

## 激光与光电子学进展

## 面向拉曼分布式光纤传感的无线远程监测系统设计

秦磊<sup>1,3</sup>, 杨清宝<sup>4</sup>, 张炜怡<sup>3</sup>, 尹子彤<sup>3</sup>, 李健<sup>2\*</sup>, 张明江<sup>1,3\*\*</sup><sup>1</sup>太原理工大学物理学院, 山西 太原 030024;<sup>2</sup>太原理工大学电子信息与光学工程学院, 山西 太原 030024;<sup>3</sup>太原理工大学新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 太原 030024;<sup>4</sup>中铁建安工程设计院有限公司, 河北 石家庄 050047

**摘要** 针对目前基于拉曼分布式光纤传感系统的无线传感系统中信息单向传输、传输数据量小等技术瓶颈,将4G无线传输模块与拉曼分布式光纤传感系统相结合,设计适用于大规模分布式传感数据的数据无线传输方法与拉曼分布式光纤温度远程监测系统。该新型系统可以在远程控制中心稳定实时显示现场监测结果并进行监测指令双向遥控与监测结果分析,有利于降低工程应用中分布式光纤长距离实时监测的成本,提升监测控制智能化水平与传感监测效率。

**关键词** 分布式光纤传感; 拉曼散射; 远程监测; 无线通信

中图分类号 O436.2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232755

## Design of a Wireless Remote Monitoring System for Raman Distributed-Optical-Fiber Sensing

Qin Lei<sup>1,3</sup>, Yang Qingbao<sup>4</sup>, Zhang Wei<sup>3</sup>, Yin Zitong<sup>3</sup>, Li Jian<sup>2\*</sup>, Zhang Mingjiang<sup>1,3\*\*</sup><sup>1</sup>College of Physics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;<sup>2</sup>College of Electronic Information and Optical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;<sup>3</sup>Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control Systems, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;<sup>4</sup>China Railway Construction and Safety Engineering Design Institute, Shijiazhuang 050047, Hebei, China

**Abstract** Current wireless sensing systems based on Raman distributed-optical-fiber sensing systems are limited by technical bottlenecks such as unidirectional transmission of information and small transmission data volume. To overcome these bottlenecks, a wireless data transmission method and Raman distributed-optical-fiber temperature remote monitoring system were designed in this study. This system is based on a combination of a 4G wireless transmission module and a Raman distributed-optical-fiber sensing system. It is suitable for large-scale distributed sensing data. Results show that the proposed system displays field-monitoring results stably and in real-time in the remote control center. The bidirectional remote control of monitoring instructions was realized, and the monitoring results were analyzed. The proposed system is beneficial for reducing the cost of long-distance, real-time monitoring of distributed-optical-fiber in engineering application and improving the level of intelligent monitoring control and sensor monitoring efficiency.

**Key words** distributed-optical-fiber sensing; Raman scattering; remote monitor; wireless communication

## 1 引言

拉曼分布式光纤传感技术由于具有传感距离长、可分布式测量、耐腐蚀性强、抗电磁干扰等优点,已被

广泛用于城市管道、输电通信线缆、输油输气管道、桥梁、轨道交通、水库水坝等基础设施领域的温度监测<sup>[1-5]</sup>。由于大部分基础设施的监测环境复杂,在实际监测中往往需要人工现场值守,在增加人力、物力成本

收稿日期: 2023-12-26; 修回日期: 2024-02-03; 录用日期: 2024-02-23; 网络首发日期: 2024-03-13

基金项目: 国家自然科学基金(62075151, 62205234, 62105234, 62205237)、山西省自然科学基金青年科学基金(202103021223042, 20210302124396)、山西省科技成果转化引导专项(202204021301042)、山西省专利转化专项计划(202302002)

