挂网式系统是指振动光缆悬挂、铺设或嵌入于铁丝网、铁栅栏等安装载体。挂网式系统建造难度低，施工便捷，但存在光缆暴露、易损坏等问题。典型挂网式系统传感光缆敷设如图 12 所示，传感光缆应尽可能多地覆盖阻拦设施以避免出现探测盲区、产生漏报。

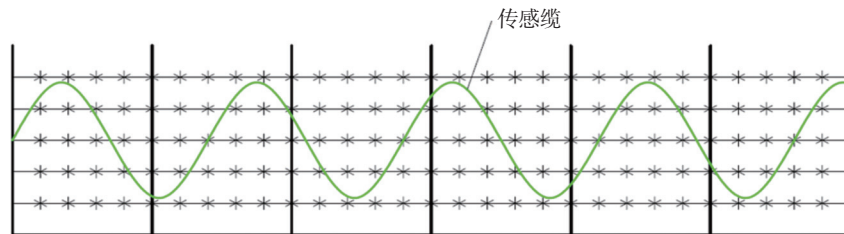


图 12 挂网式系统示例图
Fig. 12 Net hanging system

2.2.2 地理式系统

地理式系统如图 13 所示是指振动光缆埋藏于土层等安装载体内部。地理式系统具有报警性能优异、误报率低且不易损毁等优点。但与挂网式系统相比，系统建设成本较高、施工难度较大。在严寒情况下，由于土壤板结，系统的传感能力会受到极大影响甚至完全丧失。

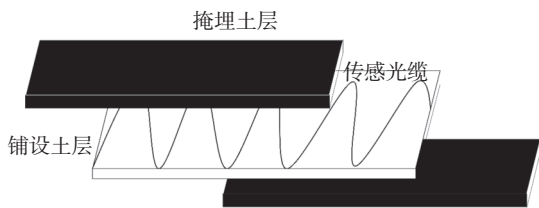


图 13 地理式系统示例图
Fig. 13 Buried system

2.2.3 下水式系统

国务院印发的《“十三五”国家信息化规划》明确了“陆海空天一体化信息网络工程”重大工程，要求重点推动海洋综合观测网络由水面向水下和海底延伸的任务。海底光缆通信网和光缆观测网通常以海底光缆为应用形态，大量研究与应用表明，海底光缆监测效率高，能够快速发现入侵，在水下式系统中有广泛研究应用前景^[46]。

2012 年，国内建成了岸基光纤阵列水声综合探测系统；2014 年，建成了首个水下监视系统和海底观测系统。在工程领域，基于 GPRS 振动光缆周界报警系统在水中安防得到成功应用^[47]，图 14 展示了振动传感光缆铺设方式。

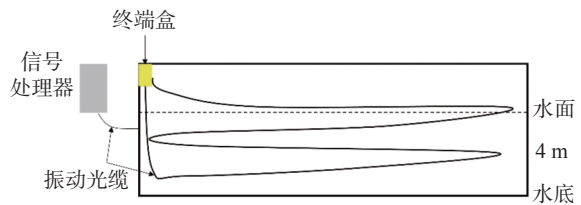


图 14 水深 >1.5 m 且 <4 m 支流的振动传感光缆铺设方式^[40]

Fig. 14 Laying mode of vibration sensing fiber optic cable for water depth >1.5 m and <4 m tributaries

国外挪威 OptoPlan 公司 Nakstad 等在 Trondheim 海湾和 Tjeldbergodde 海湾铺设了海底地震光缆 (fiber-optic ocean bottom seismic cable, OBC) 系统，并进行了为期半年的地震监测，OBC 系统结构如图 15 所示。2013 年，我国成功研制全光纤海洋边界安全监测设备，在实际应用中，在海岸线、岛屿周边铺设传感光缆，通过采集分析光缆中光信号变化得出振动位置数据，

