doi:10.16018/j.cnki.cn32-1650/n.202503008

LoRa感知节点低功耗优化算法及其编程实现探究

何丽娟
(安徽新华学院 大数据与人工智能学院,安徽 合肥 230088)

摘要:针对物联网边缘计算中LoRa感知节点的能耗瓶颈,该研究基于能耗构成分析,从协议栈优化、硬件重构及算法创新3层面突破传统射频能耗占比过高的困局。通过该研究提出的方案与传统方案的比较,发现本文算法在静态场景下平均功耗为35.1 μA,较传统方案能耗82.3 μA优化57.35%。在纯电池供电情况下,该算法的网络生存周期可达23.4个月,较传统方案延长49.04%。实验结果验证了算法的多目标权衡能力:P2点在动态约束下实现能耗与时延的均衡,适用于工业监测等场景,通过调整参数,用户可灵活选择其他Pareto点,满足不同应用需求。

关键词:LoRaWAN协议栈;Q-learning传输决策;RTOS任务划分
中图分类号:TN929 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-5322(2025)03-0047-08

随着物联网技术在智慧城市、工业监测等领域的广泛应用,LoRa(Long Range)技术凭借其远距离传输和低功耗的特点,在边缘感知网络设计中得到了广泛运用。但在具体的应用场景中,例如在隧道监测和轨道交通等复杂环境中,感知节点通常会面临供电受限与通信质量要求的两大挑战。因此,如何在确保数据可靠性的基础上实现能耗优化,已成为制约其大规模部署的主要难题。

近年来,学术界针对LoRa低功耗优化问题开展了多项研究。童率等[1]系统梳理了LoRa技术演进脉络,指出动态扩频因子调节与混合供电管理是突破能耗约束的重要方向,但尚未形成可落地的算法框架;须民健等[2]针对长大隧道场景开发了多跳中继传输方案,通过优化部署间距使通信距离提升40%,但未解决节点本体的能耗优化问题;王大涛等[3]则提出了多传感器轮询采集策略,将数据采集能耗降低32%,然而其固定时间窗口机制难以适应动态环境变化;徐玉坡[4]则在钢轨监测中创新采用振弦传感器与LoRa的融合架构,使系统生存周期延长至18个月,但该方案对射频模块的能耗优化仍显不足;冯陆崴等[5]开发的模拟扩频唤醒机制,通过信号相关性检测将待机功耗降至9 μA,但存在10%的误唤醒概率导致额外能耗;Lazaro等[6]开发了基于LoRa反向散射的家庭监控系统,通过反射调制技术将节点功耗降低至传统方案的17%,并在200 m范围内实现可靠数据传输,为无源感知节点设计提供了新思路;Chen等[7]提出的多模态动态LoRa框架,能够根据环境特征动态调整射频参数与计算资源分配,在复杂电磁环境中使通信成功率提升28%,其模型轻量化特性尤其适合边缘节点部署。这些创新成果在无源供能和智能参数适配方面拓展了LoRa优化路径,但在工业级复杂场景下的实时性与鲁棒性仍需进一步验证。

上述研究虽在特定维度取得进展,但缺乏对感知节点全链路能耗的系统优化。本文在前人研究的基础上创新性地提出了一种多模态协同优化架构,具体方案如下:首先,构建了基于隐马尔可夫模型的自适应休眠调度算法,通过动态预测信道质量,实现对休眠窗口的智能调节;其次,建立了多目标优化模型,旨在能耗、时延和丢包率之间寻求帕累托最优解;此外,还开发了基于Q-learning的传输决策机制,进一步提升了系统

收稿日期:2025-04-07
基金项目:安徽省质量工程"四新"研究与改革实践项目(2023sx136);安徽新华学院质量工程项目(2022xnjysx06)。
作者简介:何丽娟(1983—),女,安徽合肥人,高级工程师,硕士,主要研究方向为软件工程。