通信作者: \*lijian02@tyut.edu.cn; \*\*zhangmingjiang@tyut.edu.cn

的同时不利于大规模、全天候监测与实时数据分析。要实现低成本、高效率、高可靠性的工业监测,有必要建立一个实时远程传感监测系统<sup>[6-9]</sup>。针对不具备有线网络条件的复杂监测现场,近年来研究人员基于光学传感系统与无线数据传输模块结合各大重要测量场景开展了大量研究<sup>[10-14]</sup>。孙利民等<sup>[15]</sup>开发了利用全球移动通信系统(GSM)公共无线通信网络实现振动测量的无线传感系统,并通过光纤光栅传感器组建传感网络,实现数据的测量与远程传输。杨浩<sup>[16]</sup>在使用光纤光栅测量桥梁索力的研究中利用一种点对点的 2.4 GHz 无线通信模块进行无线监测。而 GSM 通信与点对点通信模式已无法满足目前分布式数据传输的需要。张彦军等<sup>[17]</sup>在基于光纤液漏传感器的渗漏水监测中借助 Zigbee 技术实现了无线监测,但 Zigbee 技术的无线传输距离较短,不适用于大规模远程监测。刘超<sup>[18]</sup>在使用光纤布里渊传感技术监测输电线路覆冰情况时,使用 Zigbee 技术短距离无线组网与通用分组无线业务(GPRS)模块长距离无线通信结合的方式完成电路覆冰远程监测,该方法的局限在于数据校验设计较少,无法保证传输可靠性。蒋金洲等<sup>[19]</sup>提出基于光纤光栅传感与 GPRS 无线传输的铁路轨道远程监测技术方案,该方案已被用于国内多处高速铁路轨道监测点,但其数据可视化与系统智能化程度不足。综上所述,现有研究主要存在传输数据量小、传输速度慢、系统智能化程度低的局限,不适用于分布式光纤传感长距离、智能化远程监测。

本文将拉曼温度传感系统与 4G 无线数据传输模块(4G DTU)结合,设计并研发了一套拉曼分布式光纤传感远程温度监测系统,可实现大量数据传输下的温度监测远程控制 and 分布式传感数据远程展示、分析与存储。设计数据无线传输自动检错纠错程序与可视化远程监测上位机软件,保证远程监测中心能稳定地进行远程实时监测,提高了远程监测数据传输可靠性与系统操作智能度,增强了分布式光纤传感在工业监测领域中的实用性。

## 2 系统结构及工作原理

拉曼分布式光纤传感远程温度监测系统的结构按功能可分为现场传感端和远程监测端。现场传感端由拉曼分布式光纤温度传感装置、传感光纤、4G DTU 与现场上位机(PC 1)组成。远程监测端为远程上位机(PC 2)。拉曼分布式光纤测温技术是基于光时域反射原理和拉曼后向反斯托克斯信号功率随温度变化较为明显的特性实现对环境温度的监测,通过光时域反射原理可以将测得的信号强度与测量位置相对应,根据信号功率的变化可以将其转换为所监测环境的温度变化。

现场传感端的拉曼分布式光纤温度传感装置如图 1 所示。脉冲激光器发出的脉冲光经过波分复用器(WDM)入射到传感光纤中,并返回带有待测光纤

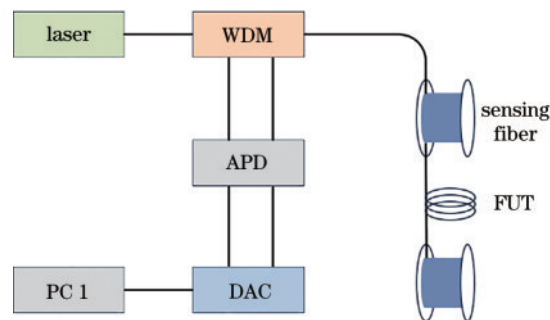


图 1 拉曼分布式光纤温度传感系统装置现场传感端示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of field sensor terminal of Raman distributed optical fiber temperature sensing system device

(FUT)的温度变化区温度信息的后向拉曼散射光,经 WDM 滤出的反斯托克斯拉曼散射光和斯托克斯拉曼散射光被耦合至雪崩光电探测器(APD)进行光信号到电信号的转换和放大。高速采集卡(DAC)采集到的光强数据经过 PC 1 进行温度解调。

