

DOI:10.13382/j.jemi.B2508460

基于 LoRa Mesh 的智慧医疗测量系统*

梁欢¹ 简明² 刘娟¹ 刘莹¹ 许彦洁¹ 刘桢¹

(1. 四川省中医院/成都中医药大学附属医院 成都 610031; 2. 中国核动力研究设计院

成都中核海川核技术有限公司 成都 610041)

摘要:针对慢性病患者长期管理中对生理指标与环境因素同步监测的需求,设计了一种基于 LoRa Mesh 的智慧医疗测量系统。系统采用 RadioHead 协议栈实现自组织的多跳 Mesh 通信,部署于医院内分泌科住院部,结合环境感知与患者健康监测,节点通过 LoRa 模块传输数据至中央网关,并接入云服务器进行存储与可视化。通过扩展仿真平台 LoRaMeshSim,模拟了 74 个节点分布在 18 间病房与公共区域的场景,测试不同数据包长度与发送速率条件下的系统性能。实验结果显示,在数据发送速率为 1 包/h 时,系统数据投递率高于 99.5%;当发送速率升至 26 包/h 时,投递率下降至约 83.2%。同时,数据包长度增加导致信号冲突次数上升,150 bytes 数据包的平均冲突次数比 30 bytes 增加了约 2.1 倍。研究分析表明,系统在中低数据负载下具有良好的稳定性与扩展性,而在高负载条件下,信号冲突和节点收发冲突成为主要性能瓶颈。提出未来可通过自适应扩频因子与智能路由算法进一步提升系统稳定性与能效。此外,在实验室环境中搭建小规模 LoRa Mesh 网络进行实验验证,确认了系统在实际场景下的可用性与通信稳定性。

关键词: 智慧医疗; LoRa Mesh; 慢性病监测; 无线传感器网络; 数据投递率

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

LoRa Mesh-based smart medical measurement system

Liang Huan¹ Jian Ming² Liu Juan¹ Liu Ying¹ Xu Yanjie¹ Liu Ya¹

(1. Sichuan Provincial Hospital of Traditional Chinese Medicine, Chengdu 610031, China; 2. Nuclear Power Institute of China Chengdu Zhonghe Haichuan Nuclear Technology Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: A smart medical measurement system based on LoRa Mesh was designed to address the need for synchronized monitoring of physiological parameters and environmental factors in chronic disease management. The system employs the RadioHead protocol stack to achieve self-organized multi-hop mesh communication and is deployed within an endocrinology ward, integrating environmental sensing with patient health monitoring. Data from wearable terminals and environmental nodes are transmitted via LoRa modules to a central gateway and uploaded to a cloud server for storage and visualization. By extending the LoRaMeshSim simulation platform, the system was tested in a hospital scenario with 74 nodes distributed across 18 rooms and corridors, under varying payload lengths (30, 90, and 150 bytes) and transmission rates (1 to 26 packets per hour). Simulation results showed that the delivery rate remained above 99.5% when the packet generation rate was 1 packet per hour, but dropped to approximately 83.2% at 26 packets per hour. Moreover, increasing the packet length significantly elevated collision occurrences, with 150-byte packets encountering approximately 2.1 times more collisions than 30-byte packets. The analysis demonstrates that the proposed system maintains good stability and scalability under moderate to low data loads, while signal collisions and transceiver contention become critical challenges at higher loads. Future work will focus on introducing adaptive spreading factor adjustments and intelligent routing algorithms to further enhance the system's reliability and energy efficiency. In addition, a small-scale LoRa Mesh network was physically deployed in a laboratory setting to experimentally validate the system's communication reliability and practical applicability.

Keywords: smart healthcare; LoRa Mesh; chronic disease monitoring; wireless sensor networks; data delivery rate

收稿日期: 2025-06-12 Received Date: 2025-06-12

* 基金项目: 四川省科技计划(2024YFFK0085)项目资助

0 引言

随着物联网、第五代移动通信网络(fifth generation mobile network, 5G)与人工智能等新一代信息技术的快速发展,智慧医疗逐渐成为医疗行业的重要发展方向^[1]。尤其在慢性病管理和远程健康监测方面,医疗系统对低功耗、广覆盖、实时性和高可靠性的测量与通信系统提出了更高要求。智慧医疗不仅关注病人健康数据的实时采集与分析,更强调环境因素与病情之间的动态关系。

内分泌类慢性疾病,如糖尿病、甲状腺功能异常等,需要长期、稳定且精确的监测机制。一方面,应对患者本身的生理指标进行持续监测。例如,甲状腺功能亢进患者在日常生活中表现为不耐热^[2],而甲状腺功能减退患者则不耐寒^[3],需要对其体温进行长期监测;糖尿病患者则需进行动态血糖监测,以便有效调控血糖水平,延缓并发症的发生^[4]。另一方面,这类疾病与外部环境因素也存在显著相关性,因此有必要同步监测环境条件。Bogar等^[5]的研究指出,气温变化可能影响人体维持血糖稳态的能力;Jin等^[6]则发现,维持伤口周围适宜的湿度有助于促进糖尿病足创面组织的愈合。然而,传统的测量方法依赖医务人员频繁介入,不仅耗费大量时间和精力,也难以实现连续动态的监测需求。

连续动态监测依赖于现代物联网通信技术^[7]。当前多数医院的无线通信系统主要依赖无线保真技术(wireless fidelity, WiFi)或蓝牙等传统短距通信技术,虽然这些技术在智能设备领域应用广泛,但在高密度、复杂环境(如住院病区)中存在显著局限^[8]。WiFi^[9]虽然带宽高、适合高数据率传输,但其功耗较大,不利于穿戴式或长期运行设备,且在复杂建筑结构中穿透力差,容易因墙体遮挡或电磁干扰造成连接不稳定。蓝牙^[10]通信距离短,一般适用于个体设备配对,难以支持覆盖整个病区或楼层的医疗监测需求。Zigbee^[11]虽具备一定的Mesh组网能力,但其网络容量与稳定性在大规模节点部署时面临挑战,且传输距离较短,不适合长距离数据回传。因此,现有通信方式难以满足高密度、多节点、长时间运行的智慧医疗测量场景的需求。寻求一种低功耗、强鲁棒性、高扩展性的新型通信系统成为关键问题。

LoRa(long range)^[12]作为一种低功耗广域通信技术,在慢速、非实时但对稳定性要求较高的测量任务中表现出色,尤其适用于周期性健康数据的采集,如体温、心率、血糖等。目前,已有研究将单跳LoRa或基于LoRaWAN(long range wide area network)的通信架构应用于患者健康监测与室内环境感知任务,并在一定程度上验证了其在智慧医疗场景中的可行性^[13-14]。然而,受限于单跳通信机制,其信号覆盖能力在物理结构复杂、空