的性能。通过上述创新研究,为LoRa感知节点在复杂环境下的长效可靠运行提供了有力的技术支持。

1　感知节点能耗构成分析

在LoRa感知节点的能耗构成中,分别有射频模块、传感模块和计算模块。射频模块作为核心耗能单元,在20 dBm发射功率条件下,传输阶段的典型工作电流可达120 mA,接收模式下维持在10 mA量级,而深度休眠状态下电流可降至0.2 μA级别。射频模块能耗特性受扩频因子S_F动态调节且影响显著,当扩频因子参数S_F=12时,单个数据包空中传输时间是S_F=7模式时的9倍,直接导致有效辐射能量积累增加。而传感模块的能耗特性取决于采样频率与传感器类型,温湿度传感器在1 Hz采样频率下工作电流约1.2 mA,三轴加速度计在100 Hz采样频率时电流消耗高达8.5 mA。因此,多传感器协同工作时需通过时分复用机制平衡采样精度与能耗关系。与前两者相比,计算模块的功耗呈现显著的状态相关性,启用动态电压频率调整技术后,内存访问模式对功耗影响十分明显。

射频模块、传感模块和计算模块耗能占比如表1所示。由表1可知,射频模块耗能占比最大,达62%。具体实践中,各模块的能耗耦合效应体现在电源管理单元的动态响应特性上,特别是当射频前端突发启动时,电源轨的瞬态响应电流波动可达50 mA/μs,这对DC-DC转换器的环路稳定性提出了严格的设计要求。

表1　射频模块、传感模块、计算模块能耗占比分析

Table 1　Analysis of energy consumption proportion of RF module, sensing module, and computing module

模块类型	总能耗占比/%	能耗分布	主要能量消耗环节	占比
射频模块	62	数据发射阶段	功率放大器	80%
		其他阶段	其他射频电路部分	20%
传感模块	23	高精度传感器信号调理电路	信号调理电路	100%
计算模块	15	复杂协议解析与加密运算	协议解析与加密运算	峰值时占用

2　LoRa感知节点关键技术

2.1　LoRaWAN协议栈分析

本研究搭建的LoRaWAN协议栈,物理层采用线性扩频调制技术,MAC层定义的Class A/B/C三类设备在功耗与实时性维度方面呈现出显著差异。其中,Class A设备遵循ALOHA协议,在每次上行传输后开启2个短接收窗口,其下行延迟典型值为1.2~2.4 s,适用于对时延不敏感的周期性数据上报场景;Class B设备通过周期性信标同步实现预定接收时隙,每128 s广播一次Beacon帧以维持时间基准,并在0.85~1.5 s内完成下行通信,但需额外维持0.8 mA量级的时钟校准电流;Class C设备保持持续接收模式,具备毫秒级下行响应能力,但静态功耗高达5.2 mA,仅适用于持续供电场景[6]。此外,速率自适应(data adaptive rate, ADR)机制基于信噪比阈值以及最近20次传输的历史记录,能够通过动态调整扩频因子、带宽与编码率,实现链路预算优化。当接收信号强度指示(received signal strength indicator, RSSI)采样值高于-110 dBm时,系统自动降低S_F至9,并提升带宽至125 kHz,使单个数据包传输时间缩短至412 ms。扩频因子与功耗的定量关系可通过码片速率公式推导,码片速率公式如下:

$$R_c = \frac{1}{\frac{2^{S_F}}{R}} \tag{1}$$

式中:R_c为码片速率;S_F为扩频因子,通常情况下取值为7~12;R为码率,即每秒传输的比特数。

2.2　能耗评估模型

本研究基于Markov链的功耗状态机模型,将节点工作周期划分为传输、接收、传感采集、休眠4个离散状态,各状态转移概率由事件触发率与信道忙闲比共同决定。在传输状态下,电流会经历从休眠状态0.2 μA跃升至更高电流89 mA的阶段,并在数据调制阶段保持72 mA恒定,直至数据包发送完成。此阶段的能量消耗可以分解为各模块在Δt时间窗内的电流电压乘积积分之和,其中射频模块能耗项主要由前导码检测、同步字匹配及有效载荷处理的差异化电流分量构成。在接收状态下,电流相对稳定,可以通过固定的

电流值进行能量计算。在传感采集状态下,能量消耗还需要考虑模拟数字转换器即A/D转换器(ADC)采样速率、输入阻抗的关联性,当使用16位ADC以1 kSPS速率采集压阻式传感器信号时,输入缓冲器的偏置电流将额外引入0.8 mA基底功耗。在休眠状态下,电流非常低,通常为0.2 μA,这个阶段的能量消耗相对较低。因而在节点的整个工作周期内能耗计算公式可以表示为

$$E_{\text{total}} = \sum_{i=1}^{4}\left(\int_{t_i}^{t_{i+1}} \left(I_i(t)\cdot V_i\right)\mathrm{d}t\right) \tag{2}$$