图 2 为拉曼分布式光纤传感远程监测系统的整体结构。在现场传感端解调出光纤沿线温度数据后,PC 1 通过有线串口通信将温度信息发送至 4G DTU,由 4G DTU 发起请求建立与 PC 2 的无线信息传输通路。PC 2 连接互联网后,通过固定互联网协议(IP)地址侦听连接请求、连接 4G DTU 并完成信息接收。通过特殊设计的无线传输信息格式,PC 2 可以同时接收并区分温度传感数据与控制指令。在无线远程传输过程中,不仅可以在 PC 2 中实时显示传感温度,而且可以将现场的参数设置与监测状态实时同步到 PC 2。

当需要 PC 2 向 PC 1 发出控制指令时,PC 2 通过 Socket 通信与 4G DTU 建立连接并发出指令,PC 1 将 4G DTU 接收到的指令进行解码与识别并控制 PC 1 程序执行相应指令,以此建立现场与远程的单向数据传输与双向指令通信。

系统中数据无线传输的原理是基于 4G DTU 依托各大移动运营商的公共 4G 网络进行远距离传输<sup>[20]</sup>,模块内置嵌入式处理器采用硬件方式封装多种数据转换协议,依照传输过程中不同设备的数据协议要求,可以将数据封装转换为对应设备所能接收的格式<sup>[21-22]</sup>。例如将 PC 1 物理串口所提供的数据转换为互联网中服务器所能接收的数据,或将 PC 2 发送的网络数据转换为串口所能识别的数据后传入 PC 1 处理<sup>[12,23-24]</sup>。

在一次温度采集与无线发送的周期内,现场传感端上位机程序流程如图 3 所示。首先查询拉曼光纤传感定标信息是否存在,若不存在则进行一次拉曼分布式光纤温度传感,并将其数据作为温度解调定标数据。随后进行分布式光纤光强采集与温度解调,当所解调的温度超过系统预设阈值时,程序将发出监测警报。将异常温度数据与正常温度数据分别储存至系统数据

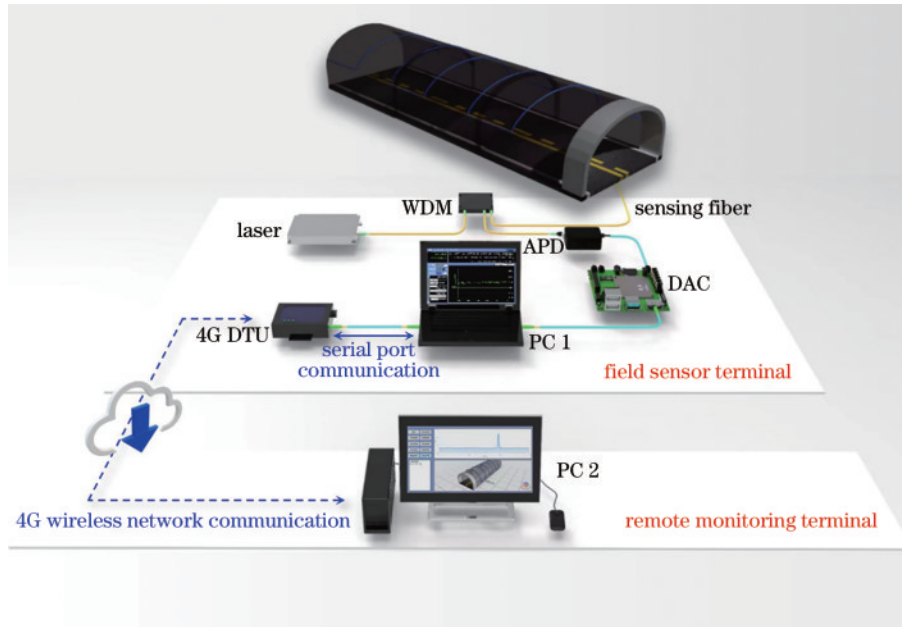


图 2 拉曼分布式光纤温度传感远程监测系统结构图

Fig. 2 Structure of Raman distributed optical fiber temperature sensing remote monitoring system