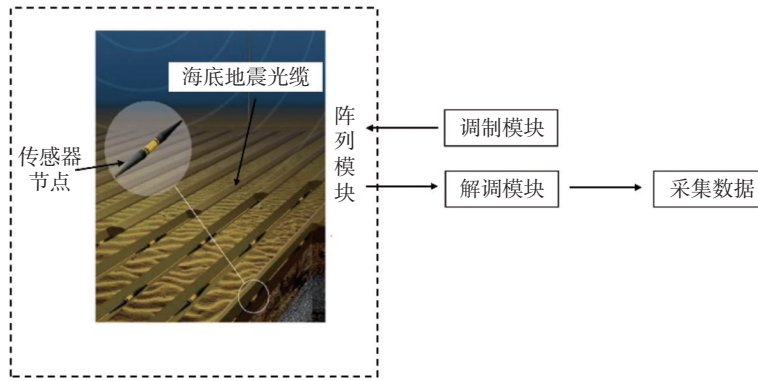


图 15 海底地震光缆系统

Fig. 15 Submarine seismic fiber optic cable system

判断周界安全情况, 适用于长距离海洋周界入侵监测。振动光纤技术能够检测到低于平均噪声水平的入侵噪声, 是岸线防御的重要应用。

2.2.4 敷设方式分析

挂网式、地理式、水下式等不同敷设方式系统分析比较如表 3 所示。

表 3 敷设方式分析比较

Tab. 3 Laying mode analysis and comparison

系统类型	报警性能	抗损毁性	建造难度	备注
挂网式系统	好	差	较低	易受敷设影响出现盲区; 易受天气影响造成误报或损毁;
地理式系统	好	好	较高	严寒情况下, 土壤板结导致光缆无法传感振动而失效
水下式系统	好	一般	高	面临着水下设备使用寿命不够以及如何向水下远距离的输送大功率高压电能的问题

3 前景展望

早期振动光缆报警线路技术由于成熟度不高, 存在环境适应性差、误报率高、可靠性低等问题, 限制了其推广应用。经过长时间的发展之后, 从目前的技术成熟度来看, Φ -OTDR 和干涉型振动光缆传感系统都具有良好的应用前景, 两者都能较好的实现分布式传感和光纤沿路的振动信号还原和扰动定位。但是前者相较于后者, 仍然存在着一些短时间内难以解决的问题: 一是传感距离受设备限制较大; 二是发生多点扰动时系统难以识别。而后者发展迅速, 各种新型的复合干涉结构被诸多学者们研究提出并成功应用, 不同干涉结构的结合能有效地避免其单一使用时出现的问题, 且能大幅提高传感距离和传感精度, 是目前最适用于边海防的振动光缆报警系统。

除此之外, 近年来, 随着机器学习技术的发展, 振动信号分析识别技术也已经日趋成熟, 误报率高的问题得以显著改善, 具体改善方法有构

建 BP 神经网络^[48]、卷积神经网络^[49], 或使用向量机^[50-51]和极限学习机^[52,53]进行分类等, 这些方法极大地提高系统辨别分类扰动事件的能力。目前, 振动光缆报警线路技术已在辽宁、吉林、新疆、云南、广东、江苏等边海防一线省份试点应用。2021 年, 《边海防振动光缆报警系统技术要求》已制定出台, 将进一步规范促进技术创新与推广应用。

在未来的推广应用中, 想要进一步提高振动光缆报警系统的可靠性与可用性, 应因地制宜地采用振动光缆报警线路技术产品, 结合人工智能技术, 完善目标探测、分类、识别算法与模型库; 做好与光电、雷达、声音、振动传感器联动, 不断降低系统误报率与漏报率; 同时也可以加入对应的视频监控系统, 以提高系统报警的即时性, 给予工作人员更好的实时反馈。

参考文献:

[1] JUAREZ J C, MAIER E W, CHOI K N, et al.