式中:E_{total}为总能量消耗,即节点在一个完整工作周期内的能量消耗;t_i、t_{i+1}分别为节点工作周期中第i个状态的起始时间与结束时间;$I_i(t)$为在第i个状态下,时刻为t时的电流;V_i为第i个状态下的工作电压。

3　低功耗优化算法设计

3.1　自适应休眠调度算法

基于隐马尔可夫模型构建信道状态预测框架,将信道质量划分为3个离散状态,即S_1(空闲)、S_2(轻度干扰)、S_3(重度干扰)。该模型的状态转移概率矩阵通过历史信噪比采样值动态更新,如图1所示。图1中,行维度对应当前信道状态即$S_1 \sim S_3$,列维度对应下一时刻转移状态,矩阵元素a_{ij}表示从状态S_i转移到S_j的概率。这种设计使得信道质量中的空闲度、干扰等级、稳定性3个维度通过状态转移关系实现了统一建模。

该状态转移概率矩阵由行、列、页3个维度组成,每个维度的取值范围分别为$1 \sim k$、$1 \sim k$、$1 \sim l_{\max}$。研究采用滑动窗口机制,每60 s采集RSSI均值和方差作为观测向量,利用前向-后向算法计算状态置信度;同时,动态休眠窗口调整策略引入指数加权移动平均法,初始窗口设定为128个离散时间步长。当信道空闲状态持续概率超过0.85时,窗口长度以16步长递增至最大值1 024步[7];一旦检测到信噪比低于-115 dBm的突发干扰,窗口立即重置至64步并触发退避机制,唤醒触发条件优化采用双阈值设计。当加速度传感器检测到0.5 m/s²以上振动事件或环境温度变化率超过0.2 ℃/s时,强制中断休眠状态并启动紧急数据采集模式;此外,射频前端的唤醒延迟通过预充电技术控制在1.2 ms内,确保快速响应突发通信需求。

3.2　多目标优化模型

除了引入自适应休眠调度算法,本文还引入了3个目标优化函数,分别是最小化总能耗、最大化网络生存周期和最小化端到端时延,同时还定义了优化目标必须满足的硬性边界,包括丢包率、数据新鲜度阈值、最小剩余能量等级等,如表2所示。

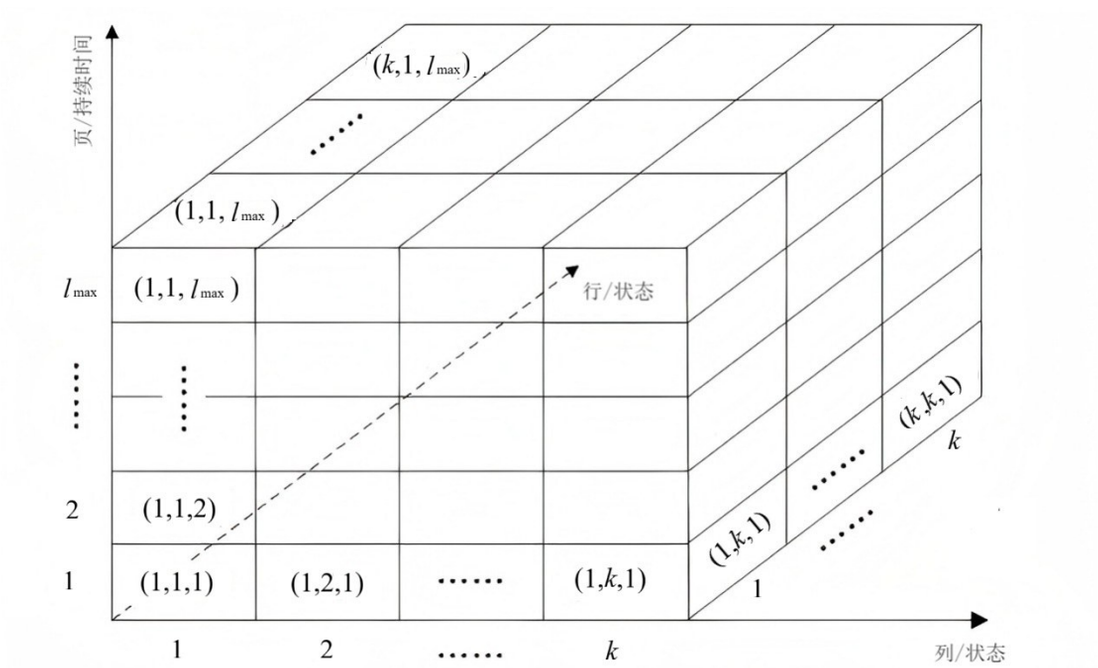


图1　基于隐马尔可夫模型的三维状态转移概率矩阵

Fig. 1　Three dimensional state transition probability matrix based on Hidden Markov Model

