

# Design and Implementation of Low-Power Network Communication Protocols in IoT Scenarios

Hua Liu Zimeng Wang

Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an, Shaanxi, 710100, China

## Abstract

With the continuous expansion of the scale and application depth of the Internet of Things, a large number of terminal nodes deployed in outdoor, underground, industrial and other environments rely on battery power for a long time. Traditional network protocols designed for high bandwidth and high throughput scenarios are difficult to adapt to such requirements in terms of energy consumption and complexity. How to achieve "multi grade" battery life and acceptable latency and reliability under limited computing and storage resource constraints has become a core proposition in the research of IoT network and link layers. On the basis of analyzing the core requirements of low-power communication in the Internet of Things, sorting out the advantages and disadvantages of mainstream protocols such as ZigBee, BLE, LoRaWAN, NB IoT, etc., this article proposes a lightweight low-power network communication protocol for medium to short distance self-organizing network scenarios.

## Keywords

Internet of Things; low power communication; network protocol; duty cycle control

## 物联网场景中低功耗网络通信协议设计与实现

刘华 王子盟

西安邮电大学, 中国·陕西 西安 710100

## 摘要

随着物联网规模和应用深度的不断扩展,大量部署在野外、地下、工业现场等环境中的终端节点长期依赖电池供电,传统为高带宽、高吞吐场景设计的网络协议在能耗与复杂度方面均难以适配此类需求。如何在有限计算与存储资源约束下,实现“多年级”续航与可接受的时延、可靠性,成为物联网网络层与链路层研究的核心命题。本文在分析物联网低功耗通信核心需求、梳理 ZigBee、BLE、LoRaWAN、NB-IoT 等主流协议优劣的基础上,提出一种面向中短距自组网场景的轻量级低功耗网络通信协议。

## 关键词

物联网; 低功耗通信; 网络协议; 占空比控制

## 1 引言

物联网系统中,大规模异构终端通过无线网络接入云端或边缘平台,实现对环境、设备与过程的实时感知与智能控制。与传统互联网终端不同,物联网节点往往部署在供电与维护条件受限的场所,长期依赖一次性电池或小型蓄电池供电,现场维护成本远高于设备本身成本。在这类场景中,如何通过协议与算法设计充分挖掘硬件节能潜力,使节点在满足业务需求的同时实现长期稳定运行,是系统工程设计的关键。无线通信作为能耗最高的子系统之一,直接决定了节点平均电流和电池寿命,其协议行为对整体能耗分布具有决定性影响。

**【作者简介】**刘华(1977-),男,中国陕西西安人,硕士,助理工程师,从事网络安全、光纤通信研究。

## 2 物联网低功耗网络通信相关技术基础

### 2.1 物联网低功耗通信核心需求

从能量视角来看,无线节点一个工作周期内的平均功耗可近似表示为:

$$P_{\text{avg}} = \frac{E_{\text{tx}} + E_{\text{rx}} + E_{\text{idle}} + E_{\text{sleep}}}{T}$$

其中  $E_{\text{tx}}$ 、 $E_{\text{rx}}$ 、 $E_{\text{idle}}$ 、 $E_{\text{sleep}}$  分别对应发送、接收、空闲监听和睡眠阶段的能量消耗,  $T$  为工作周期长度。由于典型射频芯片在发送与接收状态下的工作电流通常是深度睡眠电流的两个数量级以上,降低平均功耗的根本途径在于缩短 TX/RX 时间片和空闲监听时间,将节点的大部分时间推入低功耗模式<sup>[1]</sup>。

在此约束下,物联网低功耗通信协议需同时满足若干相互牵制的需求:其一,保证终端在大部分时间关闭射频电路的前提下,仍能在规定时延约束内完成数据上报与控制下

发；其二，针对数十至数百节点规模的局域部署，协议应具备良好的可扩展性，控制信令不致随网络规模线性甚至指数膨胀；其三，在室内多径、户外阴影衰落等复杂无线信道环境中维持足够的投递率与链路稳定性；其四，为防范窃听与伪装节点，应提供轻量级加密认证机制，但避免引入过重的计算负担。

## 2.2 主流低功耗通信协议对比分析

当前广泛应用的物联网低功耗协议大致分为短距自组网和广域低功耗两类。ZigBee 基于 IEEE 802.15.4 物理层，支持星型、树型与网状拓扑，通过 CSMA/CA 与可选的时隙机制协调接入，其优点是协议栈成熟、互操作性较好，在家庭与工业短距监测中应用广泛，但网络层结构相对复杂，小规模部署中存在“为通用性付出过高开销”的问题。BLE 通过广播与连接事件实现间歇性通信，空口占用时间较短，功耗控制能力较强，但原生设计面向点对点或小规模星型网络，对多跳路由与大规模自组支持有限<sup>[2]</sup>。

LoRaWAN 与 Sigfox 等 LPWAN 技术则通过扩频与极窄带调制在亚 GHz 频段实现公里级覆盖，适合小数据量、低频率上报场景，能耗极低，但传输时延大、下行能力与双向交互受限，不适合需要较强实时性或频繁控制交互的场合。NB-IoT 在蜂窝网络基础设施上演进而来，提供运营级覆盖与可靠性，但终端模组成本与网络资费对成本敏感、部署规模巨大的应用构成现实阻碍。整体来看，不同协议在覆盖半径、数据速率、网络结构与能耗指标之间采取了不同权重的折衷，直接照搬往往难以针对具体业务达到最优。