间分布广的医院环境中仍面临明显瓶颈。

相比之下,LoRa Mesh^[15]通过多跳中继机制进一步扩大了网络覆盖范围,可灵活适配节点分布不均的布局,更适用于住院病区等对网络覆盖连续性要求较高的医疗场景。其优势具体体现在:低功耗,适用于需持续运行数日甚至数月的可穿戴设备,减少电池更换频率^[16];多跳Mesh架构,使节点具备自组织、自修复的通信能力,显著增强了系统的适应性与可靠性^[17];对非实时数据具有良好的容忍性,适合以min为单位进行采样的医疗参数;高度适配性,能够灵活应对不同建筑结构与使用场景下的节点部署与路径重构,支持医院环境中传感器网络的动态变化^[18]。尽管LoRa Mesh在其他领域已有初步研究,但其在智慧医疗测量场景中的系统性应用仍属空白,尤其在集成生理信号与环境信息的多源协同监测方面尚缺乏深入探索。因此,构建一个集成患者生理数据与环境参数双重监测的智慧医疗系统,有助于医生获取更全面、连续的诊疗信息,辅助制定更具个性化的治疗与护理方案。

针对上述问题,本文提出一种基于LoRa Mesh的智慧医疗测量系统,融合环境监测与病人健康参数的远程测量能力,适用于内分泌科等需要长期管理的科室。

本文设计了一套基于LoRa Mesh的智慧医疗测量系统,支持患者生理指标与环境参数的同步、低功耗动态监测。构建了适应医院环境的LoRa Mesh网络,分析了其通信机制,并结合仿真验证了系统在中大型医疗场景下的可行性。通过系统仿真,系统地评估了数据投递率、信号冲突等性能指标,总结了数据包长度与发送频率对系统性能的影响规律。并通过实验室环境中的实物测试,验证了该网络的可行性和有效性。

1 系统设计

1.1 系统架构

如图1所示,本文系统整体设计分为3个主要层级,分别是设备层、网络层和云端层,旨在实现从前端感知到后端智能分析的完整数据链路。

设备层:该层为系统最前端,主要承担数据采集任务。每位住院患者配备一个可穿戴健康监测终端,该终端集成多种传感器,包括但不限于连续血糖监测模块、体温传感器、心率与脉搏检测器等。这些传感器通过嵌入式控制单元进行初步处理后,通过LoRa模块与Mesh网络对接,实现远距离、低功耗的数据传输。此外,在每个病房、走廊与护理站位置布设环境感知节点,用于实时采集室内温度、相对湿度、大气压力及光照强度等环境变量。这些节点的选型强调低功耗与高采样频率之间的平衡,以保障对环境变化的灵敏响应。

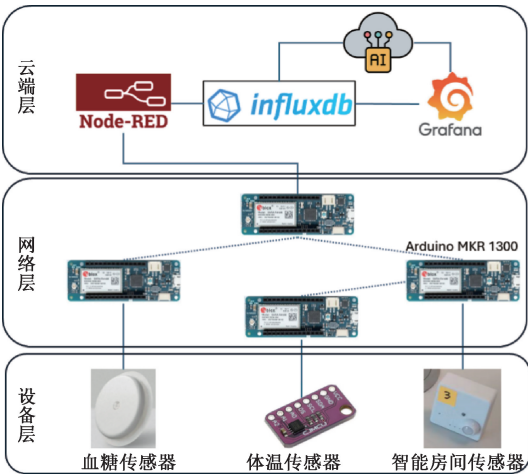


图 1 系统架构
Fig. 1 System structure

网络层:系统通信骨架由 LoRa Mesh 网络构建而成。节点采用基于 RadioHead 协议库的 Mesh 机制自动组网,形成可自愈的多跳路径结构。网络拓扑能够根据节点上下线状态与信道质量动态调整,避免单点故障问题。每个数据包经由一系列中继节点跳传至中央网关,所有节点具备路径发现与维护功能,并支持确认 (acknowledgement, ACK) 机制,确保数据传输的稳定性与可靠性。为优化传输效率,网络层还集成路由缓存机制及链路质量评估算法,以应对医院环境中的动态干扰。

云端层:作为数据管理与智能分析的核心,云端系统由多模块构成,包括 Node-RED, InfluxDB 和 Grafana^[19]。其中,Node-RED 作为流程引擎,负责对 LoRa 网关接收的原始数据进行解码、预处理与格式统一化。接着,数据被写入 InfluxDB 时序数据库,该数据库在处理高频、时序性强的数据方面具备高效读写性能。为了实现可视化与权限分级展示,系统采用 Grafana 构建多用户仪表盘,向医生、护士和管理人员提供定制化、多维度的交互界面。更进一步,云端集成基于机器学习与专家规则的异常检测模块,对病人异常生理参数或环境突变情况自动触发预警,通过仪表盘界面、短信或微信等方式及时推送给相关医护人员。此外,Grafana 可提供基于角色的访问控制,InfluxDB 可提供数据加密存储机制,保障数据安全性与合规性。

1.2 LoRa Mesh 网络协议

LoRa Mesh 是一种将低功耗广域通信 LoRa 技术与 Mesh 网络拓扑结构结合的通信架构,旨在解决传统单跳 LoRa 通信在复杂环境中的覆盖能力不足问题。点对点 LoRa、LoRaWAN 和 LoRa Mesh 3 种拓扑结构如图 2 所示。LoRa mesh 的核心思想是利用多跳转发的方式,通过中继节点将数据逐级传输至网关,显著提高了通信距

离与网络弹性。与 LoRa Mesh 相比,点对点^[20] LoRa 网络采用单跳通信模式,节点之间直接建立链路,拓扑结构简单,延迟低,适用于节点数量较少、通信路径固定的场景,但在节点密集或障碍物较多的环境中通信距离受限,缺乏扩展性;而 LoRaWAN^[21] 则构建了以网关为中心的星型拓扑,所有终端节点通过单跳方式连接至网关,网关将数据集中转发至云端服务器,适合大范围覆盖需求,但当节点数量庞大时,单点拥塞和信道竞争问题明显。相比之下,LoRa Mesh 通过多跳自组织机制,不依赖单一网关,能够在节点失效时动态重构路由,具备良好的自适应性 与容错性,尤其适合医院住院部这种物理结构复杂、节点分布不均且需要动态扩展的应用场景。

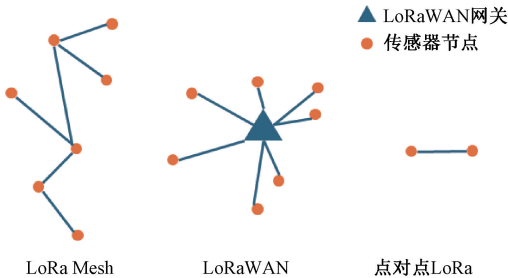


图 2 网络拓扑结构比较

Fig. 2 The topologies of LoRa-related networks

在 LoRa Mesh 中,每个节点都可以同时充当数据终端与中继设备,这种灵活的角色切换为自组织、自愈能力提供了基础支持。当某个节点失效或信道受阻时,系统可通过路由重构自动寻找新的传输路径,从而提高网络的可靠性。这种特性特别适用于医院等部署密度高、物理结构复杂、通信需求长期稳定的应用场景。网络初始化阶段,每个节点通过广播 (HELLO 包) 发现邻居节点,并建立本地邻居表。随后,各节点基于跳数、接收信号强度指示、链路质量指标等参数计算最优路径,建立到网关或目标节点的路由表。LoRa Mesh 通常采用距离向量路由算法,并结合路径确认机制动态调整路由。节点之间通信基于帧结构进行数据封装,典型数据帧包含源地址、目标地址、序列号、跳数限制 (time to live, TTL) 与循环冗余校验 (cyclic redundancy check, CRC) 字段。在数据传输过程中,每个中继节点对 TTL 字段减一,若 TTL 为 0 则丢弃该数据帧,有效防止广播风暴。