表2　约束条件
Table 2　Constraints

约束条件	描述
丢包率	不超过2%
数据新鲜度阈值	不超过60 s
最小剩余能量等级	不低于15%

多目标优化模型求解流程如图2所示。为研究方便,将目标函数形式化为带权重的线性组合,其中能耗项采用指数加权法强化对高功耗状态的惩罚,时延项引入对数函数压缩极端值的影响。决策变量涵盖扩频因子、发射功率、采样频率、休眠窗口长度4个维度,形成16维解空间。求解算法采用改进型NSGA-II框架,同时引入约束支配排序机制以及自适应交叉算子,交叉概率从初始值0.85随迭代次数线性递减至0.65,变异概率动态调整范围为0.01~0.10。

4　算法编程实现

4.1　嵌入式系统架构

该研究中,研究团队基于FreeRTOS构建多任务管理系统,将节点功能划分为射频通信、数据采集、电源管理、异常监测4个优先级任务。其中,射频通信任务配置为最高优先级5级,采用事件驱动型触发机制,任务堆栈深度设定为1 024 B以确保LoRaWAN协议栈能够完整加载。硬件层采用SX1276射频芯片组支持FSK/OOK/LoRa多模调制,其LoRa模式提供-148 dBm接收灵敏度,该芯片工作模式切换时间直接影响功耗表现,发射模式下电流在17 dBm输出时能够达到89 mA峰值,而接收模式电流稳定在10.3 mA且与扩频因子无关。低功耗驱动通过STM32CubeMX生成的LL库搭建硬件抽象层,关键外设初始化代码采用__HAL_RCC_GPIOA_CLK_ENABLE()宏动态开启时钟域,并利用射频芯片的低切换时延特性,在非活跃时段调用__HAL_RCC_GPIOA_CLK_DISABLE()关闭闲置总线时钟。此外,电源管理任务集成TPS62740同步降压转换器实现动态电压调节,该器件在轻载条件下维持85%以上转换效率,深度休眠时将静态电流压制至0.9 μA。中断服务例程优化采用嵌套向量中断控制器配置,将ADC采样中断优先级设为2级,并启