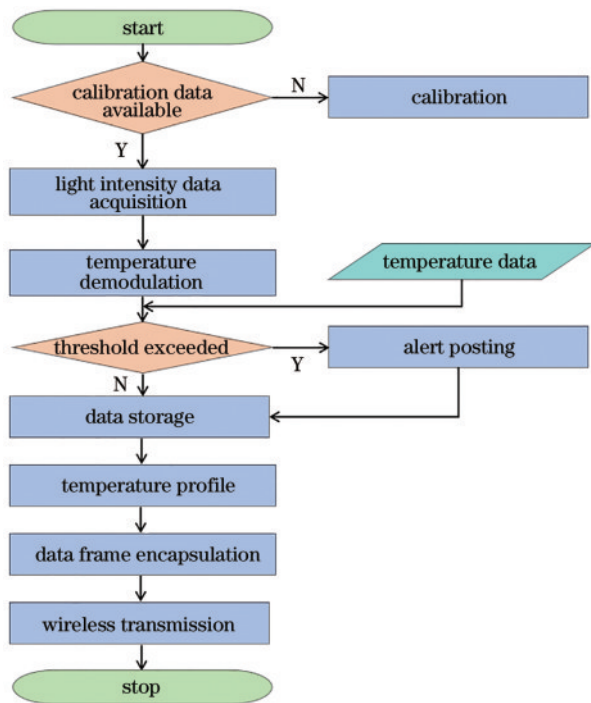


图 3 现场传感端系统流程

Fig. 3 Flowchart of field sensor terminal

库,并实时显示温度传感曲线图表。然后,将本地温度监测数据封装成无线远程传输可识别、可校验的数据

帧格式后进行无线数据发送。在系统程序中,将大量数据通过有线串口通信传输至 4G DTU 进行无线数据发送耗时相对较长,因此软件程序依靠多线程技术同步运行多个温度采集发送周期。该操作使数据的无线传输与接收频率较稳定,同时不影响现场温度监测效率。

### 3 无线数据传输设计

拉曼分布式光纤传感远程监测系统无线传输设计具有传输速度快、分布式传输数据量大、数据指令混合收发、数据非定量传输等特点。为保证无线传输效率与数据可校验性而设计的数据帧结构如图 4 所示。一帧数据中包括数据包类型位、数据包长度位、数据内容位与结束标志位。在无线传输过程中,除传输温度数据外,还需要将系统运行状态传输至远程控制中心并根据远程指令控制监测进程。基于此,在数据格式中设计数据类型位区分温度数据与指令信息以便后续解码。在实际应用中 FUT 的长度不固定,意味着测量后所需传输的数据量不固定。受限于串口缓冲区大小,无法将一组温度数据一次性传输至串口,需要拆分成可变数量的多组数据包分批传输。因此在拆分后的数据包格式设计中包含拆分后数据包的长度信息与停止位标志。

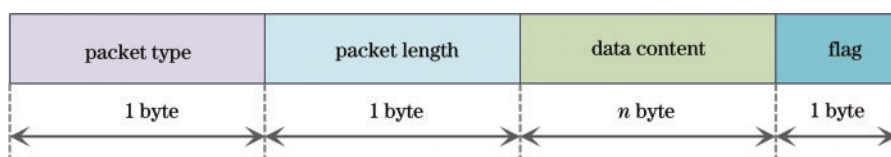


图 4 无线传输数据帧结构图

Fig. 4 Structure diagram of wireless transmission data frame



在传输过程中,无线数据的距离衰减及多径衰减的小尺度效应导致的障碍物、路径损耗将影响信号的时变特性。无线数据在无阻挡传输过程中存在传输电平损耗,导致该损耗的因素主要包含自由空间传播、反射、降水、波导、大气吸收等。对比而言,GPRS 及 GSM 网络相对稳定,信号衰减幅度较小,其中 4G 技术及 Zigbee 技术的性能较为优异。随着 4G 技术在我国的大范围覆盖加之运营商不断增加基站建设,无线数据传输中信号的衰减情况得到了较大的改善。