在本文提出的智慧医疗测量系统中,LoRa mesh 网络由 RadioHead 无线通信协议栈构建而成。RadioHead 是一个开源、跨平台、支持多协议的无线通信协议栈,广泛用于嵌入式设备的 LoRa/频移键控 (frequency shift keying, FSK) 通信中。其结构清晰,模块划分合理,适合在资源受限的嵌入式系统中部署。RadioHead 支持包括 RFM95 LoRa 模块在内的多种物理层设备,并在上层封装

了可靠传输与多跳通信机制,适用于构建轻量级 Mesh 网络。主要使用的协议栈模块如下。

1) RH_RF95, 底层驱动类, 负责与物理硬件 (如 Semtech SX127x 芯片) 通信, 支持 LoRa 调制方式的参数配置, 如中心频率、扩频因子 (spread factor, SF)、带宽、编码率等。

2) RHDatagram, 提供简单的封装机制, 包括源地址、目的地址、包类型、长度和数据字段。

3) RHReliableDatagram, 在 RHDatagram 基础上增加可靠性传输功能, 引入 ACK 机制与重传策略, 确保关键数据在信道干扰下依然能够高可靠传输。

4) RHMesh, 实现核心的多跳 Mesh 逻辑。其功能包括路径发现、路由维护、跳数控制、路由缓存等。每个节点维护一张“到目标节点的下一跳”表格, 数据包在转发过程中会逐跳查表, 直至到达目的节点或网关。

这些模块可实现 LoRa mesh 的自主路由与恢复。具体的实现机制如下。

1) 路径发现, 当节点首次尝试发送数据但路由未知时, 广播一条路径请求包, 接收该请求的节点记录路径来源并继续向外扩散, 直至目的节点响应。

2) 路由维护, 路径一旦建立, 在一定时间内或通信成功后被缓存。若路径上的任一中继节点失效或回应 ACK 失败, 系统会触发路由更新。

3) ACK 机制, 每个数据包在最终接收后返回 ACK, 发送节点在超时未收到 ACK 时将尝试重发, 最多支持三次重传。

4) 跳数限制, 每个数据包带有 TTL 字段, 限制其最大跳数, 防止形成环路。

5) 广播限制与拥塞控制, 协议支持广播包间延迟、退避机制和最小间隔配置, 以控制广播风暴风险。

6) 动态节点管理, 节点上线后自动广播存在信息, 加入网络; 离线节点一段时间未响应则被标记为不可达, 自动从路由表中剔除。

这些机制使得 RadioHead 提供了一个在嵌入式平台中高可用、易集成的 Mesh 网络开发框架, 为构建医院级别的低功耗医疗测量网络提供了强有力的通信基础。

2 网络部署

该研究以四川省中医院内内分泌科住院部为原型, 构建了一套基于 LoRa Mesh 的智慧医疗测量网络。如图 3 所示, 该住院部共有 18 间病房, 总计 74 张病床, 分布在两个住院区, 并通过一条中央走廊连接。每位患者在入院后均配备一个多模态生理监测设备, 该设备内嵌多个生理参数传感器, 包括连续血糖监测仪、体温传感器、心率与血氧饱和度模块。所有监测数据经由本地微控制器打包处理, 通过 LoRa 无线模块发送至 LoRa mesh 网络中。图 3 中的绿色标识代表这些可穿戴传感器。

除了病人数据采集外, 为增强疾病与环境耦合因子的观测能力, 每个房间和公共区域都布设了一个环境监测终端, 负责采集实时的温度、湿度、光照强度等数据, 节点位置如图 3 所示的红点标记。环境监测节点与病人节点采用相同的通信协议, 通过 LoRa Mesh 网络接入。

所有这些传感器节点都带有 LoRa 通信模块和 LoRa mesh 通信协议栈。如果在通信距离范围内, 任意两个节点之间可以相互通信并中继邻近节点的数据, 从而构建了一个自适应、自愈合的 LoRa mesh 测量网络。除了带传感器的节点外, 系统中部署了一个 LoRa mesh 网关节点 (蓝色方块标识), 是整个 LoRa mesh 网络的通信汇聚点。每个传感器节点的数据需要传输给网关节点。这个

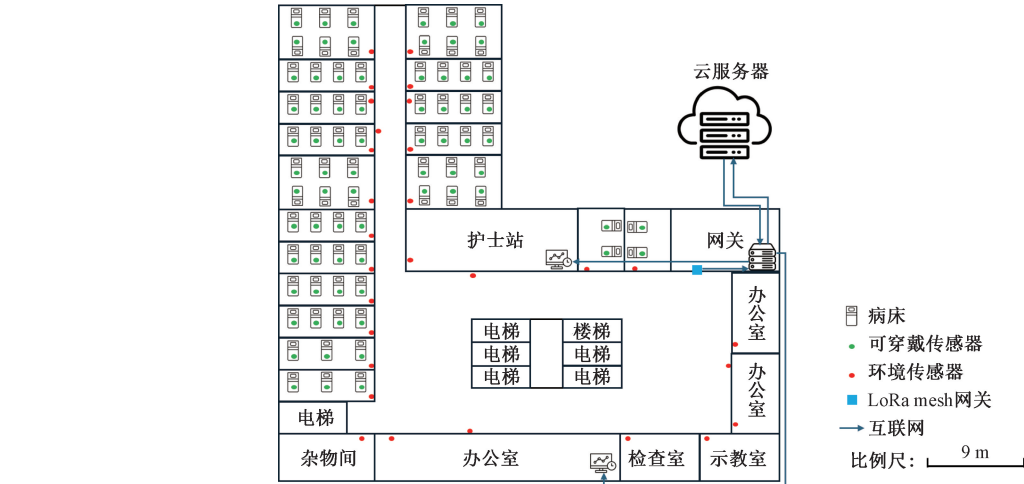


图 3 LoRa mesh 平面部署

Fig. 3 The floorplan of LoRa mesh deployment

传输可以时单跳传输,也可以是经由其他节点的多跳传输。具体的传输路由会取决于传感器节点和网关节点的距离、相对位置、以及路由算法。网关节点能通过以太网、WiFi 或者移动通信网络接入互联网^[22]。当传感器的数据经由 LoRa mesh 网络到达网关节点后,网关会通过互联将数据传入与服务器。

