



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2402229

引用格式:王惠明,刘志明,何娜,等.复杂环境山地灾害监测智能感知与数据传输关键技术[J].科学技术与工程,2025,25(2):640-648.

Wang Huiming, Liu Zhiming, He Na, et al. Intelligent sensing and data transmission key technology for monitoring mountain hazards in complex environments[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(2): 640-648.

电子技术、通信技术

复杂环境山地灾害监测智能感知与数据传输关键技术

王惠明¹,刘志明²,何娜³,朱星^{4,5*}

(1. 水电水利规划设计总院有限公司,北京 100120; 2. 成都理工大学核技术与自动化工程学院,成都 610059;
3. 广西壮族自治区地质环境监测站,南宁 530022; 4. 成都理工大学计算机与网络安全学院,成都 610059;
5. 四川省工业互联网智能监测与应用工程技术创新中心,成都 610059)

摘要 针对青藏高原复杂环境山地灾害监测预警存在“感知不及时、传输不出去、设备部署难”的技术难题,研制了适用于高位高危山地灾害变形与微动监测的无人机抛投式监测装置、LoRa 组网及边缘计算网关等嵌入式软硬件设备,重点研究了低功耗自适应数据采集算法和射频频次自适应技术,开发了基于 LoRa、北斗 RDSS 的自组网路由算法和多模态通讯智能切换技术,破解复杂环境数据感知及时性、低功耗与环境适应性难题。结果表明:所研发的系统现场试点应用效果良好,符合高寒山区山地灾害长期监测要求,极端环境下数据传输平均丢包率为 2.328 8%,为高寒复杂山区重大工程建设及运营的防灾减灾提供了新技术、新方法。

关键词 物联网传输;自适应技术;LoRa 技术;北斗 RDSS 协议

中图法分类号 TN98;

文献标志码 A

Intelligent Sensing and Data Transmission Key Technology for Monitoring Mountain Hazards in Complex Environments

WANG Hui-ming¹, LIU Zhi-ming², HE Na³, ZHU Xing^{4,5*}

(1. China Renewable Energy Engineering Institute, Beijing 100120, China; 2. The College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3. Guangxi Zhuang Autonomous Region Geological Environment Monitoring Station, Nanning 530022, China; 4. College of Computers and Cyber Security, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 5. Sichuan Engineering Technology Research Center of Industrial Internet Intelligent Monitoring and Application, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

[Abstract] Aiming at the technical problems of "untimely perception, poor transmission and difficult equipment deployment" in the monitoring and early warning of mountain disasters in the complex environment of the Qinghai-Tibetan Plateau, a UAV-throwing monitoring device, LoRa networking and edge computing gateway, as well as other embedded hardware and software equipment applicable to deformation and micro-motion monitoring of high-level and high-risk mountain disasters were developed, and focused on the research of the system low-power adaptive data acquisition algorithm and RF frequency adaptive technology, were developed the self-organised network routing algorithm based on LoRa and Beidou RDSS, as well as the multimodal communication intelligent switching technology, so as to solve the problems of timeliness of data perception in complex environments and the problems of low-power consumption and environmental adaptability. The results show that the developed system had a good on-site pilot application effect, which meeting the requirements for long-term monitoring of mountain disasters in alpine mountainous areas, and the average packet loss rate of data transmission in extreme environments is 2.328 8 percent, providing new technologies and methods for disaster prevention and mitigation in the construction and operation of major projects in alpine and complex mountainous areas.

[Keywords] IoT transmission; adaptive technology; LoRa technology; Beidou RDSS protocol

收稿日期:2024-03-28; 修订日期:2024-11-05

基金项目:中国电建集团科技项目(DJ-ZDXM-2020-3);第二次青藏高原综合科学考察研究资助项目(2019QZKK0201)

第一作者:王惠明(1962—),男,汉族,浙江嘉兴人,正高级工程师。研究方向:水电工程地质勘察与咨询。E-mail:wanghm@creei.cn。

*通信作者:朱星(1984—),男,土家族,湖南张家界人,博士,研究员。研究方向:地质灾害监测仪器与物联网技术、边缘计算、人工智能交叉学科。E-mail:zhuxing_84@qq.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

中国青藏高原地质条件复杂,地质灾害频发^[1-3],重大工程面临严重威胁,亟需对山地灾害灾变特征及前兆信号进行实时监测,但其极端恶劣环境使得在该地区进行山地灾害监测的数据采集与通信技术面临严峻挑战。一是监测站部署难度大,高位高危崩塌、滑坡等灾害点人迹罕至,传统监测设备因体积大、组装调试过程复杂则在此区域搬运、布设和安装难以实现;二是监测功耗高、实时性差,难以实现对突发性山地灾害的精准感知监测;三是无公共数据网络覆盖,数据高效实时传输成为阻碍科学监测预警的技术瓶颈。鉴于此,本文研究了一种低功耗、智能化、一体化的多元信息感知节点,提出了一种具备自适应感知数据采集功能的低功耗嵌入式算法,创新性构建了感知、传输、供电一体化的抛投式装置与安装工艺,研发了 LoRa/北斗自组网的星地互联数据通信技术,为高原极端复杂环境高位高危山地灾害的监测预警提供一种新型解决方案。

