

# 基于 LoRa 自组网的电能采集系统设计与实现

陈德富<sup>1</sup>, 刘小湖<sup>1</sup>, 周旭文<sup>1</sup>, 邱宝象<sup>2</sup>, 吴华君<sup>2</sup>, 屈亮亮<sup>2</sup>

(1. 浙江工业大学 信息工程学院, 杭州 310023; 2. 万向钱潮股份有限公司, 杭州 311215)

**摘要:** 为了实现用电设备运行状况的远程监测, 需要对设备运行时的电能参数进行采集并上报至云平台; 针对上述目的, 本项目设计了一种基于 LoRa 自组网技术的电能采集系统, 整个系统主要由数据采集节点和集中器组成; 数据采集节点采用 RN8209 电能计量芯片实现负载电能数据的精确采集, 并通过 LoRa 通信模块将数据发送至集中器; 集中器采用了基于 NB-IoT 通信模块和 LoRa 通信模块的双模组设计, 通过 LoRa 模块接收节点上报的数据, 并通过 NB-IoT 模块转发至物联网云平台; 本系统利用 LoRa 载波侦听技术设计了基于 CSMA/CA 的星型自组网, 实现了节点与集中器间的无线通信, 适用于低成本、小规模的远程电能数据采集系统; 通过实验验证, 该方案的数据采集功能、LoRa 自组网通信功能和 NB-IoT 通信功能均能够正常实现, 达到了设计目标。

**关键词:** 电能采集; RN8209; LoRa 通信; CSMA/CA; 载波侦听; 星型自组网

## Design and Implementation of Power Collection System Based on LoRa Ad Hoc Network

CHEN Defu<sup>1</sup>, LIU Xiaohu<sup>1</sup>, ZHOU Xuwen<sup>1</sup>, QIU Baoxiang<sup>2</sup>, WU Huajun<sup>2</sup>, QU Liangliang<sup>2</sup>

(1. Zhejiang University of Technology, College of Information Engineering, Hangzhou 310023, China;

2. Wanxiang Qianchao Co., Ltd., Hangzhou 311215, China)

**Abstract:** In order to realize the remote monitoring of electrical equipment running status, it is necessary to collect and report the power data of equipment during operation to the cloud platform. For above purpose, a power acquisition system based on LoRa ad hoc network technology is designed, the whole system is mainly composed of data acquisition nodes and concentrators. The data acquisition node uses RN8209 power metering chip to accurately collect the load power data, and sends the data to the concentrator through the LoRa communication module. The concentrator adopts a dual-module design based on the NB-IoT communication module and LoRa communication module. The reported data of the node are received through the LoRa module, and forwarded to the IoT cloud platform through the NB-IoT module. This system uses the LoRa carrier sense technology to design a star-shaped ad hoc network based on CSMA/CA, which realizes wireless communication between nodes and concentrators, the design is suitable for low-cost, small-scale remote power data acquisition system. Through the experimental verification, the system functions of data acquisition, LoRa ad hoc network communication and NB-IoT communication can be normally realized, which achieves the design goal.

**Keywords:** power acquisition; RN8209; LoRa communication; CSMA/CA; carrier sense; star ad hoc network

## 0 引言

电能是当前社会活动的必需能源之一, 随着社会经济的发展, 电气设备日渐增多。然而各种设备分布广泛, 使人们难以获取设备的实时用电信息和运行状态, 从而造成了电能的浪费。物联网技术为这一难题带来了解决方案, 然而当前各种物联网模组价格、性能不一, 适用的场景也不尽相同, 因此设计出一种低成本的、满足特定场景需求的远程电能采集系统对能源的可持续发展具有重要意义。

目前广泛使用的物联网通信模组主要有蓝牙、ZigBee<sup>[1]</sup>、NB-IoT<sup>[2]</sup>和 LoRa<sup>[3]</sup>等。其中, 蓝牙和 ZigBee 虽然已经发展出了成熟的开发协议栈, 但它们的实测通信距离通常不足二十米, 并且易受障碍物的影响, 因此主要用于短距离通信的智能家居等领域。NB-IoT 和 LoRa 通信距离