网关上行的数据接入云服务器后,经过 Node-RED 流程引擎进行处理;通过节点编排实现数据的解码、字段提取、格式转换和缺失值过滤等预处理操作,同时将处理流程可视化,便于后续维护与扩展。经过标准化的数据随后通过超文本传输协议(hypertext transfer protocol, HTTP)请求或消息队列遥测传输协议(message queuing telemetry transport, MQTT)协议被写入 InfluxDB 时序数据库。在该数据库中,数据以时间戳为索引进行组织,支持高效的插入、查询和聚合操作,适合处理连续采集的生理参数与环境指标。Grafana 负责对接 InfluxDB 数据源,用户可通过配置查询语句与可视化组件,创建不同角色的仪表板界面。例如,医生可以查看个体生命体征的历史变化趋势图,护士可以实时监测多个病人的异常指标告警状态,而管理员可以查看系统整体运行情况和设备状态。此外,Grafana 支持设置阈值预警逻辑,当数据异常时自动高亮、推送消息,提升医疗响应的及时性与精准性。

图 3 所示部署方案直观展示了在实际医院环境中基于 LoRa Mesh 构建智慧测量网络的部署逻辑。该部署不仅涵盖了从病房到走廊,从传感器采集到数据处理、再到界面展示的全链路流程,还在部署密度、节点协同与信号覆盖等方面充分反映了医院复杂建筑环境对通信系统的挑战与对网络弹性的需求。

3 系统分析

3.1 传输时间

在 LoRa 通信系统中,数据包的传输时间(time on air, ToA)是指从发送端开始调制信号,到接收端完成整个包的接收所经历的时间。ToA 是衡量无线通信负载、信道占用、网络容量与冲突概率的关键指标,尤其在 LoRa Mesh 网络中,节点密集、信道共享的情况下,其作用尤为重要。过长的传输时间不仅会增加信道冲突的可能性,还会降低数据吞吐率,影响网络整体的稳定性与实时性。因此,准确建模和分析 LoRa 包的 ToA,对于网络规划、协议设计和性能评估具有重要意义。

在基于 RadioHead 协议栈的 LoRa Mesh 医疗监测系统中,数据包与确认包均采用 LoRa 调制方式进行传输,二者的 ToA 可分别表示为 t_d 和 t_a 。这两类包的 ToA 计算式如下:

$$t_d = (\Omega + 4.25 + 8 + n_d) \cdot \frac{2^{SF}}{BW} \quad (1)$$

$$t_a = (\Omega + 4.25 + 8 + n_a) \cdot \frac{2^{SF}}{BW} \quad (2)$$

式中: Ω 表示前导码符号数;LoRa 一般设为 8; SF 是扩频因子^[23],一般取值范围为 7~12; BW 表示信道带宽; n_d 和 n_a 分别为数据包和确认包的有效载荷部分所占的符号数。

$$n_d = \max \left[\frac{8L_d - 4SF + 28 + 16 - 20H}{4(SF - 2\Psi)}(CR + 4), 0 \right] \quad (3)$$

$$n_a = \max \left[\frac{8L_a - 4SF + 28 + 16 - 20H}{4(SF - 2\Psi)}(CR + 4), 0 \right] \quad (4)$$

式中: L_d 表示数据包的负载长度; L_a 表示 ACK 包的负载长度; $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整函数,用于保证符号数为整数。参数 H 表示是否使用显式头部,若 $H=1$ 则表示开启;参数 Ψ 表示是否启用低数据速率优化, $\Psi=1$ 表示启用; CR 表示编码率通常为 1~4。

当使用 $SF=10$ 、 $BW=125\ 000\ \text{Hz}$ 、 $CR=1$ 、 $L_d=20\ \text{bytes}$ 、 $L_a=2\ \text{bytes}$ 、 $H=1$ 、 $\Psi=1$ 的典型设置时,可代入上述公式得出数据包和 ACK 包的传输时间。这些值可以为网络设计提供量化基础。

ToA 直接影响节点的信道占用时间。在多节点并发的环境中,若两个节点的 ToA 时间段发生重叠,将导致信号冲突,使得数据包无法被正确解码,进而引起重传甚至路由更新。尤其是在 LoRa Mesh 网络中,每一个数据包都可能涉及多跳转发,若中间任一跳发生冲突或失败,则会影响整条路径的数据投递。因此,控制每个数据包的 ToA 长度是提高网络性能的有效手段之一。

综上所述,数据包和确认包的 ToA 在 LoRa Mesh 医疗监测系统中具有重要意义,不仅影响信道利用率和能耗,也直接关系到系统的数据完整性和响应效率。

3.2 丢包分析与数据投递率

在基于 LoRa Mesh 构建的智慧医疗测量系统中,数据包在从传感器节点传输到网关节点的过程中,可能由于多种原因而发生丢失。主要的丢包机制可以归纳为以下两类。

第 1 类丢失情况源于信号冲突。当两个或多个节点几乎同时同一信道上发送数据,并且其传输时间 ToA 部分或全部重叠时,接收节点无法正确解码任何一个信号,从而导致数据包丢失。由于 LoRa 调制方式的特性,虽然不同的扩频因子 SF 间存在一定程度的正交性,但当信号重叠时间较长或信号强度相近时,冲突仍然不可避免。

第 2 类丢失情况则来源于节点的单通道限制。在典

型的 LoRa Mesh 节点中,射频模块(如 RFM95)只能在一个频率信道上工作,且为半双工通信模式,即不能同时发送和接收。当节点正在执行发送操作,例如发出一个数据包或确认包时,如果此时有其他节点发来的数据包到达,由于节点处于发射状态,接收功能被占用,因此无法接收新的数据包。这种由于收发冲突造成的接收失败,是 LoRa Mesh 网络中另一类重要的丢包来源。

为了量化网络整体的数据传输性能,定义数据投递 D 计算式如下:

$$D = \frac{N_r}{N_s} \tag{5}$$

式中: N_r 表示所有网关节点累计接收到的数据包数量; N_s 表示所有传感器节点累计发送出的数据包数量。数据投递率 D 反映了网络的有效传输能力,其数值越接近于 1,表示系统中发生丢包的概率越低,网络性能越好。反之,则说明系统存在较严重的丢包现象,需要优化网络参数或路由机制。随着数据包长度的增加,每个数据包的 ToA 也随之增长,导致每个节点在信道上占用的时间变长,从而提升了信号冲突的概率,增加了丢包率,降低了投递率。同样,当传感器节点以更高频率产生数据时(以数据包速率 p 表示),单位时间内传输的数据包数量增加,信道竞争更加激烈,信号冲突和收发冲突的事件频率上升,也会引起投递率下降。因此,数据投递率 D 与数据包长度及数据包发送速率存在明显的正相关关系。

因此,在实际系统设计中,需要综合考虑节点的数据产生频率、数据包大小、扩频因子与带宽配置等参数,以权衡网络吞吐量与丢包率,从而确保智慧医疗测量系统在保障低功耗特性的同时,能够维持稳定可靠的数据传输性能。