## 2.3 低功耗通信关键技术支持

实现低功耗无线通信离不开物理层到网络层的多层协同。从物理层看，适当降低比特率、选用窄带或扩频调制方式，有利于在保证链接预算的前提下降低发射功率；加入前向纠错编码则能在增加少量冗余的情况下，减少上层重传需求。链路层方面，核心手段包括占空比控制、低功耗监听和时隙化接入。通过将时间划分为一系列周期，并在周期内仅保留短暂的唤醒窗口用于信标同步或数据收发，其余时间关闭射频模块，可以显著压缩 RX 与 idle 的时间份额<sup>[3]</sup>。

网络层与传输层则通过路由选择、重传策略与拥塞控制在可靠性与能耗间寻找平衡。例如，使用代价函数综合考虑跳数、链路质量和中继节点剩余能量，引导流量避开电量过低节点，延缓网络整体失效时间；采用轻量级、有限次重传机制避免长时间“僵持”在极差链路上。形式上，网络寿命可近似写为：

$$L = \frac{C_{bat}}{I_{avg}}$$

其中， $C_{bat}$  为电池有效容量； $I_{avg}$  为节点长期平均电流。协议设计的核心任务，就是在满足业务刚性约束（如最大传输时延、最小投递率）的前提下，尽可能降低  $I_{avg}$ ，从而提升  $L$ 。

## 3 物联网低功耗网络通信协议设计

### 3.1 协议整体架构设计

针对以环境监测、结构健康监测等周期性上报业务为主的场景，本文设计的协议采用精简分层架构，下自物理适配，上至应用抽象，层间接口清晰。网络拓扑形态选用“簇内星型 + 簇间树型”的混合结构：普通节点只与簇首通信，簇首再通过多跳树形结构连接至汇聚节点。此种结构既避免了完全网状拓扑的大量路由维护开销，又比简单星型具有更好的覆盖与鲁棒性<sup>[4]</sup>。

协议栈从下至上包括：物理接入适配层（PHY-SAP）、低功耗 MAC 层、精简网络层与应用服务层。物理层基于 Sub-GHz ISM 频段 FSK 调制，数据率可在 38.4–100 kbps 范围内配置，以适应不同场景对传输速率与接收灵敏度的权衡。MAC 层整体采用周期性同步信标 + 预约发送的机制，每个工作周期开始时，簇首广播时间同步信标，随后进入若干数据子窗口，普通节点根据自身上报计划在分配到的窗口中短暂唤醒并完成数据交互。网络层提供基于树高与链路质量的路由选择，采用简化的距离向量思想，各节点仅维护到汇聚节点的最小代价和下一跳信息，降低存储与计算压力。

### 3.2 核心模块设计

在具体功能层面，协议由邻居发现与维护、时间同步、MAC 状态机、路由维护与安全机制等若干核心模块构成。邻居发现模块主要工作于网络部署与拓扑重构阶段，通过簇首或汇聚节点触发的有限轮广播探测，实现候选父节点集合的建立。每个探测报文携带节点 ID、剩余能量百分比及到汇聚节点的当前代价估计值，接收节点据此更新自身路由表。时间同步模块利用簇首定期发送的时间戳信标，结合本地接收时间与历史偏差，采用一次线性回归估计并补偿时钟漂移，在几十个周期内维持毫秒级同步精度，满足唤醒窗口对齐需求。

MAC 状态机抽象为 SLEEP、LISTEN、TX、RX 四种状态，通过定时器中断与上层事件触发进行迁移。节点默认处于 SLEEP 状态，仅在预定信标窗口与自身子窗口前后唤醒进入 LISTEN 或 TX/RX 状态，状态机逻辑在保证唤醒及时性的同时，尽量减少不必要的短时切换。

### 3.3 低功耗优化设计

为了充分释放硬件低功耗潜力，协议在睡眠调度、发射功率自适应和报文压缩等维度进行了针对性设计。在睡眠调度方面，除固定的同步信标窗口外，节点的业务上报周期可根据应用层配置与本地状态自适应调整，对于缓变环境量，可通过在本地进行简单变化率估计，动态拉长上报周期，减少射频唤醒次数；对于事件驱动量，则设置极低频度的心跳包以维持路由活性，只有当本地监测值突破阈值时才抢占最近的空闲子窗口发起上报。

发射功率控制基于近期若干数据帧的接收信号强度指

示(RSSI)与链路质量指示(LQI),构造简单的反馈控制律,在保证接收端解调裕量的前提下降低不必要的功率冗余。报文压缩方面,对同一节点在多个周期内采集的标量监测数据采用差分编码与简单游程压缩,将多组样本封装在一帧传输,头部则通过约定短地址、压缩路由标识等方式减少字节数,从而在总体业务量既定的情况下缩短射频开启时长。综合这些手段,可在物理通信参数不变的前提下显著降低平均电流,使节点网络寿命得到有效延长。