较远, 是低功耗广域网中最开放和成熟的技术, 目前广泛用于水表、电表等远程无线抄表领域<sup>[4-7]</sup>。虽然 NB-IoT 具备覆盖广、连接多和低功耗等众多优势, 但它构建于蜂窝网络, 对基站的依赖性较高, 并且需要定期向运营商支付流量费用, 对开发和运行维护的成本需求较高<sup>[8]</sup>。LoRa 技术基于开放频段, 可按需构建自主网络, 具有高度的自主性、可扩展性、灵活性和运行成本低等众多优势, 因此 LoRa 通信技术成为了首选。

无线传感器网络由具有无线收发功能的终端节点构成, 网络中的节点根据预设的算法和协议获取信道资源, 实现数据传输。与传统中心式的蜂窝网络不同, 无线自组网无需大型基站或网络设施的支持, 能够迅速、灵活、高效地部署网络终端设备。目前, 市场上的 LoRa 无线网络开发方

收稿日期: 2022-07-19; 修回日期: 2022-08-29。

作者简介: 陈德富(1981-), 男, 江苏盐城人, 博士研究生, 讲师, 主要从事物联网理论、嵌入式系统、数据智能方向的研究。

引用格式: 陈德富, 刘小湖, 周旭文, 等. 基于 LoRa 自组网的电能采集系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(3): 235-240, 261.

案主要有基于 LoRaWAN 协议<sup>[9]</sup>和基于 LoRa 网关两种方式, LoRaWAN 协议主要针对星型拓扑结构, 但并不适用于小规模无线传感器网络<sup>[10]</sup>; LoRa 网关可同时提供了 8 个下行信道, 传输距离可达几公里, 但目前的 LoRa 网关成本高达几百元, 并且开发难度大<sup>[11]</sup>, 因此也并不适用。综上所述, 本文针对用电设备远程监控的问题, 研究设计了一种基于 LoRa 自组网技术的低成本的、适用于网络规模较小的电能数据采集系统。

### 1 系统方案设计

本文设计了一种基于 LoRa 自组网的电能数据采集系统, 该系统整体为集中式的星型网络架构, 由一个集中器和若干终端节点组成。集中器的主要功能为通过 LoRa 模块收集终端上传的传感器数据并通过 NB-IoT 模块将数据打包上传至物联网云平台; 节点主要读取传感器中的电压电流数据, 使用 LoRa 模块按照特定的通信协议上传至集中器中。LoRa 无线通信部分采用了基于 CSMA/CA 协议<sup>[12]</sup>的设计方法来实现节点与集中器的无线通信, 使节点通过竞争信道的方式来获取信道资源, 实现数据上传。集中器和节点均使用同样规格的 LoRa 模块, 采用这样的自组网设计方式, 有效地降低了开发成本。系统总体框架图如图 1 所示。

#### 1.1 节点硬件设计

终端节点的核心硬件主要由微控制器电路、电能采集模块和 LoRa 通信模块组成, 节点的整体硬件结构如图 2 所示。电能采集部分使用电压互感器和电流互感器对用电设备运行时的电压电流进行转换, 将大电流信号转换到芯片可以处理的范围, 使用 RN8209 计量芯片<sup>[13]</sup>对转换后的电压电流进行采样处理, STM32 处理器通过 SPI 总线读取计量芯片内部的寄存器值。LoRa 通信模块由基于 SX1278 芯片<sup>[14]</sup>的 LoRa 模组构成, 处理器通过 SPI 总线与 LoRa 模块进行通信。