4 实验与分析

4.1 仿真实验设置

实验基于 LoRa Mesh 网络仿真平台 LoRaMeshSim^[24]进行仿真验证。LoRaMeshSim 是一个开源的、专门针对 LoRa Mesh 网络性能研究而设计的仿真工具。原版的 LoRaMeshSim 支持一维线性节点部署,即所有节点位于一条直线上,并在此基础上实现了节点间数据传输、信号冲突检测、重传机制和 ACK 机制等功能。该平台支持灵活的网络规模设置、通信参数配置、节点数据产生建模,并能输出节点级别的详细通信日志,适合对中小规模 LoRa Mesh 网络进行性能评估。

在本文实验中,为适应医院住院楼的真实空间布局,LoRaMeshSim 被扩展至支持二维节点部署。所有节点按照如图 3 所示的部署方案分布在病房、走廊及护士站周围,仿真节点数、位置与实际部署一致。节点之间通过广

播方式发现邻居,采用 Andrei Broder 和 David Alduous 提出的随机生成树算法构建初始路由拓扑。最终生成的路由结果如图 4 所示,所有传感器节点通过一棵连通生成树与网关节点相连,确保任意传感器节点均可通过单跳或多跳方式与网关通信。路由具有动态调整功能,当节点通信失败或路径失效时,能够自适应重建路径。实验的参数设置如表 1 所示。鉴于医院环境中节点数量较多,选择较低的扩频因子 SF 有助于减少传输时延,从而降低信号冲突的概率,因此设置 $SF=7$ 。参数 L_a 设为 5 bytes,是依据 RadioHead 协议中 ACK 报文的长度设定的。

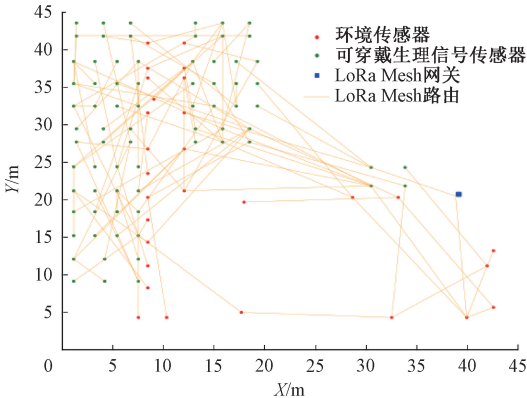


图 4 LoRa Mesh 仿真位置及路由结果
Fig. 4 The simulation of LoRa Mesh

表 1 实验参数设置

| Table 1 Parameter values in the experiments | |
|---|-----------------|
| 参数名 | 参数值 |
| SF | 7 |
| L_a | 5 bytes |
| Ω | 8 |
| BW | 125 kHz |
| H | 0 |
| Ψ | 0 |
| CR | 1 |
| 仿真时间 | 24 h |
| p | 1、6、11、16、21、26 |
| L_d | 30、90、150 bytes |

为了与单跳通信的 LoRaWAN 网络进行对比,本文进行了 LoRaWAN 仿真实验,结果如图 5 所示。由于单跳通信机制的限制,单个 LoRaWAN 网关无法实现对整个院区的全面覆盖;当网关数量增加至 3 个时,才能实现对全院区的完整覆盖。LoRaWAN 仿真实验所采用的参数设置与 LoRa Mesh 实验保持一致,具体如表 1 所示。

4.2 数据投递率与成本分析

每个节点的发包时间间隔服从参数 $\gamma = p/3\ 600$ 的指数分布,模拟真实医疗场景中节点异步、随机的数据产

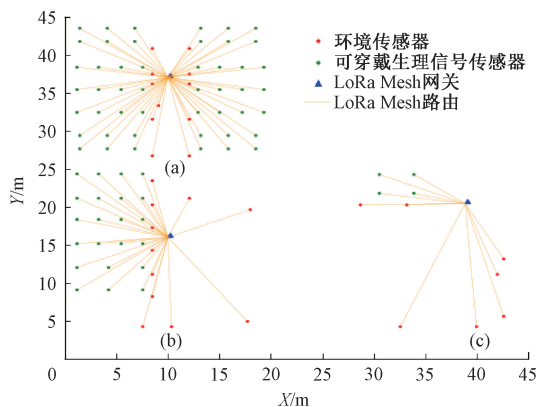


图 5 LoRaWAN 仿真结果

Fig. 5 The simulation of LoRaWAN

生行为。对于每一组数据发送速率(p 值)和数据包长度(L_d 值)的组合,分别重复 100 次独立实验并取平均,以确保结果的统计稳定性和可靠性。

图 6 所示为 LoRa mesh 不同数据包长度和不同数据生成速率下的平均数据投递率。从图 6 可以看出,随着数据发送速率 p 的增加,平均数据投递率逐渐下降。特别是在高数据生成速率($p=26$)时,投递率下降更为明显。这一趋势在数据包长度较大的情况下尤为突出。与 30 bytes 数据包相比,90 和 150 bytes 数据包的投递率下降得更快。这是因为数据包长度越大,传输时间越长,导致信道占用时间增长,从而增加了信号冲突和接收阻塞的概率。总体而言,较小的数据包和较低的发送频率有助于维持较高的网络投递率。

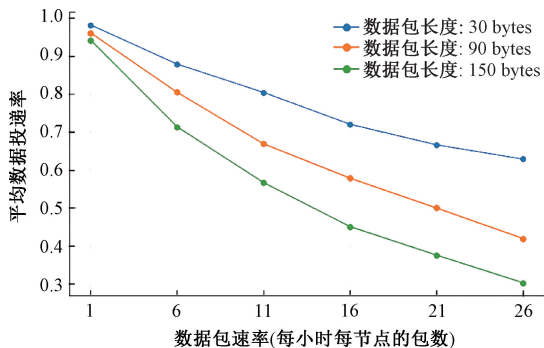


图 6 LoRa mesh 平均数据投递率

Fig. 6 The result of mean delivery rate of LoRa mesh

图 7 比较了 LoRa Mesh 和 LoRaWAN 在数据长度为 90 bytes 条件下的数据投递率。单网关的 LoRaWAN 网络仅使用图 5(c) 网关;双网关方案在此基础上增加了图 5(b) 网关;三网关方案则启用了图 5 中全部 3 个网关。从图 7 可以看出,单网关条件下 LoRaWAN 的数据投递率显著偏低,主要原因在于其覆盖范围有限,部分位于覆盖盲区的传感器节点无法与网关建立通信连接。引入第

2 个网关后,投递率有所提升,但仍明显低于 LoRa Mesh。仅在使用 3 个网关的情况下,LoRaWAN 的投递率才接近 LoRa Mesh,甚至在高数据发送速率下略有超出。