目前,文献[4-8]无线组网技术已经非常成熟,但是受限于其通信距离短,存在需要地面基站辅助问题,难以实现对较大范围内的监测设备进行组网。吴艺豪等^[9]设计的基于远程无线通信技术(long range wireless transmission technology, LoRa)的山地灾害数传系统能够解决部分的区域覆盖和组网问题,但在极端环境下的数据传输技术上仍面临低功耗、自适应组网、网络故障自恢复等方面的极大挑战。4G 作为公共服务通信网络往往在高寒复杂山区覆盖能力弱,张恩华^[10]设计基于 4G + LoRa 的物联网遥测终端(remote terminal unit, RTU)进行远程的数据通信,其前提是需要附近具有 4G 基站,否则远程多跳传输将会带来巨大的不确定性和弱稳定性。更多组合式物联网传输手段也逐渐被提出,例如:北斗无线导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)^[11-12]、北斗数传终端^[13]、LoRa + 北斗数传终端^[14-16]等,这些技术在一定程度上都解决了复杂地区通信难的问题,但都局限于单站点原始数据直接采集与传输,没有形成有效的高效数据采集方法与组网传输方案,监测系统的鲁棒性欠佳。综合分析已有研究的优劣势,为解决高寒山区复杂的山地灾害监测数据通信问题,LoRa、4G 和北斗短报文的多元组合与自适应切换关键通信技术能够实现超远程通信、快速应急响应和无线传感网络组网,值得关注。

为实现高寒山区地质灾害的全天候监测预警,同时克服环境恶劣、通信距离短、施工难度大、能量补给难等问题,现设计一整套基于无人机部署智

能感知节点、通信网关节点和巡航检测的 LoRa + 4G + 北斗的无线传感通信网络组网方案,实现在通信基础设施缺乏的环境下的全覆盖低功耗自组网数据监测和远程通信系统。以期克服对地面基地站的依赖,同时提高无线传感网络的功能性。

1 系统总体设计框架

本文所设计的高寒复杂山区地质灾害监测物联网传输关键技术包括山区无线传感及组网物联网通信技术和远程多模态应急响应通信方法两部分。系统的整体结构如图 1(a)所示。①山区无线传感网络由采集节点和网关节点组成,其中传感采集节点可采用抛投式部署并内置了 LoRa 通信模组与内置 LoRa 模组的网关节点共同组成本地局域网;②常规的远程数据传输可通过无人机中继、无人机机库巡航采集网关节点上储存的数据,在返回至地面部署的机库后进行 4G 的远程数据传输;③而发生需要快速响应或无人机无法执行任务时的远程应急响应通信则由北斗短报文\数传终端承担应急传输任务,网关节点在通信条件缺乏时可将数据打包处理为北斗短报文等格式传输给北斗终端,再由短报文数据卫星传输给超远程的应急中心。传感采集节点、网关节点均采用低功耗微控制单元(micro control unit, MCU)、LoRa 通信模块和各类传感器构成主要的部分,可对采集的如倾角加速度、微震、温湿度、三维定位等数据进行实时的处理与边缘解算。传感网络采用 LoRaWAN(long range wide area network)协议^[17]和星型无线拓扑组网结构^[18]实现组网,设计了频分复用技术实现中继 LoRa 网关实现多个独立的无线传感网络的交流实现了与 Mesh 组网类似的无限中继功能,如图 1(b)所示。本系统能够在发生破坏性地质灾害时继续保持应急监测与响应的物联通信能力。

2 传感通信节点单元及组网网关的设计

2.1 传感采集节点设计

传感采集节点是最直接获取灾变数据的重要部分,同时也是本系统物联通信技术最重要、最基础的通信节点。基于此,本文研究的传感节点基于采集单元、主控单元、传输单元和供电单元 4 部分组成,采集单元可在仅做出少量修改的情况下替换为各类型传感器,感知不同类型的数据。如图 2 所示,采集单元对 2 个类型的数据进行采集分别是加速度和倾角, L3G4200D 陀螺仪感知的数据通过 IIC(inter-integrated circuit)协议传输, SCA3300 倾角仪