本文选用 STM32F103C8T6 型号芯片作为系统核心控制器, 与稳压供电电路、USART 串口通信接口、晶振电路和 LoRa 通信接口构成微控制器电路。芯片的最高工作频率可达 72 MHz, 具有 64 k 字节的可编程 FLASH 空间和 20 k 字节的 RAM 空间, 并支持 SPI、USART 等多种通信方式的外设, 完全满足实现本项目的硬件和软件设计的性能需求。

电能采集电路采用精密的 ZMPT107 电压互感器和电流互感器 TA1410 对 220 V 交流电压实现 1: 1 的电压转换, 对交流电流实现 5 A: 2.5 mA 的比例转换。RN8209 芯片

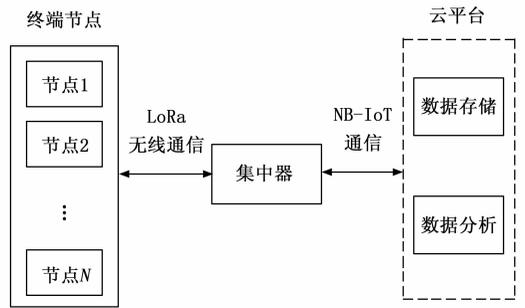


图 1 系统框图

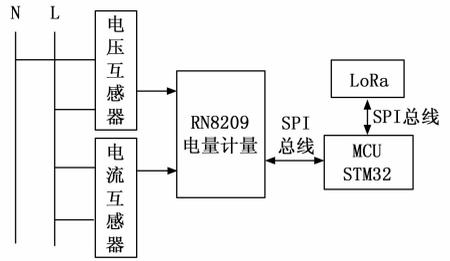


图 2 节点硬件结构图

与微控制器的 SPI1\_MOSI、SPI1\_MISO、SPI1\_CLK 和 SPI1\_CS 引脚相连, 电能采集电路的原理图如图 3 所示。该芯片是一款单相多功能专用计量芯片, 能测量有功功率、无功功率、有功能量以及无功能量; 同时提供两路独立的有功功率有效值、电压有效值、线频率和过零中断; 支持全数字的增益、相位和直流偏置校正, 并提供串行通信接口