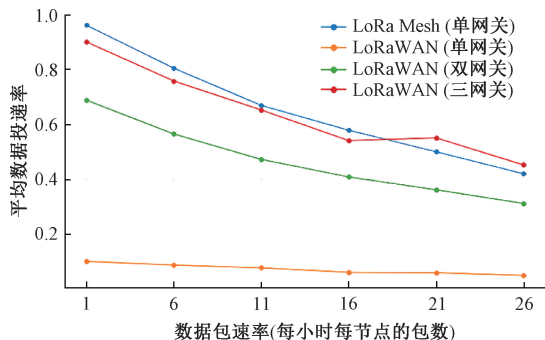


图 7 LoRaWAN 平均数据投递率

Fig. 7 The result of mean delivery rate of LoRaWAN

然而,随着网关数量的增加,LoRaWAN 的整体成本将显著高于 LoRa Mesh。两者在传感器节点的硬件配置、安装与部署方式上基本一致,差异主要体现在网关设备方面。LoRa Mesh 的网关可由一块低成本的 Arduino MKR WAN 1300(约 ¥300)与树莓派 4B(约 ¥400)组成,而 LoRaWAN 则需配备多通道网关设备(如 LoRaGo PORT,约 ¥1 100)及同样的树莓派。由于覆盖整个院区的 LoRa Mesh 方案仅需 1 个网关,而 LoRaWAN 需配置 3 个网关,其硬件总成本比 LoRa Mesh 高出约 ¥3 800。此外,LoRaWAN 增加的两个网关还需分别提供稳定电源与互联网接入,进一步抬高了部署与运维成本。因此,在相同覆盖要求下,LoRa Mesh 在经济性与系统扩展性方面具有明显优势。

4.3 丢包分析

由于 LoRaWAN 不是本文的重点,只分析 LoRa mesh 丢包的原因。图 8 所示为因信号冲突而导致的数据包丢失数量随数据发送速率变化的情况。从图 8 可以看出,随着发送速率 p 的提高,信号冲突导致的数据丢失数量呈现近似线性增长趋势。不同数据包长度下,150 bytes 数据包的丢包数明显高于 90 和 30 bytes。这是因为较大的数据包具有更长的 ToA,占用信道时间更久,重叠概率更高,从而导致更频繁的冲突。因此,在高数据生成速率和大数据包负载情况下,信道冲突成为系统主要的性能瓶颈。

由于节点发包导致无法接收其他数据包(即节点处于发送状态,错过接收)的数据包丢失数量,如图 9 所示。与信号冲突不同,这种丢失机制同样随着数据发送频率的增加而变得严重。当数据发送速率 p 较低时,发包导致的接收冲突较少;而当 p 升高时,每个节点处于发射状态的概率上升,因而错过接收其它节点发送数据包的事件也大幅增加。且数据包长度越大,节点在发射状态停

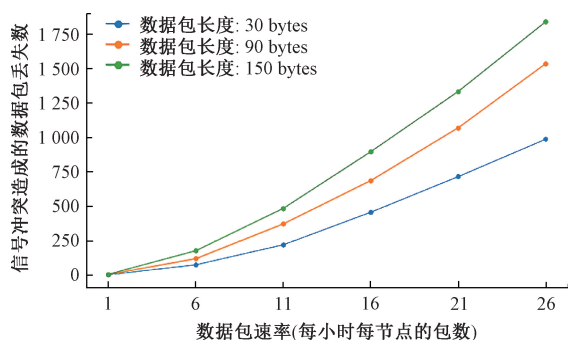


图8 数据包冲突

Fig. 8 The result of data packet collision

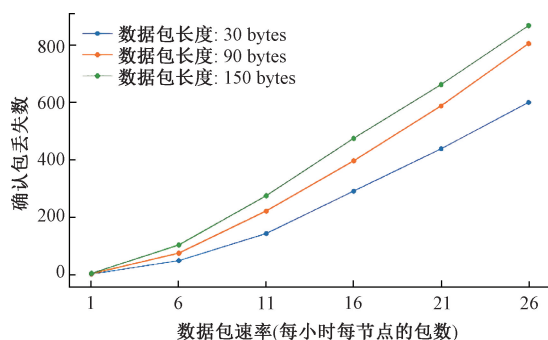


图10 确认包冲突

Fig. 10 The result of ACK packet collision

留的时间越长,进一步加剧了这种丢包现象。

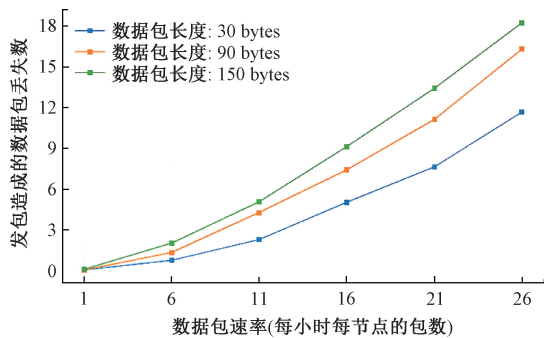


图9 发包造成的数据包丢失

Fig. 9 The result of packet lost due to sending packets

除了数据包本身的冲突外,确认包的冲突也值得关注。由于 ACK 包冲突而导致的通信异常数量,如图 10 所示。可以看到,ACK 冲突数量随数据发送速率升高而迅速增加。与数据包冲突类似,较大数据包(对应较长的确认响应周期)下的 ACK 冲突更为频繁。值得注意的是,ACK 冲突虽然不会直接丢失数据,但会导致发送节点无法正确收到确认信号,从而误判路由失败,触发额外的路由发现过程。频繁的路由发现包(例如 Route Request 广播)将进一步占用有限的信道资源,形成负反馈循环,加剧信号冲突和网络阻塞。因此,控制 ACK 冲突对于维护网络整体稳定性至关重要。

从实验结果来看,LoRa Mesh 网络在中低数据产生速率时具有良好的数据投递性能,但随着数据速率和数据包长度的增加,系统面临的冲突和丢包压力显著上升。合理配置数据包长度、发送频率以及优化路由与 ACK 管理策略,将是提升系统可靠性和吞吐率的关键方向。

4.4 实验室部署

除了仿真实验外,本文还在实验室环境中搭建并部署了一个小规模的 LoRa mesh 网络,用以验证所提出的智慧测量系统。如图 11 所示,该网络包含 4 个节点,模拟医院内部环境的通信场景。图 11(a)为节点部署位

置:节点 1 与网关节点分别位于两个由混凝土墙隔开的房间内,二者之间无法直接通信。此外,走廊中部署了两个中继节点,可与网关节点实现直接通信。该实验室的尺寸为 9 m×4 m。

图 11(b)和(c)的节点 1、2 和 3 被设置为传感器节点,硬件平台为 Arduino MKR WAN 1300。在本次实验中,未连接实际传感器,Arduino 开发板生成模拟的生理参数及环境监测数据,并通过 LoRa mesh 网络发送至网关节点。通信协议基于 RadioHead LoRa mesh 库实现。

图 11(d)为网关节点由一个 Arduino MKR WAN 1300 和一块树莓派 Model 4 组成,二者通过 USB 接口连接。Arduino 接收来自 LoRa mesh 网络的数据包后,经 USB 串口传输至树莓派,后者作为上位机对数据进行解析与处理。