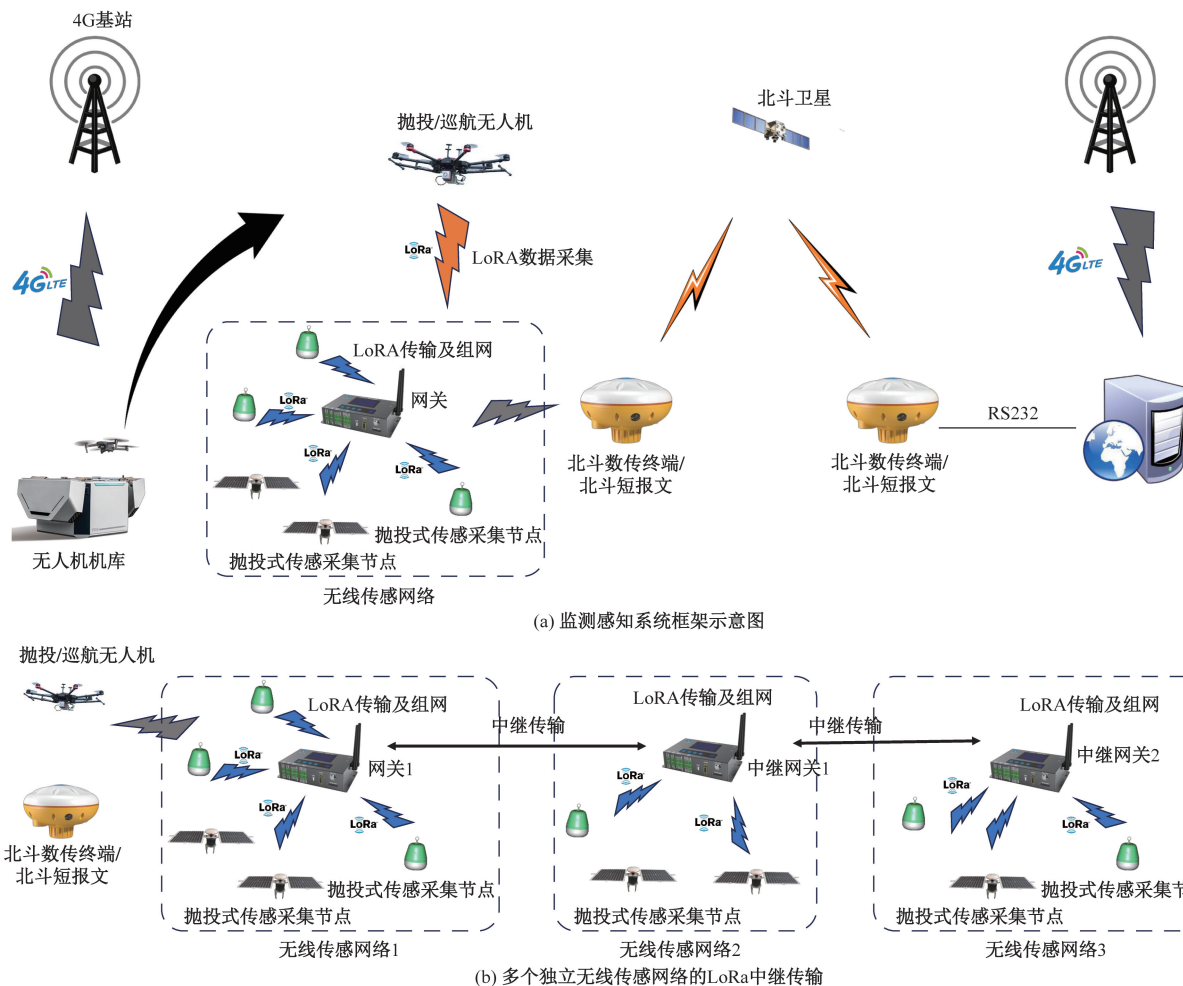


图1 系统整体框架及物联数据传输方式示意

Fig. 1 Schematic of the overall system framework and IOT data transmission mode

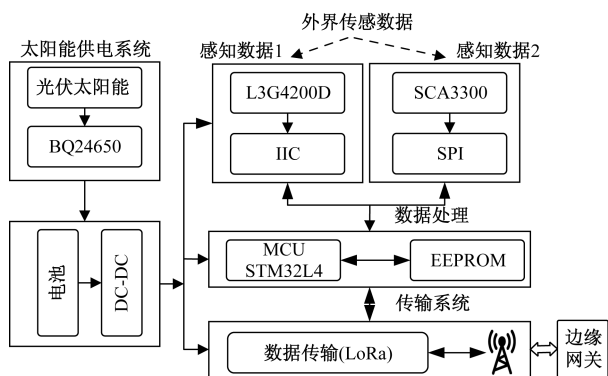


图2 采集节点整体设计框架

Fig. 2 Overall design framework of the acquisition node

数据通过 SPI (serial peripheral interface) 协议传输, 数据经过内部滤波至主控单元; 主控单元采用 STM32L4 系列作为主控单元, 其根据 MEMS (micro-electro-mechanical system) 芯片监测数据在低功耗睡眠模式和正常工作两种模式进行切换, 并将数据按照一定协议传输至 LoRa 和保存至 EEPROM (electrically erasable programmable read only memo-

ry), 使其在不失性能的情况下降低整机功耗; 传输单元选用亿佰特的 E32, 其具有睡眠模式和空中唤醒机制, 传输距离可达 3 km 以上, 满足本研究低功耗、远距离传输要求; 供电单元采用 3.7 V 锂电池大容量高低温锂电池为整机进行供电, 同时内置电源管理芯片, 能够有效地实现对设备电量进行管理。