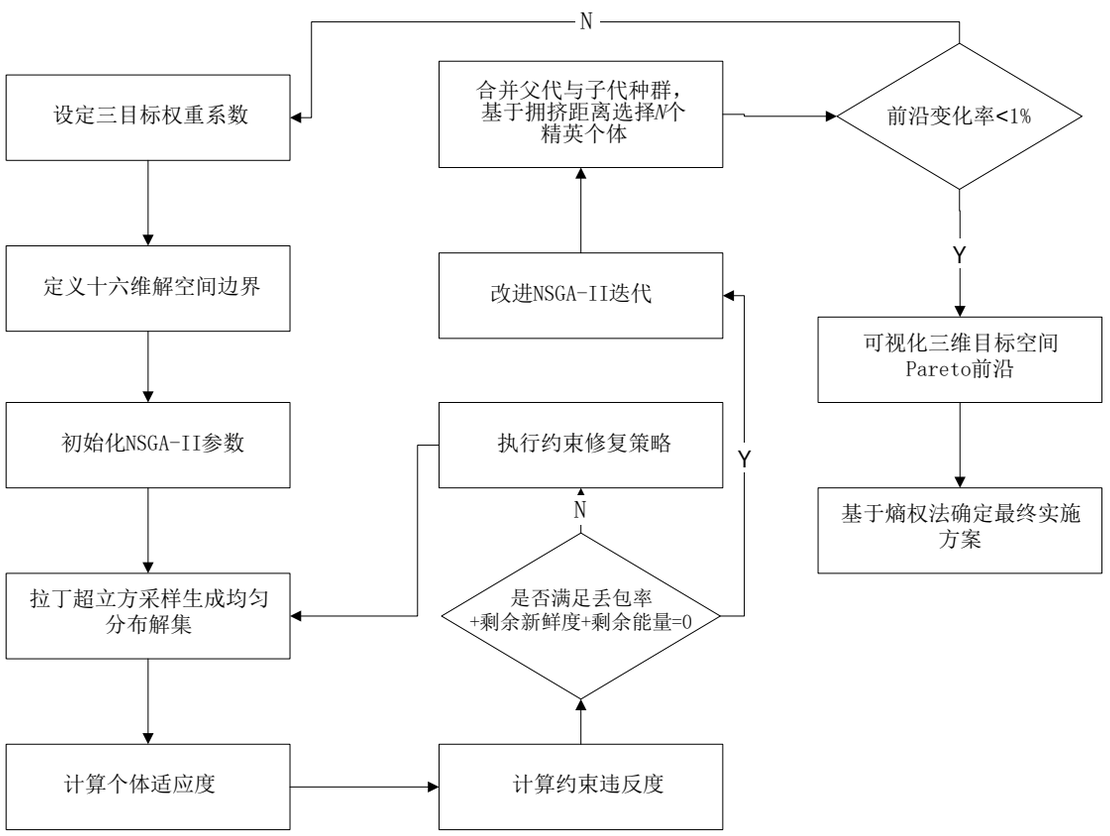


图2　多目标优化模型求解流程图

Fig. 2　Flowchart for solving multi-objective optimization models

用DMA传输模式,实测表明该设计能将ISR执行时间压缩至12 μs以下[8]。而在通信加速机制方面,针对SPI总线瓶颈,重构SDIO控制器驱动代码,通过32位FIFO缓冲与双缓冲交替机制,使射频模块的寄存器配置速率提升至18 Mb/s。

4.2　关键代码实现

自适应休眠调度核心逻辑实现如下:

```
void adaptive_sleep_scheduler() {
struct ChannelState cs = predict_channel_state();
if (cs. confidence > 0.7 && cs. snr_db > -110) {
uint32_t sleep_ticks = calculate_sleep_window(cs);
enter_stop_mode(sleep_ticks); // 调用低层电源管理函数
LL_LPM_EnableSleep(); // 启用STOP模式
} else {
enable_light_sleep_with_watchdog();
}
adjust_radio_power(cs. tx_power_level);
}
```

Q-learning传输决策算法嵌入射频驱动层:

```
void q_learning_decision() {
QState state = get_current_state();
QAction action = q_table [state. index] [find_max_q()];
if(action. frame_size > MAX_MTU)
action. frame_size = apply_fragmentation();
execute_transmission(action);
update_q_table (state, action, calculate_reward());
}
```

4.3　编译优化策略

研究人员在Makefile中设置CFLAGS += -Os -ffunction-sections -fdata-sections链接时优化参数,通过GCC的__attribute__((section(".fast_code")))指令将高频访问函数定位到零等待状态存储器区域;内存访问模式优化采用DMA双缓冲机制,定义ALIGN_32BYTE宏强制关键数据结构32 B对齐,使L1缓存命中率提升至92%;外设时钟门控通过修改RCC_AHB1ENR寄存器实现精细控制,具体程序为

```
void clock_gating_control() {
RCC->AHB1ENR | = RCC_AHB1ENR_GPIOAEN; // 使能GPIOA时钟
RCC->AHB1ENR & = ~RCC_AHB1ENR_GPIOBEN; // 关闭GPIOB时钟
__DSB(); // 数据同步屏障
}
```

5　实验验证

5.1　实验平台搭建

为验证LoRa感知节点低功耗优化算法的有效性,搭建了完整的实验环境,包括采用NI PXIe-1082Q机箱构建多物理场测试平台,配备RFX2450射频模块模拟2.4 GHz/868 MHz双频段干扰信号,干扰强度在-105~-80 dBm内可编程调节[9];能量监测装置选用Keysight N6785A源表模块,集成0.1 μA分辨率电流探头与1 mV精度电压采样通道,通过LAN接口实现10 Hz采样率数据的同步采集。基准对比方案选取Semtech官方参考设计V2.3与TINYOS经典低功耗算法,部署在相同硬件平台的独立测试节点组内。测试场景配置如表3所示。