树莓派上部署了 Node-RED 数据流处理平台,并连接了显示器。图 12 所示为显示器屏幕的截图,单独呈现了该平台的工作界面。从图 12(a)可知,串口连接器已成功连接至 Arduino 开发板。接收到的数据包会按节点分类进行处理,用于统计每个节点的数据接收情况,并结合预设发送速率计算数据投递率。若识别为有效数据包,其内容将在图 12(b)调试窗口中显示。实验中,每个节点发送的模拟数据为由 0 和 1 交替构成的 30 bit 二进制序列。图 12(b)为从节点 2 接收到的 16 进制数据,与原始发送数据一致,验证了网络的数据传输功能。

此外,每当网关节点的 Arduino 接收到数据包时,会同时将其当前的路由表发送至树莓派。因此,图 12(b)也包括接收到的路由表信息。根据该路由表可知,3 个传感器节点均与网关节点建立了有效路由。其中,节点 2 和节点 3 可直接通信;节点 1 则需通过节点 3 中继实现通信。该拓扑关系与图 11(a)的网络结构一致。

实验中,数据包长度设为 30 bytes,节点的数据发送速率分别为每小时 6、11 和 16 个数据包。每种速率下实验持续 3 h。Node-RED 所统计的数据传输率如表 2 所示。结果表明,3 个节点均具有较高的数据投递成功率,

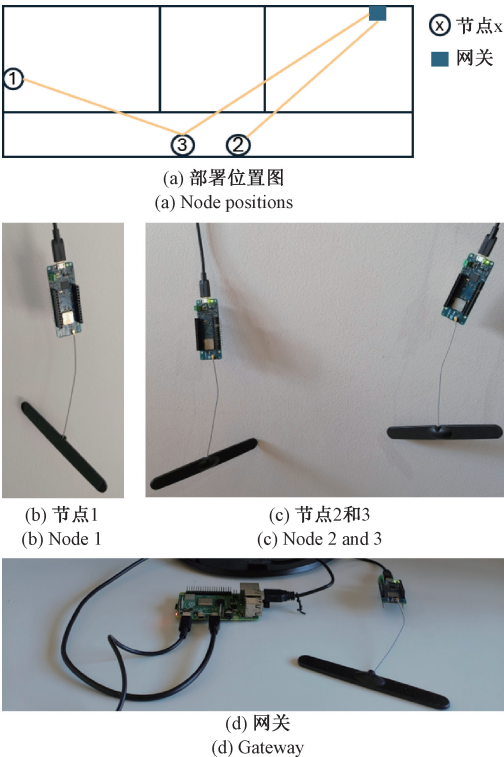


图 11 LoRa mesh 实验室部署图

| 表 2 数据传递率 | | | |
|---|-------|--------|--------|
| Table 2 Data packet delivery rate (%) | | | |
| 节点 | $p=6$ | $p=11$ | $p=16$ |
| 1 | 100 | 100 | 95.8 |
| 2 | 100 | 100 | 100 |
| 3 | 100 | 97.0 | 100 |

综上所述,通过在实验室环境中搭建的小规模 LoRa mesh 网络,验证了所提出系统在室内场景下的通信可靠性和数据传输性能。实验结果表明,即使在存在墙体阻隔的条件下,借助中继节点仍可实现稳定的数据传输,且整体数据投递率较高,展示了所设计网络架构在智慧医疗等应用场景中的可行性与实用性。

5 结 论

本文提出并实现了一种基于 LoRa Mesh 的智慧医疗测量系统,针对慢性患者的长期管理需求,构建了支持生理指标与环境参数同步监测的低功耗、广覆盖的物联网架构。本研究的核心思路是通过构建自组织、低功耗、多跳中继的 LoRa Mesh 通信架构,打破传统单跳 LoRa/LoRaWAN 网络在复杂医疗空间中覆盖受限的问题,实现对患者生理信号与周边环境参数的同步采集。系统采用 RadioHead 协议栈实现了灵活自组织的 Mesh 通信机制,结合医院内部复杂空间布局,完成了节点部署与网络自适应优化。通过扩展仿真平台 LoRaMeshSim,本文对不同数据生成速率和数据包长度下的网络性能进行了系统评估,结果表明在中低数据发送频率条件下,所提出的系统能够维持较高的数据投递率,而在高负载场景中,信道冲突与确认包丢失成为性能瓶颈。进一步通过与 LoRaWAN 的对比仿真实验发现,在相同节点部署和通信参数设置下,LoRaWAN 仅在配置 3 个网关时才能实现与 LoRa Mesh 相当的数据投递率,而单网关和双网关方案的传输性能明显劣于 LoRa Mesh;同时,LoRaWAN 所需网关数量更多,硬件与运维成本显著上升,系统整体性价比低于 LoRa Mesh。研究进一步揭示了传输时间、节点发包频率与网络容量之间的关系,为智慧医疗物联网系统的设计与优化提供了参考依据。此外,本文还在实验室环境中搭建了小规模 LoRa Mesh 网络,实测验证了系统在室内场景中的通信稳定性与数据传输准确性。未来工作可在以下方向展开:1)引入自适应扩频因子与功率控制策略,以进一步提升网络在高负载情况下的稳定性与能效;2)探索基于机器学习的智能路由算法,实现动态环境下的最优路径选择;3)结合多频段、多信道的并发通信机制,缓解大规模部署中的信道竞争与冲突问题,推动智慧医疗测量系统向更大规模、更高可靠性的发展。