2.2 LoRa 网关节点

一个完整的 LoRa 系统应该有 LoRa 节点、LoRa 网关、LoRa 网络服务器和 LoRa 应用服务器 4 大部分组成^[19]。LoRa 网关的整体架构如图 3 所示, 由电源、Linux 逻辑模块、射频信号处理模块、调制解调模块共同组成。调制解调选用 Semtech 的 SX1301 单元处理芯片, 其属于 LoRa 调制的基带芯片对挂在多个无线传感节点的星型网络具有很好的适应性。具有 -142.5 dBm 的接收灵敏度和 49 个 LoRa 虚拟通道, 以及即速率自适应 (adaptive data rate, ADR) 等技术加持, 在 SX1301 基础上, 本文研究架构将外接 2 块 SX125x (433 MHz 为 SX1255, 470

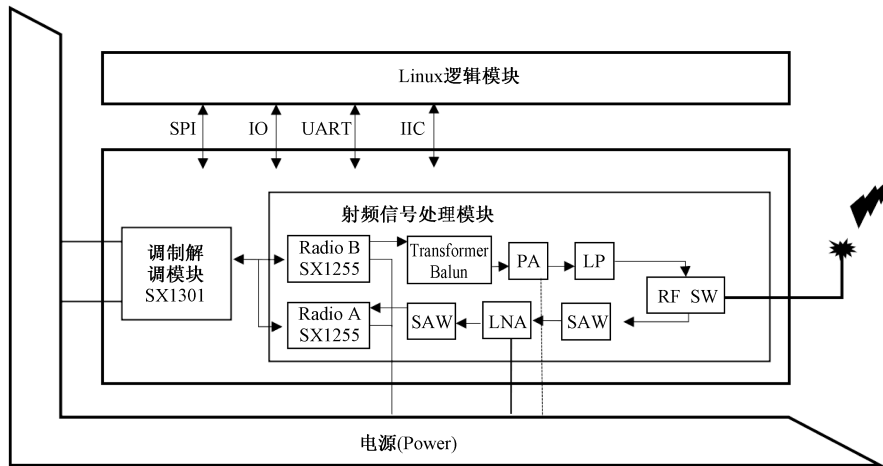


图3 LoRa 网关系统架构图

Fig. 3 LoRa gateway system architecture diagram

MHz 为) 射频前端芯片, 主要职能为将 I/Q (In-phase/Quadrature) 同相正交数字信号转换成无线电模拟信号, 同时 SX1301 内置的两块集成 MCU 分别可以管理射频和数据包。2 个前端芯片 SX125x 分别监听 4 个 LoRa 信道, 同时 Radio B 担任了发射信号的工作, 额外与 SX1301 有 1 个引脚的连接, 在图 3 中用双箭头表示。在后面的电路中接入了传输线变压器型巴伦滤波器 (transformer balun, TB) 将平衡差分信号转化为非平衡信号, 以及声表面滤波器 (surface acoustic wave filter, SAW) 等进一步做模拟信号的处理。而 Linux 逻辑模块为节省时间成本采用 Raspberry Pi 3 Module B+, 负责整个网关的逻辑代码运行、以及网络协议、嵌入式边缘算法等, 其也支持所需的 SPI 等通信协议。

2.3 自适应射频通信频次与变频采集感知关键技术

本小节主要介绍传感采集节点和网关节点的低功耗技术, 主要方法均为设备嵌入自适应算法^[20], 解决了功耗以及数据冗余的问题。自适应采集和射频通信频次技术其核心思想是平滑度的计算, 根据一段时间采集数据的平滑度动态调整数据采集的时间间隔。具体思想如下: 当前时刻传感器数据为 S , 时间序列性质的数字信号当前读数模块输出的数据可由 S_i 表示, 其中 $i = 1, 2, \dots$ 。平均值 \bar{S}_n 结合数据的平均变化值 \bar{S}_m 可以将平滑度锁定在一个固定的区间范围, 再利用数据的平均变化值 \bar{S}_m 和平均值 \bar{S}_n 可以得到更加合理的平滑度结果 \bar{S}_{mn} , 设定 $t(t > 0, s)$ 时间范围内采集到了 i 个数据, 则数据的平均变化值 D_j , 其中 j 为数据平均值序列。

$$\bar{S}_{mn} = \frac{\bar{S}_m}{\bar{S}_n} = \frac{j(|S_i - S_{i-1}| + |S_{i-1} - S_{i-2}| + \dots + |S_2 - S_1|)}{i(D_1 + D_2 + \dots + D_j)} \quad (1)$$

经过测试 LoRa 终端电量消耗最大的功能为数据包的发送, 其工作电流可达到 100 ~ 120 Ma, 而接收数据所消耗的能量不到发送数据的 10%, 发送数据的频率与设备功耗之间的关系密切相关。对于高寒山区能量补充与通信困难的环境而言, 建立传感数据与射频通信频次的耦合关系, 自动化动态调整射频通信频次对电子设备的低功耗具有重要的意义。而这一部分的实现方式较为复杂, 简要地概述为, 传感器数据经过产生相位移动的滤波 (图 4) 之后, 假设获取到 10 个传感值, 分别用 $S_1 \sim S_{10}$ 表示, 设有变量 K_{ms} , 其表达式为