5.2　实验结果分析

为评估系统性能,将平均功耗、网络生存周期、数据传输的可靠性、系统响应时间作为评估指标,各指标的测量方法及评估标准如表4所示。

根据表4的测量方法,分别采用本文算法和传统方案比较不同场景下的功耗与生存周期,结果如图3~4所示。

表3　监测模式及参数设置

Table 3　Monitoring mode and parameter settings

模式	参数设置
静态监测模式	节点以5 min间隔上报环境数据
事件触发模式	加速度阈值设为0.5 m/s^2,温变速率阈值0.2 ℃/s
混合供电模式	光伏模拟器输出200~1 000 lux动态光照

表4　系统性能评估指标
Table 4　System performance evaluation indicators

指标名称	测量方法	评估标准
平均功耗	连续72 h电流积分求均值	≤50 μA(静态场景)
网络生存周期	2 500 mAh电池容量/平均功耗	≥18 m
数据包送达率	Wireshark协议分析仪统计ACK确认率	≥98%
唤醒响应时间	数字存储示波器捕获中断触发至射频就绪时延	≤2 ms

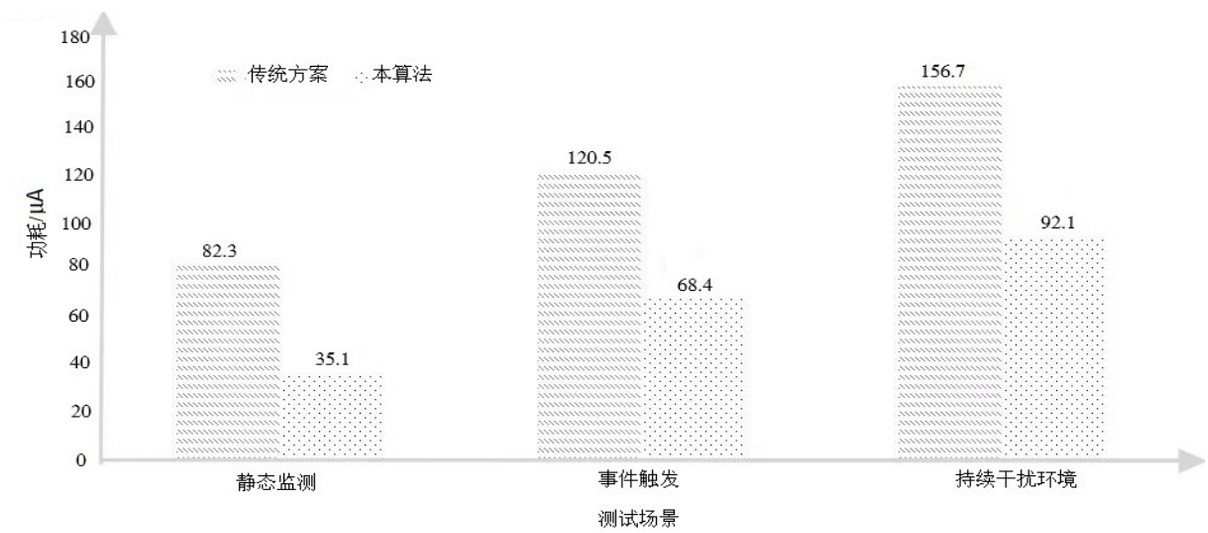


图3　场景功耗对比
Fig. 3　Comparison of scene power consumption

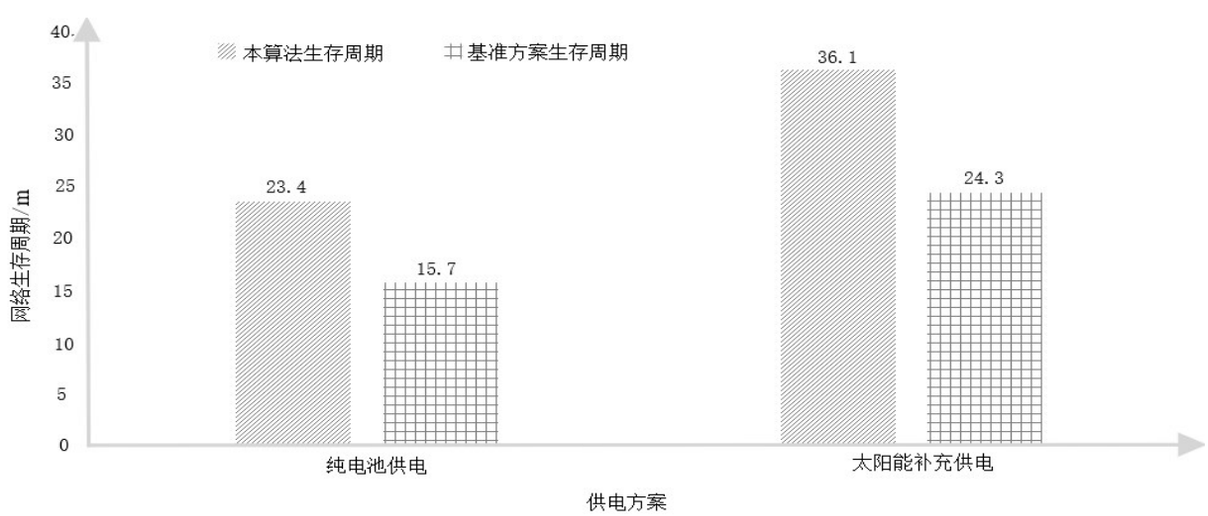


图4　网络生存周期对比
Fig. 4　Comparison of network life cycle

分析图3可以发现,本文算法在所有场景下都表现出了明显的功耗优化效果,特别是在静态监测场景下,平均功耗为35.1 μA,较传统方案能耗82.3 μA优化57.35%。主要原因是关键优化因素如自适应休眠窗口调节、Q-learning传输决策优化以及信道预测模型精准度提升等都能有效地降低了功耗[10]。

分析图4可以发现,无论是纯电池供电还是

太阳能补充供电,本文算法都显著延长了网络的生存周期。具体地说,在纯电池供电模式下,网络生存周期延长了49. 04%,而在太阳能补充供电模式下,延长幅度为48. 56%。