此外,无线传输信号与有线传输的点对点链路不同,无线数据传输在空中完成,更容易受到干扰,主要表现为同一接收机在与不同发射机进行数据传输时产生的干扰、同一发射机与不同接收机进行数据传输时产生的干扰、不同发射机与接收机进行数据传输时产生的干扰等。

由于拉曼温度信息的数据量较大、4G 网络与串口传输速度不同步等原因,在整体传输过程中无法完全避免丢包、黏包等数据传输不完整的情况发生。远程控制中心接收到数据后可以根据数据包中数据长度位与结束位标记校验数据的包间完整性,并将传输数据包有序重组还原出原始温度数据。

图 5 为远程监测端数据接收校验纠错流程。远程接收端采用固定长度的数据接收模式,通过 FUT 的长度可计算出一次完整测量应产生的数据量  $q$ ,并在接收数据时循环判断是否已接收够约定数据量。当数据量达到约定值后视为此次数据接收完毕,并将接收到的十六进制编码数据转换为浮点数。通过对比数据包尾部标志位 flag 中信息来检验数据是否正确,在数据包长度固定的情况下,若数据包尾部 flag 标志位缺失或信息不符合约定即可视为包内数据丢失。

在数据发生丢失时,由于数据接收流程为固定长度接收模式,丢失的数据未达到结束接收的约定值时

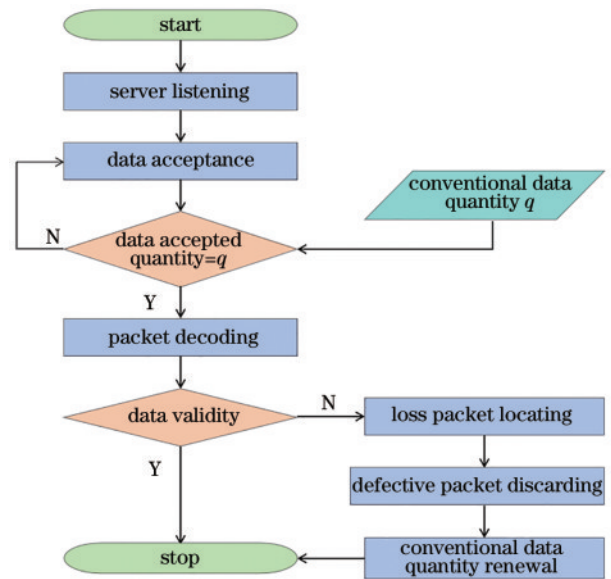


图 5 数据接收校验流程

Fig. 5 Flowchart of data receiving verification

会继续接收下一段光纤测量数据,造成残缺数据与部分完整数据粘连。数据纠错流程在接收的数据中查找残缺数据的标志位置,并将标志前部分丢弃,保留正确数据的前段信息。同时根据标志的位置计算正确数据后段的数量,更新下一数据包的约定长度阈值,从而实现数据接收正确性校验与纠错的功能。

## 4 系统测试及结果分析

为验证系统的温度传感性能及无线远程监测的功能,在系统现场传感端的传感光纤上设置一段温度变化区,控制温度变化区的温度从 40 °C 逐渐上升到 80 °C,并采集 5 组系统远程无线监测端上位机(PC 2)实时接收的数据进行分析。