$$K_{ms} = |S_{10} - S_1| \quad (2)$$

设定阈值为 $K_{thre} = 0.01$, 变量为 G , 权重值变量 K_{we} , 若 $K_{ms} > K_{thre}$ 并且当前 $K_{we} < 1$, 则变量 G 按照系数 $G_a = 0.008$ (可变) 累加且计算 K_{we} , 若 $K_{ms} \leq K_{thre}$ 且连续 3 个 $K_{ms} > 0$, 则变量 $G = G/16$ 且计算 K_{we} 。假设现有增益系数 $G_b = 10$, 权重值 K_{we} 的表达式为

$$K_{we} = e^{G_b G} - 1 \quad (3)$$

当传感数据发生波动时, 权重值迅速增加, 促使射频通信频次快速调整。

现假设有射频通信频次 T_s , 常量 $a = 4$, 常量 $b = 5$, 则 T_s 为

$$T_s = b - aK_{we} \quad (4)$$

由式(4)可得, 计算得到的 T_s 便是下一次射频通信频次, 而 T_s 的值是受采集到的传感数据的变化

而变化的,则利用 T_s 来动态的表征射频通信频次。

以上研究解决了:①减少对无效过程信号的误报、多采,降低系统整体的运行功耗,延长设备寿命;②提升对随机有效突变事件全过程的及时响应,减少漏报、漏采。

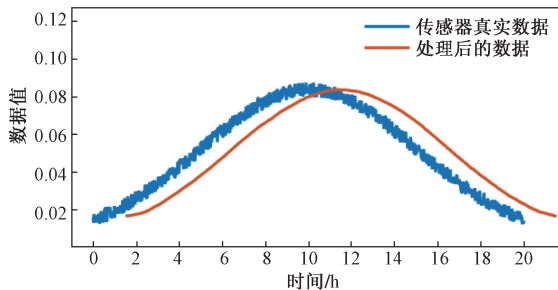


图4 传感器数据耦合预处理仿真

Fig. 4 Sensor data coupling preprocessing simulation

3 远程通信和组网关键技术的实现

3.1 北斗通信模块设计

在部分 Sink 网关节点上集成了 RDSS (radio determination satel-lite system) 北斗短报文通信模块以应对更加恶劣的应急通信环境,采用的上海复控华龙 FHM2630 板卡集成了发射频芯片, PA 电路、LNA 电路。RDSS 协议每次通信带宽为 78 B,通信频次为 1 次/min。在这部分节点上北斗短报文模块与 LoRa 模块有连接,由北斗短报文板卡内置的 MCU 和存储器,对 LoRa 获取的数据进行打包为北斗短报文的通信格式进行储存和远程的数据传输,通过系统的授时也由 RDSS 提供。在 RDSS 协议中数据的收发需要根据一定的格式编码,在表 1 中对发送数据的编码格式做简要的解释,由于 RDSS 4.0 协议编码复杂限制太多,故采用 RDSS 2.1 协议,且为混合编码模式,在混合编码模式下 A4 占用 1 个字节用户内容则为 77 个字节。

表 1 RDSS2.1 数据收发

Table 1 RDSS2.1 data sending and receiving

指令示例	参数	功能介绍
	\$	开始字符
	CCTXA	关键字,通讯申请
\$ CCTXA,	0000000	收件人地址 ID
0000000,	1/0	1 为普通通信;0 为特快通信
1/0,2/1/0,	2/1/0	2 为混合编码;1 为代码编码;
A48963		0 为汉字编码
8D987	A4	混合编码标识,发送抑制提示
H239C * 7F	89638D987H239C	用户内容(GBK 编码)
	7F	异或校验

3.2 传感网络组网

在高位高危地区的监测物联系统最底层应该

具备无线传感网络的一些基本性质:网络自组织、健壮性、场景相关性、动态拓扑性和多跳性。在新的传感采集节点加入网络时也能够很快融入网络,同时对于 LoRa 传输范围有限的情况下,多个独立的无线传感网络的 LoRa 网关可以进行多跳的数据传输到某一指定的“基站网关”以克服距离问题,以便无人机巡航收集数据时能够减少飞行距离。图 5 展示了无线传感网络的组网与多跳数据传输管理,在其中设计了 2 个最重要的算法以增加组网和多跳传输的有效性:①基于 K-means++ 聚类算法的分簇聚类组网,最优化传感采集节点与网关节点的通信距离;②基于 Astar 启发式算法的多跳数据传输路径寻优。其核心目的都是基于能量损耗模型的低功耗优化,发送能耗与距离的关系式为

$$E_c = \begin{cases} lE_{elec} + l\epsilon_{amp}d^2, & d < d_0 \\ lE_{elec} + lf_{amp}d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: d 为收发节点之间的距离; ϵ_{amp} 为自由空间模型特征常数; f_{amp} 为多径衰减模型的特征常数; E_{elec} 为发射电路的单位能耗; $d_0 = \sqrt{\epsilon_{amp}/f_{amp}}$ 为距离阈值。