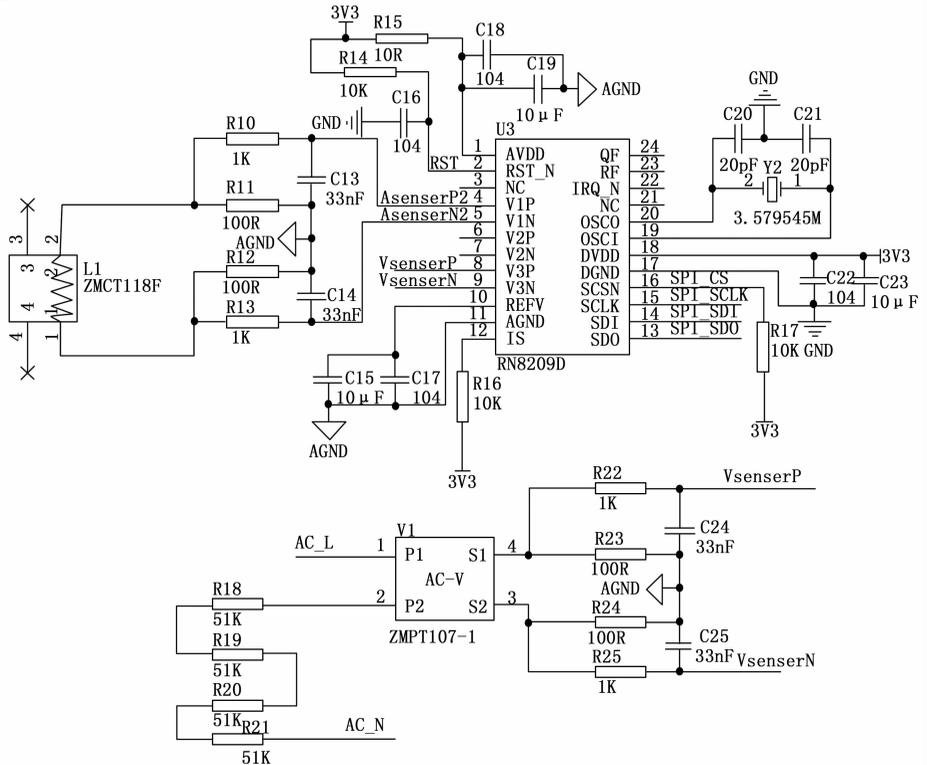


图 3 RN8209 应用电路原理图

SPI 和 UART; 内嵌的电源监测电路, 能保证上电和断电时芯片工作的可靠性。因此, 满足本系统的电能采集需求。

LoRa 通信模块采用了安信可公司所设计的 Ra-02 型号的 LoRa 模组, 与微控制器的 SPI2 引脚相连进行通信。该模组基于 SX1278 芯片, 支持 410 MHz 至 525 MHz 的通信频段, 支持 6 种调制方式, 适用于长距离的扩频无线通信, 理论通信距离可到达五公里, 具有较强的抗干扰能力和高可靠性, 接收灵敏度理论可达到 -140 dBm, 并支持最高 +20 dBm 的发射功率。同时, 该模块还具备低功耗的特性, 在接收模式下电流为 12.15 mA, 待机状态下的电流仅为 1 至 2 mA。

### 1.2 集中器硬件设计

集中器的核心硬件主要由微控制器电路、NB-IoT 通信电路和 LoRa 通信模块组成, 其中, 微控制器电路和 LoRa 通信模块采用与节点相同的设计方案。为了便于系统开发, NB-IoT 通信电路则直接采用基于移远公司的 BC26 模块进行设计。BC26 模块与 STM32 的 USART 串口的 TX 引脚和 RX 引脚相连接, STM32 通过串口向模块发送特定的 AT 指令字符串与模块进行通信, 用于控制 NB-IoT 模块的工作和数据发送。集中器通过 LoRa 通信模块接收各节点上发的数据包并解析, 然后将各节点数据封装成 MQTT 协议支持的格式, 上传至阿里云平台。

### 1.3 网络结构设计

本文设计了基于星型拓扑结构的无线传感器网络, 星型网络是具有低时延的简单网络结构, 消除了网络同步开销和跳数。由于 LoRa 模块本身具备较远的通信距离, 这使得 LoRa 节点无需像网状网络一样依靠中继节点和路由协议实现与远端网关的通信, 大大降低了 LoRa 传感器网络的复杂度和开发难度, 不需要设计庞大的网状结构来覆盖更大的范围<sup>[15]</sup>。网络拓扑结构如图 4 所示。

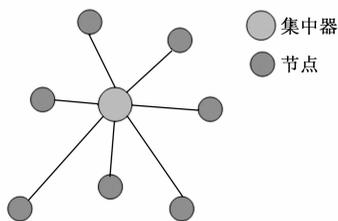


图 4 网络拓扑结构

## 2 CSMA/CA 协议

CSMA/CA 协议源于 ALOHA 协议<sup>[16]</sup>, 是一种基于竞争的带冲突避免的载波监听多址访问协议。CSMA/CA 协议规定, 节点在发送数据前首先使用载波侦听计数对当前信道进行检测, 当信道空闲时, 则延迟一次等待帧间间隔 (DIFS) 后再次检测, 若信道仍然空闲, 节点则获取当前退避窗口内的一个随机退避值并进入退避阶段。在退避阶段, 节点根据退避值进行退避计数, 每过一个时隙 (SlotTime), 若信道仍然保持空闲, 则退避值减 1。直到退避值减为 0,

表明节点成功竞争到信道, 允许发送数据帧 (DATA), 若节点在短帧间间隔 (SIFS) 内没有接收到应答帧 (ACK), 说明当前通信发送碰撞, 则节点根据预设的退避算法调整退避窗口 (CW) 的值以减小下一次通信发生冲突的概率。在退避阶段中, 若节点检测到信道忙碌, 则挂起当前退避值, 等待下一次信道空闲再重新进入退避阶段。图 5 展示了基本的基于 CSMA/CA 通信机制的两节点竞争通信过程。