系统远程监测界面如图 6 所示。拉曼分布式光纤传感远程监测端上位机的主要功能有控制温度测量状

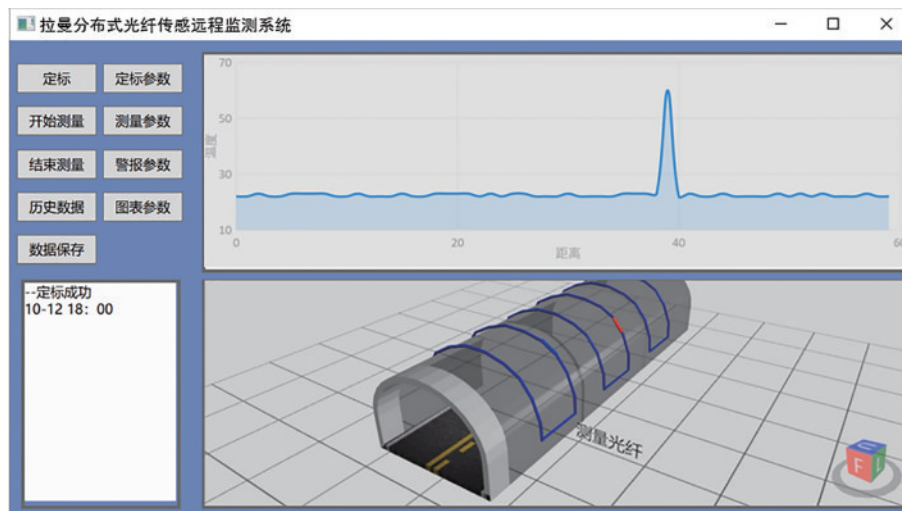


图 6 无线远程监测端上位机界面图

Fig. 6 Upper computer interface diagram of wireless remote monitoring terminal

态、无线传输数据校验与纠错、温度与光强曲线显示、报警显示、历史查询、系统参数设置等,并可通过可视化界面直观展示温度分布情况,提升远程监测系统智能化水平。

对远程监测端所采集的 5 组温度数据进行分析,图 7 为不同温度下变温区范围(1057~1058 m)内的温度曲线,图 8 为系统的测温精度。可得出无线远程监测采集温度与实际温度的差异范围为 $-1.0\sim 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,监测结果在拉曼分布式光纤系统的测温精度正常范围内。因此,本系统温度传感监测具有有效性,并且无线数据传输不影响光学传感系统测温精度指标,无线远程监测系统可以准确还原现场监测情况。

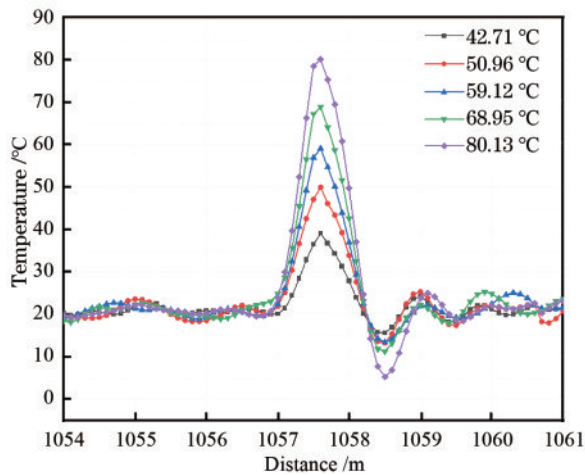


图 7 远程监测端接收温度数据结果

Fig. 7 Results of temperature data received at remote wireless monitoring terminal

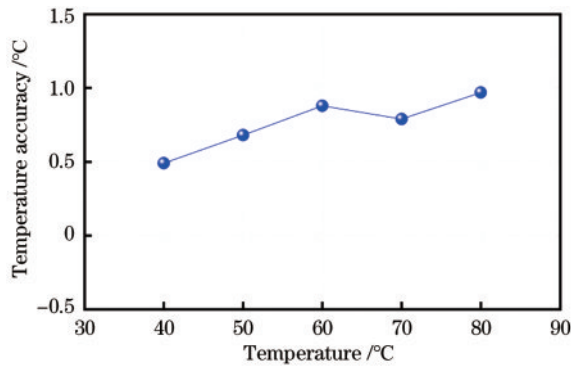


图 8 系统测温精度

Fig. 8 System temperature measurement accuracy

测试共发送 101.56 kB 数据,系统远程监测端共接收 101.17 kB 数据,包含数据校验流程中主动丢弃的残缺数据,本次实验共丢失 0.39 kB 数据,平均丢包率为 0.38%。根据《基础设施无线传感网络监测技术规程》<sup>[24]</sup>中“无线传感网络无线传输平均数据丢包率不应高于 5%”的要求,本系统传输的平均数据丢包率符合规程,满足大量数据在无线传输下的远程监测数据可靠性要求。