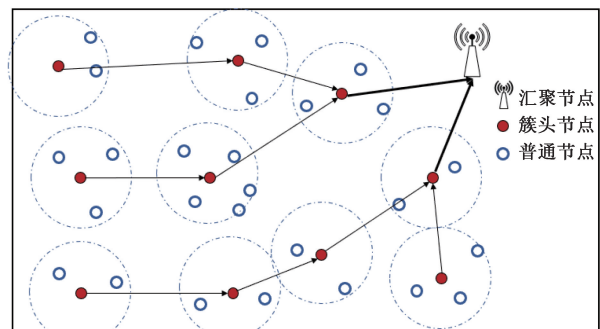


图5 无线传感网络组网与多跳数据传输示意图

Fig. 5 Schematic diagram of wireless sensor network networking and multi-hop data transmission

网关节点发起组网要求和传感采集节点加入网络的路由算法过程是十分复杂的,受篇幅影响这儿只是对网关节点发起的流程进行介绍,如图 6 所示。

4 测试与分析

传感采集节点的部署通过无人机进行野外的抛投,抛投后测试数据能否正常通过 LoRa 无线传输到网关节点并被终端用户读取分析数据,结果显示传感采集节点的完整数据在记录和传输功能上都为收到部署方式的影响,测试过程如图 7 所示。

在本次测试中传感采集节点采集倾角形变数

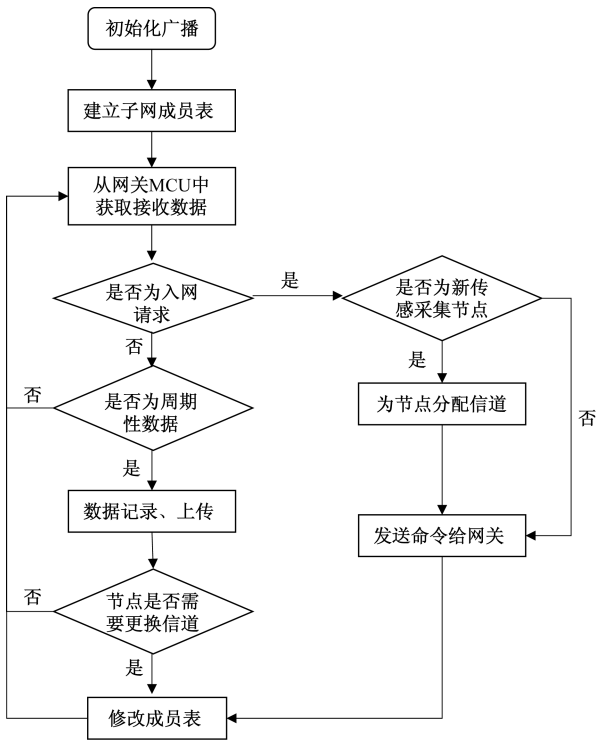


图6 节点入网流程图

Fig. 6 Flowchart of node on-boarding

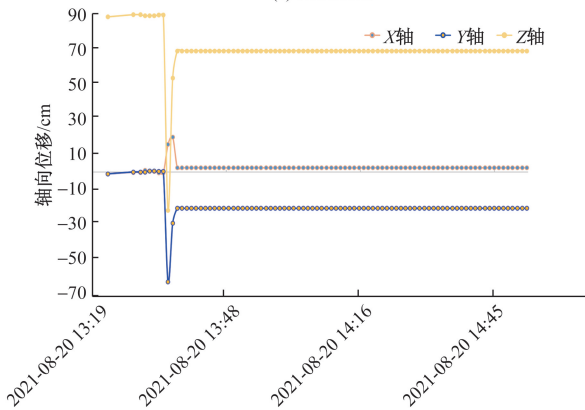
据和加速度信息,通过 LoRa 无线传输至网关节点,网关节点空中唤醒获取数据,采用 LoRa 采集节点定时上发,测试结果显示在中间有山体阻隔的情况下 5.421 km 内能够稳定传输数据,如图 8 和图 9 所示。

北斗 RDSS 的测试按照北斗用户终端 RDSS 单元性能要求及测试方法(BD 420012—2015)^[21]的相关要求进行测试,数据包发送时间间隔为 1 min。根据黄正睿等^[15]的研究可知丢包率与北斗短报文模块天线摆放位置、天线所接收到的北斗卫星波束的数量、波束强度及网关所处工作环境有关,故为了尽可能模拟青藏高原通信环境,在四川西部凉山彝族自治州无人山区进行测试,环境温度低于 -5 ℃,山区内在线北斗卫星数量在 2 或 3 个,波束数量 3 或 4 个通信环境相较于城区恶劣,测试结果如表 2 所示,平均丢包率为 2.328 8% 符合在高寒无人山区地质灾害监测预警系统要求的稳定性范围内。

为了验证 LoRa 可以作为其他通讯传输手段的有效互补工具,本文研究在更多长周期定时环境数据采集的传感设备上进行了与 4G 协议联动的超远程数据回传,验证数据传输链路的稳健性能。如图 10