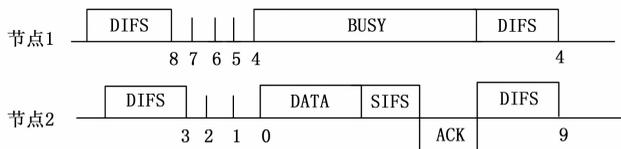


图 5 节点工作时序图

其中, 短帧间间隔 (SIFS) 是节点处理协议的最短时间, 用来保证节点对信道的占用, 以顺利完成帧数据的交换。由图 5 可知, SIFS 被用作 DATA 帧之后, SIFS 的大小由式 (1) 确定。其中, aRxRFDelay、aRxPLCPDelay 为射频接收延时, aMACPrdDelay 为节点处理 MAC 协议产生的延时, aRxTxTurnaroundTime 为射频收发模式的转换时间<sup>[17]</sup>。

$$aSIFSTime = aRxRFDelay + aRxPLCPDelay + aMACPrdDelay + aRxTxTurnaroundTime \quad (1)$$

时隙 (SlotTime) 是 MAC 协议中的最小时间单位, 协议中所有的时间都是其整数倍。等待帧间间隔 (DIFS) 是节点判定信道空闲的最小持续时间, 当检测到信道持续空闲 DIFS 时间后, 节点才能执行下一步的退避操作。DIFS 的大小由式 (2) 确定。

$$DIFS = aSIFSTime + 2 \times aSlotTime \quad (2)$$

### 2.1 握手机制

在无线网络通信中, 由于无线信号的覆盖范围有限, 会存在隐藏终端的问题<sup>[18]</sup>。假设节点 A、C 同时位于集中器 B 的覆盖范围之内, 而 A 和 C 彼此间信号不相互覆盖。当 A 正在向 B 发送数据的时候, 由于节点 C 侦听不到 A 的载波, 此时它会认为信道处于空闲从而接入信道。这就会造成集中器 B 在接收 A 的数据帧时发生冲突, 从而降低了信道吞吐量。

本文采用 RTS/CTS 握手机制来解决隐藏终端的问题。当节点需要发送数据时, 首先向集中器发送一个简短的 RTS 请求握手帧, 然后集中器会立即向节点发送一个简短的 CTS 帧进行回应, 当节点接收 CTS 信号时, 表明握手成功可以继续发送数据帧, 从而避免了直接发送较长的数据帧时因碰撞而造成较长时间的信道资源的浪费。因此, 本文采用了 RTS+CTS+DATA+ACK 的通信机制来克服上述问题。

### 2.2 退避算法

在 CSMA/CA 协议中, 退避算法的主要作用是为了保证网络中各节点公平地进行数据发送, 当节点间通信发生碰撞或通信成功时, 退避算法则会调整当前退避窗口, 以

减少冲突和延迟、提高吞吐量、提高网络性能<sup>[19]</sup>。

二进制指数退避算法<sup>[20]</sup> (BEB) 是最经典的退避算法。当节点通信发生冲突时, BEB 算法将当前竞争窗口值  $CW$  乘以 2, 若  $CW$  已达到最大值, 则不再增加。当通信成功时, 则将竞争窗口值  $CW$  下降至最小值, 节点随机退避值的取值范围则为 0 到  $CW$  之间的随机值, BEB 算法如式 (3) 所示。

$$\begin{cases} CW = CW_{\min} & \text{节点通信成功或超出最大重传次数} \\ CW = \min(2 \times CW, CW_{\max}) & \text{节点通信发生冲突} \end{cases} \quad (3)$$