## 4 物联网低功耗网络通信协议实现

### 4.1 开发环境搭建

在实现层面,选择集成 ARM Cortex-M4F 内核的低功耗微控制器配合 Sub-GHz 射频收发芯片作为硬件平台,操作系统采用裁剪后的 FreeRTOS 内核,利用其任务调度与定时器服务支撑协议栈各模块运行。软件开发环境基于 GCC 编译工具链与 CMake 构建系统,调试工具采用 JTAG/SWD 在线仿真器。为精确评估功耗,在节点电源回路串联高精度采样电阻,通过数字示波器或功耗分析仪采集节点在不同状态下的电流波形,并以脚本方式对波形进行积分与统计,得到平均电流与占空比等指标。

网络调试与抓包分析则通过两条路径进行:一是通过串口日志记录节点关键事件与状态转换信息,用于回溯协议行为;二是利用额外的射频嗅探节点在空中捕获数据帧,将其导入自编写的 PC 端解析工具,对帧格式、重传行为与时序关系进行可视化,从而快速定位协议实现中的逻辑错误和边界问题。

### 4.2 各模块代码实现

在代码组织上,协议栈被划分为若干功能清晰的 C 模块:mac.c 负责 MAC 状态机实现、帧队列管理与退避算法;net.c 处理邻居表、路由表维护以及数据帧的转发决策;sync.c 实现时间同步与时钟漂移估计;sec.c 封装加密与完整性校验接口;pm.c 则统一管理低功耗模式切换与外设时钟门控。主循环采用事件驱动结构,FreeRTOS 中仅保留少量高优先级任务,其余处理逻辑均由中断服务程序投递事件至队列,由主任务统一调度,既保证了实时性,又避免多任务切换带来的额外能耗。

MAC 状态机利用硬件定时器中断精确定时,在进入 SLEEP 前依据下一次唤醒时间配置唤醒中断;射频模块驱动采用非阻塞接口,发送与接收函数在启动后立即返回,真正的数据完成事件通过中断回调触发,从而避免 MCU 在 TX/RX 期间进行忙等待。路由模块在收到邻居通告或数据帧时更新链路质量统计量,周期性执行路由代价重计算,若发现更优父节点则切换下一跳,并触发路由更新上报,确

保整棵树在拓扑变化时能较快收敛<sup>[5]</sup>。安全模块调用硬件 AES 加速单元,通过 DMA 将数据块搬运至加密引擎,CPU 仅负责配置与状态轮询,显著缩短加解密时间。

### 4.3 协议调试与优化

协议初期调试阶段主要关注基本连通性与状态机正确性,通过在小规模(3-5个节点)的测试环境中逐步打开各功能模块,检查是否存在线程死锁、状态丢失与路由振荡等问题。待基础功能稳定后,扩展到 20 余节点的测试床,设置不同业务负载与链路条件,对数据投递率、端到端时延分布与路由开销进行统计。通过空口抓包比对,分析在高丢包率环境下重传策略是否合理,是否存在“同步丢失—频繁重进网”这类引发额外能耗与业务中断的问题<sup>[6]</sup>。

功耗优化阶段,则在不同参数组合下反复测量长期平均电流与丢包率,绘制出以占空比、信标周期、发射功率为自变量,以投递率为因变量的二维或三维曲面,从中选取满足应用需求的折中点。实践表明,在信道条件中等的环境监测场景下,通过适当放宽端到端时延约束、利用差分压缩帧发送,可以在不显著降低数据有效性的情况下,将节点平均电流控制在几十微安到一两毫安的范围,为多年级续航提供了物理基础。

## 5 结语

本文在系统分析物联网低功耗通信需求和主流协议特点的基础上,提出并实现了一种面向特定场景的轻量级低功耗网络通信协议。从协议整体架构、核心模块到低功耗优化机制,形成了一套可在资源受限嵌入式平台上落地的设计方案。通过在实际硬件平台上的代码实现与系统测试,验证了协议在保证数据投递率与时延可接受的前提下显著降低节点平均功耗的能力,说明针对应用特点进行协议裁剪与跨层优化是实现高效物联网系统的重要途径。

### 参考文献

- [1] 王健文,王子威,陈诗超.基于低功耗蓝牙的物联通信网络设计与实现[J].物联网技术,2017,7(2):2.DOI:10.16667/j.issn.2095-1302.2017.02.011.
- [2] 史杰.基于物联网的低功耗通信传输协议与安全接入机制设计[J].电脑编程技巧与维护,2024(5):151-153.
- [3] 李祯,陈广飞,崔立鹏.基于低功耗ARM的物联网Wi-Fi接入方案设计与实现[J].医疗卫生装备,2014.
- [4] 王兆海.建筑设备物联网中无线网络的设计与实现[D].山东建筑大学[2026-03-20].
- [5] 张明霞.面向工业物联网的低功耗广域网络传输协议优化[J].Electronic Communication & Computer Science,2025,7(9).
- [6] 孙伟.物联网环境下的低功耗嵌入式通信协议设计[J].数字通信世界,2025(3).