(a) 抛投过程



(b) 设备监测数据曲线

图7 传感采集节点抛投测试

Fig. 7 Sensor acquisition node throw test



图8 LoRa 传输设备

Fig. 8 LoRa transmission equipment

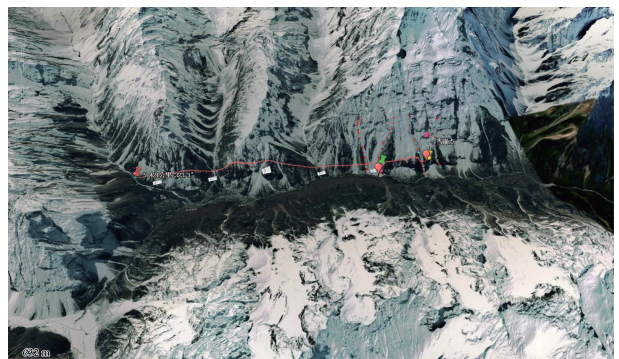


图9 野外现场测试

Fig. 9 Field site testing

表 2 模拟高寒山区下的丢包测试

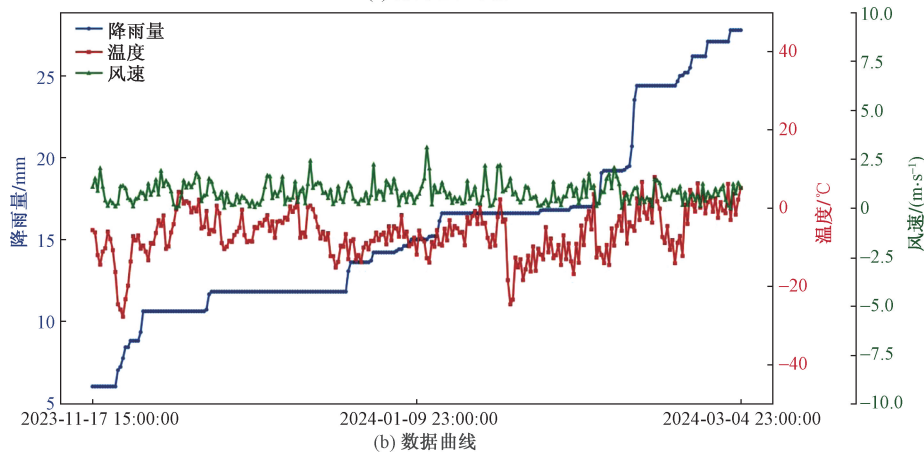
Table 2 Simulated packet loss test under alpine mountains

序号	通信节点 间距/km	发送报 文数	接收报 文数	丢包率/%
1	4	110	108	1.82
2	4	89	86	3.37
3	4	90	89	1.11
4	4	92	90	2.17
5	8	67	65	2.98
6	8	82	81	1.22
7	8	80	77	3.75
8	8	120	117	2.5

是在西藏林芝市波密县多格烈村所属的一处冰雪灾害监测试验点 (95°49'59.196"E,30°2'44.473"N),海拔高度位于 3 100 ~ 3 250 m,年均气温 8.5 ℃,年均降水量 876.9 mm,测试地附近山地高处常年积雪覆盖且有山体阻隔符合现实应用的实际地理环境情况。远程端在线平台能够定时接收到此地回传至数据库的环境数据,图 10(b)中的时间段内累计雨量值渐进上升、风速风向保持稳定、温度呈现昼夜交替波动,环境温度值在 -23 ~ 5 ℃ 区间属于高寒环境,风速风向由于山体的阻隔相对较小,区间内累计降雨量 22 mm。结果表明,数据传输性能稳定,数据质量高。



(a) 测试地理环境



(b) 数据曲线

图 10 长周期环境数据传输测试
Fig. 10 Long-cycle environmental data testing

5 结论

随着一系列重大工程在青藏高原的实施,以及全球变暖对冰川堆积、降雪溶解、降雨量和温度变化的影响,在高寒高原开展对地质灾害及其次生灾害链的监测预警刻不容缓。本文研究在此大背景下对高寒山区山地灾害监测预警的数据感知和物联传输关键技术进行了进一步的探索,实现了 LoRa 和北斗短报文联合通信更加好的结合,对数据的智能化采集及传输方式、无线传感网络组网模式进行了优化,同时对在高寒山区部署的传感采集节点进行了升级,设计了抛投式部署的新型 LoRa 传感节点。使高寒山区地质灾害监测物联应急响应通信系统的可靠性和有效性得到极大的提升,但诸多实现方式上仍有欠缺,未来应该结合灾害应急管理响应方案设计更加完整的云-边协同系统,以及设计生命周期更长的监测预警网络。