在发生冲突时, 虽然 BEB 算法的倍乘操作能快速有效的解决冲突, 但当数据发送成功时, 它直接将竞争窗口重置为最小值, 这样总是使得上次发送成功的节点获取到最大的竞争优先权, 这样可能会导致网络中的不公平现象, 甚至出现信道一直被某一节点占用, 从而导致其它节点无法竞争到信道的极端情况。

为解决 BEB 算法存在的缺陷, 目前提出了一系列改进的退避算法, 如 EIED<sup>[21]</sup>、MILD<sup>[22]</sup> 和 MIMLD<sup>[23]</sup> 等。MILD 算法调整了冲突和成功时竞争窗口的更新规律, 当节点产生冲突, 则将当前竞争窗口  $CW$  乘以乘法因子  $\alpha$ , 当节点交互成功或是竞争窗口值达到上限后, MILD 采用线性递减的方法, 将竞争窗口值  $CW$  减去一个线性因子  $\beta$ , 使  $CW$  线性下降, 如式 (4) 所示。该算法使得  $CW$  的变化更加缓慢, 克服了 BEB 的极端不公平性。EIED 和 MIMLD 算法也采用了类似的思想, 即发生碰撞时, 通过扩大竞争窗口以快速摆脱冲突, 通信成功时缓慢减小竞争窗口, 同时也保证了一定的公平性。

$$\begin{cases} CW = \max(CW - \beta, CW_{\min}) & \text{节点通信成功} \\ CW = \min(\alpha \times CW, CW_{\max}) & \text{节点通信冲突} \end{cases} \quad (4)$$

### 2.3 网络参数确定

由前文可知, CSMA/CA 协议中有 DIFS、SlotTime、SIFS 三个重要的时间参数。在基于 LoRa 模块的 CSMA/CA 通信机制设计中, 上述参数的确定与 LoRa 模块的工作参数密切相关。主要由扩频因子 (SF)、带宽 (BW)、编码率 (CR) 决定, 不同的参数配置会导致时隙和各帧间间隔不同, 若没有匹配合适的时隙与帧间间隔, 则会导致网络性能的降低。在本文的系统设计中, LoRa 模块的工作参数均设置为  $SF=12$ ,  $BW=250$  kHz,  $CR=4/5$ , 前导码长度  $N_{\text{preamble}}=8$ , 即在数据速率  $DR=0.58$  kbps 的条件下, 确定系统时隙和帧间间隔的取值。

时隙 SlotTime 的确定方法为: 当某节点在某时隙向信道中发送数据后, 在下一个时隙前, 其它节点都能检测到信道已经转变为忙碌状态。因此, 上一时隙 LoRa 数据包中的前导码部分在信道中的传输时长与下一时隙节点 CAD 检测信道的时长就决定了时隙长度, 时隙长度应大于等于二者中较长者。根据 LoRa 芯片手册, 前导码的传输时间由式 (5) 确定, 有 LoRa 参数计算可得, 前导码的传输时间约为 205 ms。CAD 检测时长与 LoRa 参数的关系如表 1 所示。因此, 本文选择将 SlotTime 的大小设置为 205 ms。

$$T_{\text{premb}} = (N_{\text{premb}} + 4.5) \times \frac{2^{SF}}{BW} \quad (5)$$

表 1 CAD 检测时长与  $BW$ (kHz)、 $SF$  的关系

$SF \backslash BW$	500	250	125
7	0.8	1.2	1.8
8	1.7	2.3	3.5
9	3.7	4.8	7
10	8	10.1	14.3
11	17	21.2	29.3
12	36.3	44.6	61.1

SIFS 的大小由射频接收延时、MAC 协议解析处理协延时和射频收发模式的转换延时共同确定。根据 LoRa 芯片手册可知, 射频接收延时和射频收发模式转换的时间都是微小的, 通常不足 1 ms。经过实验测试, 单片机处理 MAC 协议的延时通常在 5 ms 左右。因此, 本文将 SIFS 的大小确定为 10 ms。最后根据式 (2), 将 DIFS 的大小确定为 420 ms。