表5基于平均功耗、丢包率、网络生存周期、时延4个关键指标的权衡关系,结合物联网低功耗节点的设计目标与应用场景需求得出结论:该Pareto前沿系统性揭示了算法在能耗、可靠性、寿命和响应速度之间的固有冲突与协调机制,其中P1与P4定义了性能边界,P2与P3填充了关键过渡域,共同验证了算法通过权重调整实现多目标优化的鲁棒性。功耗每增加1 μA可提升生存周期约0. 4个月,但需以丢包率上升0. 1%以及时延降低0. 3 s为代价,证明用户可基于场景定制解决方案。从数据趋势方面来看,测试点沿P1→P4的演进显示功耗与生存周期呈强正相关的关系,P1至P4功耗提升88. 7%,生存周期增长53. 6%,其线性拟合斜率表明平均每提升1 μA功耗可换取0. 4个月寿命延长,功耗增加源于射频模块激活频率上升,缩短了休眠时间从而加速数据处理,但这一增益伴随丢包率从0. 9%升至2. 0%,接近≤2%的约束上限,反映出高功耗下信道冲突概率增加的实际情况。同时,时延从2. 1 s压缩至0. 9 s,这种权衡凸显核心矛盾,即生存周期最大化需最小化功耗,但会牺牲实时性,而时延最小化则需要高功耗支持持续计算,却缩短电池寿命,该冲突通过Pareto前沿的非支配特性得以量化。

表5　多目标优化Pareto前沿

Table 5　Pareto frontier of multi-objective optimization

测试点	平均功耗/μA	丢包率/%	网络生存周期/m	时延/s
P1	28. 4	0. 9	19. 2	2. 1
P2	35. 1	1. 2	23. 4	1. 8
P3	42. 7	1. 8	26. 7	1. 3
P4	53. 6	2. 0	29. 5	0. 9

此外,各测试点的适用场景通过参数组合进行了明确的界定。其中,P1适合对能源极度敏感的静态监测,其超低功耗优先策略以时延劣化为代价。P2作为动态约束下最优均衡点,时延较P1降低14. 3%且丢包率可控,完美匹配工业监测场景。P3凸显生存周期优先策略,时延降至1. 3 s,但丢包率逼近阈值,适用于偏远地区生态监测[11]。P4以最大功耗支撑峰值可持续性,时延极低却依赖高能耗硬件,适合于太阳能补能场景。

6　结语

在物联网边缘计算快速发展的背景下,LoRa感知节点作为物理世界与数字空间的关键接口,其能耗表现直接影响着大规模部署的可行性与可持续性。传统方案普遍面临射频模块高能耗、动态环境适应性差、多目标优化耦合复杂等技术瓶颈,难以满足智慧城市、工业监测等场景对长周期可靠运行的严苛需求。

参考文献:

[1] 童率, 王继良. 低功耗广域网LoRa技术进展与研究挑战[J]. 电子学报, 2024, 52(10): 3623-3642.