- Distributed fiber-optic intrusion sensor system[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(6): 2081 – 2087.
- [2] YANG S, BU F L. Design of frequency adjustable pulse in intelligent electronic fence system[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Telecommunications and Communication Engineering. Beijing: ACM, 2018: 344 – 347.
- [3] YANG J, YANG S, GUO R, et al. 1D triboelectric nanogenerator operating by repeatedly stretching and as a self-powered electronic fence and geological monitor[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2020, 5(2): 1901005.
- [4] BAO X Y, CHEN L. Recent progress in distributed fiber optic sensors[J]. *Sensors*, 2012, 12(7): 8601 – 8639.
- [5] PHILEN D L, WHITE I A, KUHL J F, et al. Single-mode fiber OTDR: experiment and theory[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1982, 30(10): 1487 – 1496.
- [6] ZHANG Z Y, BAO X Y. Distributed optical fiber vibration sensor based on spectrum analysis of polarization-OTDR system[J]. *Optics Express*, 2008, 16(14): 10240 – 10247.
- [7] WANG F, PAN Y, ZHANG M J, et al. Detection of two identical frequency vibrations by phase discrimination in polarization-OTDR[J]. *Optics Communications*, 2017, 389: 247 – 252.
- [8] SOLLER B J, GIFFORD D K, WOLFE M S, et al. High resolution optical frequency domain reflectometry for characterization of components and assemblies[J]. *Optics Express*, 2005, 13(2): 666 – 674.
- [9] FAN X Y, KOSHIKIYA Y, ITO F. Phase-noise-compensated optical frequency-domain reflectometry [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2009, 45(6): 594 – 602.
- [10] BADAR M, KOBAYASHI H, IWASHITA K. Chromatic dispersion measurement with double sideband phase noise canceled OFDR[J]. *Optics Communications*, 2015, 356: 350 – 355.
- [11] 延敏, 白清, 梁昌硕, 等. 基于 IQ 调制的 OFDR 系统仿真研究 [J]. *光学技术*, 2020, 46(6): 696 – 701.
- [12] 薛慧如, 马秀荣, 单云龙. 基于 OFDR 光纤振动传感器解调算法的研究及改进 [J]. *光通信技术*, 2019, 43(6): 9 – 12.
- [13] BAKER C, LU Y, SONG J, et al. Incoherent optical frequency domain reflectometry based on a Kerr phase-interrogator[J]. *Optics Express*, 2014, 22(13): 15370 – 15375.
- [14] ROGERS A J. Polarization-optical time domain reflectometry: a technique for the measurement of field distributions[J]. *Applied Optics*, 1981, 20(6): 1060 – 1074.
- [15] HUTTNER B, GISIN B, GISIN N. Distributed PMD measurement with a polarization-OTDR in optical fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, 17(10): 1843 – 1848.
- [16] DONG H, SHUM P, GONG Y D, et al. Single-ended measurement of polarization-dependent loss in an optical fiber link[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(3): 185 – 187.
- [17] SHANG C, WU C Q, LI Z Y, et al. A new distributed measurement of birefringence vectors by P-OTDR assisted by a high speed polarization analyzer[J]. *Chinese Physics Letters*, 2011, 28(9): 094212.
- [18] 陈勳勳, 王峰, 张旭莘, 等. POTDR 振动传感系统的数据处理与分析方法 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(11): 1671 – 1678.
- [19] TAYLOR H F, LEE C E. Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing: US, 5194847[P]. 1993 – 03-16.
- [20] PENG F, PENG Z P, JIA X H, et al. 128km fully-distributed high-sensitivity fiber-optic intrusion sensor with 15m spatial resolution[C]//Proceedings of OFC 2014. San Francisco: IEEE, 2014: 1 – 3.
- [21] FU Y, ZHU R C, HAN B, et al. 175-km repeaterless BOTDA with hybrid high-order random fiber laser amplification[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(18): 4680 – 4686.
- [22] 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.
- [23] HE H J, SHAO L Y, LI H C, et al. SNR enhancement in phase-sensitive OTDR with adaptive 2-D bilateral filtering algorithm[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(3): 6802610.
- [24] LI D D, LOU S Q, XIN Q, et al. SNR enhancement of far-end disturbances on distributed sensor based on phase-sensitive optical time-domain reflectometry[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(2): 1957 – 1964.
- [25] 吴慧娟, 刘欣雨, 饶云江. 基于 Φ -OTDR 的光纤分布式传感信号处理及应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(13): 1306003.