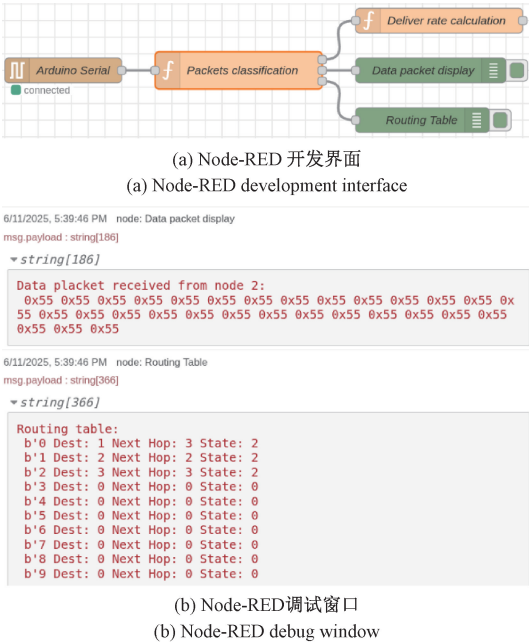


图 12 树莓派屏幕截图

Fig. 12 The screenshot of the raspberry pi

除两次实验中分别丢失 1 个和 2 个数据包外,其余均达到 100%。这得益于网络节点数量较少,通信冲突和无线干扰相对有限。

参考文献

- [1] UMER M, SADIQ S, KARAMTI H, et al. IoT-based smart monitoring of patients with acute heart failure [J]. *Sensors*, 2022, 22(7): 2431.
- [2] WIERSINGA W M, POPPE K G, EFFRAIMIDIS G. Hyperthyroidism: Aetiology, pathogenesis, diagnosis, management, complications, and prognosis [J]. *Lancet Diabetes & Endocrinology*, 2023, 11(4): 282-298.
- [3] CHAKER L, BIANCO A C, JONKLAAS J, et al. Hypothyroidism [J]. *The Lancet*, 2017, 390(10101): 1550-1562.
- [4] 李佳益. 2 型糖尿病患者自我调节疲劳、自我效能感与自我管理行为的相关性研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
LI J Y. Study on the relationship among self-regulatory fatigue, self-efficacy and self-management behavior in patients with type 2 diabetes [D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [5] BOGAR K, BRENSINGER C M, HENNESSY S, et al. Climate change and ambient temperature extremes: Association with serious hypoglycemia, diabetic ketoacidosis, and sudden cardiac arrest/ventricular arrhythmia in people with type 2 diabetes [J]. *Diabetes Care*, 2022, 45(11): 171-173.
- [6] JIN S, NEWTON M A A, CHENG H, et al. Progress of hydrogel dressings with wound monitoring and treatment functions [J]. *Gels*, 2023, 9(9): 694.
- [7] 秦欢欢, 王梦凡, 柯熙政. 工业互联网下的无线光通信研究进展[J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(10): 1-13.
QIN H H, WANG M F, KE X ZH. Research progress on wireless optical communication in the industrial internet [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(10): 1-13.
- [8] 宋田田, 李开宇, 刘文波. 医疗设备无线通信数据采集系统的设计[J]. *电子测量技术*, 2016, 39(6): 172-175.
SONG T T, LI K Y, LIU W B. Design of wireless communication data acquisition system for medical equipment [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2016, 39(6): 172-175.
- [9] BOUDLAL H, SERRHINI M, TAHIRI A. An intelligent monitoring approach based on wifi sensing for smart hospital [C]. *The International Conference on Artificial Intelligence and Smart Environment*. Cham: Springer International Publishing, 2022: 212-223.
- [10] CHANG C S, WU T H, WU Y C, et al. Bluetooth-based healthcare information and medical resource management system [J]. *Sensors*, 2023, 23(12): 5389.
- [11] REHMAN A, HASEEB K, FATI S M, et al. Reliable bidirectional data transfer approach for the internet of secured medical things using zigbee wireless network [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(21): 9947.
- [12] 高永霞, 孙运强, 姚爱琴, 等. 基于 LoRa 的预制菜冷藏设备物联网终端设计[J]. *国外电子测量技术*, 2024, 43(8): 64-70.
GAO Y X, SUN Y Q, YAO AI Q, et al. Design of IoT terminal for prefabricated food refrigeration equipment based on LoRa [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2024, 43(8): 64-70.
- [13] DIMITRIEVSKI A, FILIPOSKA S, MELERO F J, et al. Rural healthcare IoT architecture based on low-energy LoRa [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(14): 7660.
- [14] RAY R, MALLICK D K, DASH S R. Intelligent energy-efficient healthcare models integrated with IoT and LoRa network [J]. *Sensors for Health Monitoring*, 2019: 157-174.
- [15] WU D, LIEBEHERR J. A low-cost low-power lora mesh network for large-scale environmental sensing [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(19): 16700-16714.
- [16] CHEN Y, SHI G, AL-QURAAN M, et al. LoRa mesh-5G integrated network for trackside smart weather monitoring [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(6): 8903-8914.
- [17] 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.
- [18] HUH H, KIM J Y. LoRa-based mesh network for IoT applications [C]. 2019 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT). IEEE, 2019: 524-527.
- [19] DAS R. Enhancing Health and Environmental Monitoring: Open-Source IoT-Enabled SCADA System With Node-RED, InfluxDB, Grafana, and Raspberry Pi [M]. *Internet of Things-Based Machine Learning in Healthcare*. Chapman and Hall/CRC, 2024: 166-189.
- [20] 江超, 张治中, 胡正操, 等. 基于改进的猎食者优化的 D2D 通信功率控制方法[J]. *电子测量技术*, 2023, 46(6): 31-36.
JIANG CH, ZHANG ZH ZH, HU ZH CH, et al. Power control method for D2D communication based on improved predator optimization [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2023, 46(6): 31-36.
- [21] CHEN Y, SAMBO Y A, ONIRETI O, et al. A survey on

LPWAN-5G integration; Main challenges and potential solutions [J]. IEEE Access, 2022, 10: 32132-32149.

[22] CHEN Y, SAMBO Y A, ONIRETI O, et al. LoRaWAN-5G Integrated network with collaborative RAN and converged core network [C]. 2022 IEEE 33rd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). IEEE, 2022: 1-5.

[23] 张铮,汪杰,倪西学. 面向无人机数据采集的 LoRa 扩频因子预测模型研究 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(10):294-302.

ZHANG ZH, WANG J, NI X X. Research on LoRa spreading factor prediction model for UAV data collection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(10): 294-302.

[24] CHEN Y, SHI G, SAMBO Y, et al. On the scalability and coverage of LoRa mesh for monitoring linear infrastructure [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2025.

作者简介

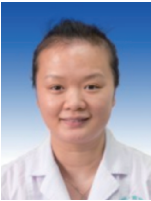


梁欢,四川省中医院/成都中医药大学附属医院内分泌科病区责任组长,科室总带教。长期指导成都中医药大学本科生毕业论文设计,参与多项四川省中医院院级课题,主要研究方向为对糖尿病患者的护理与监测。

E-mail: 593798109@qq.com

Liang Huan is the group leader of the Endocrinology Ward at Sichuan Provincial Hospital of Traditional Chinese Medicine/Affiliated Hospital of Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, and serves as the Chief Teaching Supervisor of the

department. She has been long involved in guiding undergraduate thesis projects at Chengdu University of Traditional Chinese Medicine and has participated in multiple hospital-level research projects at Sichuan Provincial Hospital of Traditional Chinese Medicine. Her main research interests include the care and monitoring of patients with diabetes.



刘娅(通信作者),博士,副主任医师。2010 年博士毕业于成都中医药大学中医内科。现任四川省医学会公质踪松专委会青年委员会委员。主持国家自然科学基金、四川省中医管理局课题、成都市医学会青年孵育基金、成都中医药大学各级课题,参与项目国家级、厅局级课题,发表科研论文三十余篇。主要研究方向为中医药防治内分泌代谢性疾病的基础与临床研究。E-mail: Liuyaya918@163.com

Liu Ya (Corresponding author) associate chief physician, received her Ph. D. degree in Traditional Chinese Internal Medicine from Chengdu University of Traditional Chinese Medicine in 2010. She currently serves as a Youth Committee Member of the Osteoporosis Branch of the Sichuan Medical Association. She has presided over projects funded by the National Natural Science Foundation of China, the Sichuan Administration of Traditional Chinese Medicine, the Chengdu Medical Association Youth Incubation Fund, and various projects at Chengdu University of Traditional Chinese Medicine. She has participated in multiple national and provincial-level research programs and has published more than thirty research papers. Her main research interests include the basic and clinical studies of traditional Chinese medicine in the prevention and treatment of endocrine and metabolic diseases.