[2] 须民健, 凌睿, 郭鸿雁, 等. 基于LoRa的长大隧道(群)数据传输技术研究与开发[J]. 现代隧道技术, 2024, 61(4): 135-141.

[3] 王大涛, 滕德贵, 王灵犀. 基于LoRa的多传感器低功耗数据采集方法[J]. 现代电子技术, 2024, 47(10): 23-27.

[4] 徐玉坡. 基于LoRa和振弦式传感器的低功耗钢轨温度力监测技术[J]. 铁道建筑, 2024, 64(4): 28-33.

[5] 冯陆崴, 朱丰源, 田晓华. 基于模拟扩频信号处理的超低功耗LoRa唤醒机制[J]. 信号处理, 2023, 39(6): 1079-1088.

[6] LAZARO M, LAZARO A, VILLARINO R, et al. Home surveillance system based on LoRa backscattering[J]. Scientific Reports, 2025, 15: 12063.

[7] CHEN Q, YIN J H, YU L, et al. Multi-MELO: Unified multimodal model editing with dynamic LoRA[J]. Expert Systems with Applications, 2025, 273: 126766.

[8] 赵隆, 张甜, 黄新波, 等. 智慧输电线路接续管状态实时感知技术研究[J]. 高压电器, 2020, 56(9): 114-121, 128.

[9] 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.

[10] 杨鹏城, 刘砚一, 陈书畅, 等. 基于LoRa组网的超低功耗径流含沙量检测系统[J]. 南京林业大学学报(自然科学

版), 2025, 49(2): 161-168.

[11] ASAAD S M, MAGHDID H S, ABDUL Z K. Hybrid positioning technique using the existing Wi-Fi and LoRa technologies (Wi-Lo)[J]. Expert Systems with Applications, 2025, 276: 127127.

Research on Low Power Optimization Algorithm and Programming Implementation for LoRa Sensing Nodes

HE Lijuan

(College of Big Data and Artificial Intelligence, Anhui Xinhua University, Hefei Anhui 230088, China)

Abstract: Aiming at the energy consumption bottleneck of LoRa sensing nodes in edge computing of the Internet of Things, this research, based on the analysis of energy consumption composition, breaks through the dilemma of excessively high traditional radio frequency energy consumption from three aspects of protocol stack optimization, hardware reconfiguration and algorithm innovation. By comparing the proposed scheme with the traditional scheme, it was found that the average power consumption of our algorithm in static scenes was 35.1 μA, which was optimized by 57.35% compared to the traditional scheme with an energy consumption of 82.3 μA. In the case of pure battery power supply, the network lifetime of this algorithm can reach 23.4 months, which is 49.04% longer than that of the traditional solution. The experimental results verify the multi-objective trade-off capability of the algorithm: Under dynamic constraints, point P2 achieves a balance between energy consumption and latency, making it suitable for scenarios such as industrial monitoring. By adjusting parameters, users can flexibly select other Pareto points to meet different application requirements.

Keywords: LoRaWAN protocol stack; Q-learning transmission decision-making; RTOS task partitioning

(责任编辑:邵 茗)

(上接第 15 页)

but with the increase of cycles, the expansion of shrinkage cracks leads to the continuous deterioration of strength. There exists an optimal range for the length and content of wheat straw fibers to achieve their reinforcing effect. When the fiber content is 0.2% and the fiber length is 15 mm, the compressive strength of the fiber-reinforced cement-soil reaches its peak after dry-wet cycles, with an increase of 10.1%. Meanwhile, its flexural strength loss is only 10.76%, which is much lower than the 19.95% of plain cement-soil. This significant performance difference confirms that adding wheat straw fibers can effectively improve the dry-wet resistance of cement-soil.

Keywords: cement soil; dry-wet cycle; compressive strength; wheat straw fiber; flexural strength

(责任编辑:陈 虹)