通过对比数据发送时间与远程接收时间得出,本系统单次测量数据的平均传输时间约为 3 s(表 1),可以实现远程监测温度实时显示,符合监测系统实时性需求。

表 1 拉曼分布式光纤温度传感系统的性能参数

Table 1 Performance parameters of Raman distributed optical fiber temperature sensing system

Parameter	Value
Temperature measurement accuracy / $^{\circ}\text{C}$	$-1.0\sim 1.0$
Spatial resolution /m	1.0
Sensing distance /km	10.0
Temperature range/ $^{\circ}\text{C}$	$-30\sim 120$
Measuring time /s	$\sim 3$

## 5 结 论

针对光纤传感无线监测研究中存在的局限,设计了基于 4G DTU 的拉曼分布式光纤温度传感远程监测系统。该系统结合拉曼分布式光纤温度传感装置与 4G 数据无线传输模块,实现温度传感分布式数据无线传输,相较于点对点无线传输提高了传输速度与监测效率。通过设计数据指令混合传输格式与数据传输校验纠错程序,增强了远程监测自动化与智能化水平,系统采用了数据帧格式与数据接收校验纠错程序,保证了系统在高传输速度下监测的准确性与稳定性。该系统可实现拉曼分布式光纤现场传感端与无线远程监测端双向指令,对于工业安全领域大型光纤监测项目的实时性监测与实用性具有积极意义。

随着 5G 无线通信技术趋于成熟,未来该技术在拉曼分布式光纤温度传感无线远程监测系统中的应用可以进一步提升系统的数据传输效率和网络容量,有利于提高系统的数据传输速度和实现更长距离的温度监测。