参 考 文 献

- [1] 巨淑君,高志良,蒋明成,等. 大渡河流域时序 InSAR 地质灾害监测[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(31): 13234-13242.
Ju Shujun, Gao Zhiliang, Jiang Mingcheng, et al. Time-series InSAR geohazard monitoring in Dadu River Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(31): 13234-13242.
- [2] 陈林,王超深,等. 青藏高原东缘地区强震灾害演进特征及减灾对策[J]. 城市与减灾, 2024(1): 44-48.
Chen Lin, Wang Chaoshen. Characteristics of strong earthquake disaster evolution and countermeasures for disaster mitigation in the eastern edge of the Tibetan Plateau[J]. Cities and Disaster Mitigation, 2024(1): 44-48.
- [3] 铁永波,葛华,高延超,等. 二十世纪以来西南地区地质灾害研究历程与展望[J]. 沉积与特提斯地质, 2022, 42(4): 653-665.
Tie Yongbo, Ge Hua, Gao Yanchao, et al. Research history and prospect of geologic hazards in Southwest China since the twentieth century[J]. Sedimentary and Tethys Geology, 2022, 42(4): 653-665.
- [4] 王立新,郭凰,杨佳宇,等. 无线通信在结构健康监测系统的应用研究综述[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(6): 2229-2241.
Wang Lixin, Guo Huang, Yang Jiayu, et al. A review of research on the application of wireless communication in structural health monitoring system[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(6): 2229-2241.
- [5] 张安安,邓芳明. 融合无线传感器网络与射频识别的输电线路杆塔状态监测网络低延时技术[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(4): 1442-1447.
Zhang Anan, Deng Fangming. Low latency technology for transmission line tower condition monitoring network integrating wireless sensor network and radio frequency identification[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(4): 1442-1447.
- [6] Bansal S, Badhouthiya A. Zigbee wireless standard; economic efficiency and projection of expansion[C]//Proceedings of the 14th International Conference on Advances in Computing, Control, and Telecommunication Technologies. Hyderabad: Grenze Scientific Society, 2023: 1-9.
- [7] Huang B, Sun C. Research and implementation of wireless networking technology based on ZigBee[C]//Proceedings of the International Conference on Multi-modal Information Analytics. Virtual, Online: Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2021: 1-10.
- [8] Wang Y, Zheng G, Wang X, et al. Development and application of a goal-safety monitoring system using multi-sensor information fusion[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 94: 1-9.
- [9] 吴艺豪,王洪辉,孟令宇,等. 面向山区地质灾害监测的 LoRa 数传系统研制[J]. 中国测试, 2021(10): 137-142.
Wu Yehao, Wang Honghui, Meng Lingyu, et al. Development of LoRa digital transmission system for monitoring geological disasters in mountainous areas[J]. China Test, 2021(10): 137-142.
- [10] 张恩华. 地质灾害监测 RTU 的软件设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
Zhang Enhua. Software design and implementation of RTU for geological hazard monitoring[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2020.
- [11] 彭松,刘建坤,张云龙,等. 基于北斗三号远程监测系统的公路岩质边坡开挖变形分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(33): 14898-14906.
Peng Song, Liu Jiankun, Zhang Yunlong, et al. Deformation analysis of highway rocky slope excavation based on Beidou-3 remote monitoring system[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(33): 14898-14906.
- [12] Xi R, Jiang W, Meng X, et al. Bridge monitoring using BDS-RTK and GPS-RTK techniques[J]. Measurement, 2018, 120: 128-139.
- [13] 李泳池. 多种无线通信模块集成系统的设计与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.
Li Yongchi. Design and realization of integrated system of multiple wireless communication modules[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014.
- [14] 尹小俊,陈崇成,李瑞兴,等. 基于 LoRa 集成北斗通信技术的应急响应设计与实现[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 167-173.
Yin Xiaojun, Chen Chongcheng, Li Ruixing, et al. Design and realization of emergency response based on LoRa integrated Beidou communication technology[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2020, 48(2): 167-173.
- [15] 黄正睿,潘森鑫,陈崇成,等. 集成 LoRa 与 BDS 的应急环境监测数据获取与传输技术[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(4): 530-537.
Huang Zhengrui, Pan Miaoxin, Chen Chongcheng, et al. Emergency environmental monitoring data acquisition and transmission technology integrating LoRa and BDS[J]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2021, 46(4): 530-537.
- [16] Luo H, Ruan Z, Xiao L. 2.4 GHz LoRa wireless technology for internet of things; an experimental study[J]. Journal of Circuits, Systems and Computers, 2023, 32(6). DOI: 10.1142/S0218126623501013.
- [17] Paul B. An overview of LoRaWAN[J]. WSEAS Transactions on

- Communications, 2021, 19: 231-239.
- [18] Lee H C, Ke K H. Monitoring of large-area IoT sensors using a loRa wireless mesh network system; design and evaluation [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 67(9): 2177-2187.
- [19] 陈康. LoRa 与多跳网络结合的长距离通信研究[D]. 海口: 海南大学, 2023.
Chen Kang. Research on long-distance communication by combining LoRa and multi-hop network[D]. Haikou: Hainan University, 2023.
- [20] 朱星, 许强, 王浩. 一种自我调整采样频率的数据采集方法: CN2019113362037[P]. 2023-03-03.
Zhu Xing, Xu Qiang, Wang Hao. A data acquisition method with self-adjusting sampling frequency: CN2019113362037[P]. 2023-03-03.
- [21] 陈振, 王权, 秘金钟, 等. 新一代国际标准 RTCM V3.2 及其应用[J]. 导航定位学报, 2014, 2(4): 87-93.
Chen Zhen, Wang Quan, Sei Jinzhong, et al. New generation international standard RTCM V3.2 and its application[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2014, 2(4): 87-93.