- [26] 张凯, 药炜, 原军, 等. 相位敏感 OTDR 和布里渊 OTDR 结合的双参量分布式光纤传感的研究 [J]. *激光与红外*, 2021, 51(1): 74 – 79.
- [27] UDD E. Sagnac distributed sensor concepts[C]//Proceedings SPIE 1586, Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors. Boston: SPIE, 1992: 46 – 52.
- [28] 彭期刚. 基于 Sagnac 环的分布式光纤围栏智能预警安防系统 [J]. *电力大数据*, 2021, 24(5): 86 – 92.
- [29] SPAMMER S J, SWART P L, CHTCHERBAKOV A A. Distributed dual-wavelength Sagnac impact sensor[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 1998, 17(3): 170 – 173.
- [30] WADA K, NARUI H, YAMAMOTO D, et al. Balanced polarization maintaining fiber Sagnac interferometer vibration sensor[J]. *Optics Express*, 2011, 19(22): 21467 – 21474.
- [31] FANG X J. Fiber-optic distributed sensing by a two-loop Sagnac interferometer[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(6): 444 – 446.
- [32] LIN W W. Novel distributed fiber optic leak system[J]. *Optical Engineering*, 2004, 43(2): 278 – 279.
- [33] LIU X, JIN B Q, BAI Q, et al. Distributed fiber-optic sensors for vibration detection[J]. *Sensors*, 2016, 16(8): 1164.
- [34] KIZLIK B. Fibre optic distributed sensor in Mach-Zehnder interferometer configuration[C]//Proceedings of Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science. Lviv-Slavsko: IEEE, 2002: 128 – 130.
- [35] CHEN Q M, JIN C, BAO Y, et al. A distributed fiber vibration sensor utilizing dispersion induced walk-off effect in a unidirectional Mach-Zehnder interferometer [J]. *Optics Express*, 2014, 22(3): 2167 – 2173.
- [36] 衣文索, 荆涛, 杜阳, 等. 基于 ϕ -OTDR 与马赫增德复合的光纤预警系统 [C]//第十七届全国光学测试学术交流会摘要集. 长春: 中国光学学会光学测试专业委员会, 2018: 157.
- [37] WEIR K, BOYLE W J O, MEGGIT B T, et al. A novel adaptation of the Michelson interferometer for the measurement of vibration[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1992, 10(5): 700 – 703.
- [38] CHOJNACKI M, SZUSTAKOWSKI M, ZYCZKOWSKI M. Unbalanced Michelson's interferometer as a fiber optic distributed sensor of external signals[C]//Proceedings of SPIE 4535, Optical Sensing for Public Safety, Health, and Security. Warsaw: SPIE, 2000: 205 – 212.
- [39] CHTCHERBAKOV A A, SWART P L, SPAMMER S J, et al. Modified Sagnac/Mach-Zehnder interferometer for distributed disturbance sensing[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 1999, 20(1): 34 – 36.
- [40] LI X L, SUN Q Z, WO J H, et al. Hybrid TDM/WDM-based fiber-optic sensor network for perimeter intrusion detection[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(8): 1113 – 1120.
- [41] ZHEN S L, CHEN J, LI H, et al. Low-coherence fiber differential interferometer with adjustable measurement range[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(8): 895 – 898.
- [42] SPAMMER S J, SWART P L, CHTCHERBAKOV A A. Merged Sagnac-Michelson interferometer for distributed disturbance detection[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(6): 972 – 976.
- [43] MOHANAN B, SHAIJA P J, VARGHESE S. Studies on merged Sagnac-michelson interferometer for detecting phase sensitive events on fiber optic cables[C]//Proceedings of 2013 International Multi-Conference on Automation, Computing, Communication, Control and Compressed Sensing. Kottayam: IEEE, 2013: 84 – 89.
- [44] SONG Q H, ZHOU P W, PENG H K, et al. Improved localization algorithm for distributed fiber-optic sensor based on merged Michelson-Sagnac interferometer[J]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 7207 – 7220.
- [45] RAO Y J, FENG S, JIANG Q, et al. Ultra-long distance (300km) fiber bragg grating sensor system using hybrid EDF and Raman amplification[C]//Proceedings SPIE 7503, 20th International Conference on Optical Fibre Sensors. Edinburgh: SPIE, 2009: 75031Q.
- [46] 魏巍, 王增, 张伟, 等. 新一代海底光缆综合信息传输网技术发展现状 [J/OL]. *光通信技术*. (2021-11-26). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1160.TN.20211125.1533.002.html>.
- [47] 湛启伟. 基于 GPRS 振动光缆周界报警系统在水中安防应用 [J]. *电子科技*, 2013, 26(7): 33 – 35,39.
- [48] 赵晓晖, 宋耀华, 陈子涵, 等. 基于 BP 神经网络的电缆沟监控模式识别方法 [J]. *光学仪器*, 2020, 42(6): 22 – 27.
- [49] JIANG F, LI H L, ZHANG Z H, et al. An event recognition method for fiber distributed acoustic sensing systems based on the combination of MFCC and CNN[C]//Proceedings of SPIE 10618, 2017 International Conference on Optical Instruments and Technology: Advanced Optical Sensors and

- Applications. Beijing: SPIE, 2018: 1061804.
- [50] 帅师, 王翦, 吴红艳, 等. 一种分布式光纤传感系统的信号识别方法 [J]. 复旦学报: 自然科学版, 2018, 57(5): 611 – 618.
- [51] SHI Y, WANG Y Y, WANG L Y, et al. Multi-event classification for Φ -OTDR distributed optical fiber sensing system using deep learning and support vector machine[J]. *Optik*, 2020, 221: 165373.
- [52] ZHANG Y X, ZHOU T, DING Z W, et al. Classification of interference-fading tolerant Φ -OTDR signal using optimal peak-seeking and machine learning [Invited][J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(3): 030601.
- [53] ZHANG M J, LI Y C, CHEN J, et al. Event detection method comparison for distributed acoustic sensors using Φ -OTDR[J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 52: 101980.

(编辑: 张 磊)