## 参 考 文 献

- [1] 李健, 范卜文, 程姿嘉, 等. 多阶时域差分重构相关法拉曼分布式光纤传感[J]. 光学学报, 2024, 44(1): 0106025.  
Li J, Fan B W, Cheng Z J, et al. Raman distributed optical fiber sensing based on multi-order time domain differential reconstruction correlation[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(1): 0106025.
- [2] 付彩玲, 彭振威, 李朋飞, 等. OFDR 分布式光纤温度/应变/形状传感研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(11): 1106007.  
Fu C L, Peng Z W, Li P F, et al. Research on distributed fiber temperature/strain/shape sensing based on OFDR[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(11): 1106007.
- [3] 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.
- [4] 孙苗, 汤玉泉, 杨爽, 等. 提高分布式温度传感器测温准确度的降噪方法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(19): 1906003.
- Sun M, Tang Y Q, Yang S, et al. Noise reduction method to improve temperature measurement accuracy of distributed temperature sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(19): 1906003.
- [5] 申文博, 张东生. 弯曲损耗对分布式光纤拉曼测温解调的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(5): 0506004.
- Shen W B, Zhang D S. Influence of bending loss to demodulation on distributed fiber Raman temperature measurement[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(5): 0506004.
- [6] 刘德明, 孙琪真. 分布式光纤传感技术及其应用[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(11): 29-33.
- Liu D M, Sun Q Z. Distributed optical fiber sensing technology and its applications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(11): 29-33.
- [7] Datta A, Sankar V, Srinivasan B. Challenges and opportunities in distributed anti-Stokes Raman thermometry[J]. ISSS Journal of Micro and Smart Systems, 2022, 11(1): 179-206.
- [8] Ren L, Jiang T, Jia Z G, et al. Pipeline corrosion and leakage monitoring based on the distributed optical fiber sensing technology[J]. Measurement, 2018, 122: 57-65.
- [9] Amira Z, Mohamed B, Tahar E. Monitoring of temperature in distributed optical sensor: Raman and Brillouin spectrum[J]. Optik, 2016, 127(8): 4162-4166.
- [10] Dong L X, Qiao Z Y, Wang H N, et al. The gas leak detection based on a wireless monitoring system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(12): 6240-6251.
- [11] 钱志鸿, 王义君. 面向物联网的无线传感器网络综述[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(1): 215-227.
- Qian Z H, Wang Y J. Internet of things-oriented wireless sensor networks review[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(1): 215-227.
- [12] Wang Y L, Qi C S, Pan H J. Design of remote monitoring system for aquaculture cages based on 3G networks and ARM-andriod embedded system[J]. Procedia Engineering, 2012, 29: 79-83.
- [13] Wu Z H, Sekar R, Hsieh S J. Study of factors impacting remote diagnosis performance on a PLC based automated system[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2014, 33(4): 589-603.
- [14] 何健辉, 张进才, 陈勇, 等. 基于弱光栅技术的地面沉降自动化监测系统[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(1): 146-153.
- He J H, Zhang J C, Chen Y, et al. Automatic land subsidence monitoring system based on weak-reflection fiber gratings[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(1): 146-153.
- [15] 孙利民, 蔡海文. 采用光纤光栅及无线智能传感技术的桥梁结构健康监测研究取得重要进展[J]. 中国激光, 2006, 33(1): 96.
- Sun L M, Cai H W. The research of bridge structural health monitoring system based on fiber grating and wireless intelligent sensing technology has made important progress[J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(1): 96.
- [16] 杨浩. 基于光纤光栅的桥梁索力无线监测系统的设计[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008: 20-22.
- Yang H. The design of the wireless monitoring system based on optic fiber sensing for the tension of bridge[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008: 20-22.
- [17] 张彦军, 乔锐, 翟成瑞, 等. ZigBee无线漏水监测系统的设计[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(4): 92-96, 132.
- Zhang Y J, Qiao R, Zhai C R, et al. Design of ZigBee wireless water leakage monitoring system[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2021, 40(4): 92-96, 132.
- [18] 刘超. 基于短距离无线通信与光纤传感技术的输电线路覆冰监测系统的研制[D]. 太原: 太原理工大学, 2013: 5.
- Liu C. Development of transmission line icing monitoring system based on short-distance wireless communication and optical fiber sensing technology[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2013: 5.
- [19] 蒋金洲, 吕国辉, 梁晨, 等. 基于光纤光栅传感技术的高速铁路轨道状态远程监测数传系统[J]. 铁道建筑, 2015, 55(1): 76-79.
- Jiang J Z, Lü G H, Liang C, et al. Remote monitoring data transmission system based on FBG (fiber Bragg grating) sensing technique for supervising high speed railway track conditions[J]. Railway Engineering, 2015, 55(1): 76-79.
- [20] Liu X H, Li D H, Xun S C, et al. Power monitoring system based on 4G network wireless transmission[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2260(1): 012062.
- [21] Liu Q, Wang J, Zhao H. Buses running state based on the technology of 4G wireless monitoring system research[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 602/603/604/605: 2407-2410.
- [22] Zhang Q, Yang X L, Zhou Y M, et al. A wireless solution for greenhouse monitoring and control system based on ZigBee technology[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2007, 8(10): 1584-1587.
- [23] 袁小平, 徐江, 侯攀峰. 基于物联网的智慧农业监控系统[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(3): 376-378.
- Yuan X P, Xu J, Hou P F. Intelligent agricultural monitoring system based on the internet of things[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2015, 43(3): 376-378.
- [24] 中国土木工程学会. 基础设施无线传感网络监测技术规范[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021: 22.
- China Civil Engineering Society. Technical specification for infrastructure by wireless sensor network[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021: 22.