### 2.4 网络性能仿真

常用的网络性能评估标准有吞吐量、网络利用率、数据丢包率等指标, 本文在 MatLab 中实现了 CSMA/CA 协议的仿真, 在随着系统节点的不断增加的情况下, 测试了第 2 小节中的 4 种不同退避算法, 并比较其网络利用率的性能表现。

设定一个具有  $N$  个节点的星型网络拓扑环境, 节点需要随机将数据上报给集中器, 从而形成竞争网络。退避算法的目的就是根据通信情况合理的调整退避窗口, 从而尽可能避免节点间通信发生碰撞, 减少网络中发生冲突的时间, 实现稳定的网络通信。无线网络利用率的定义如式 (6) 所示, 网络利用率用  $E$  表示, 其中  $T_{\text{total}}$  为总的网络通信时间,  $T_{\text{no\_collision}}$  表示未发生数据包碰撞的通信时间。E 越大, 网络中发生冲突的时间就越短, 表明退避算法的性能更加优越。

$$E = \frac{T_{\text{no\_collision}}}{T_{\text{total}}} \quad (6)$$

在仿真实验中, 设置节点数量由 1 到 100 递增, 仿真时间  $T_{\text{total}}=500$  s, 得到的网络利用率随节点数量递增的变化曲线如图 6 所示。由图中曲线可知, 当网络中节点较少时, 各退避算法的表现性能均相差不大。随着网络节点数量的增加, BEB 算法由于在上一次通信成功时直接将退避窗口调整为最小值, 因此性能急剧下降, EIED 算法由于只是将退避窗口调整为原来的 9/10, 因此性能相对 BEB 算法较好。MILD 采用乘性增加、线性递减的策略, 当节点数量逐渐增多时, 展现了比 BEB 和 EIED 算法更好的性能。MIMLD 根据当前  $CW$  的值来判断网络的拥堵情况, 以此来采取不同的策略调整  $CW$ , 在 4 种退避算法中, 具有最好的性能表现。因此, 本系统采取了基于 MIMLD 退避算法的 CSMA/CA 协议设计。

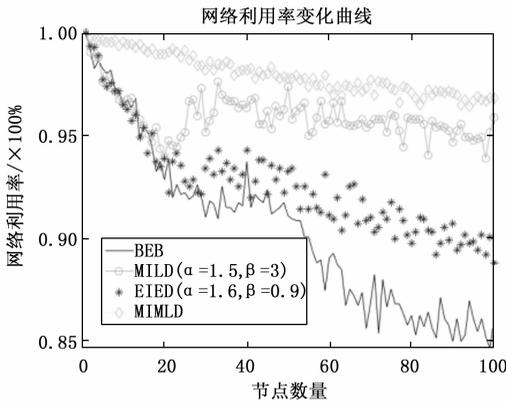


图6 网络利用率仿真结果

### 3 系统软件设计

要实现基于 CSMA/CA 协议的传感器网络设计, 前提是节点设备可以进行载波侦听, 即判断当前信道是否被占用, LoRa 模块提供了 CAD 工作模式以实现对信道的侦听。一个完整的 LoRa 数据包主要由前导码、数据有效负载和可选报头组成。在 CAD 模式下, LoRa 模块将高效扫描当前信道, 用于检测当前信道中是否存在前导码信息。若检测到前导码, LoRa 模块会产生相应的 CAD 中断信号, 表明当前信道中有正在传输的 LoRa 数据包, 即信道处于忙碌状态。

#### 3.1 通信协议设计

由于节点和集中器间采用了 RTS + CTS + DATA + ACK 的通信机制, 因此本文针对这 4 种数据帧设计了对应的通信数据包, 数据包格式如图 7 所示。其中, RTS 数据包用于节点向集中器发送握手请求, 主要由网络标识符 (net\_flag)、PANID、节点设备地址 (dev\_addr)、标识字符 'R' 和校验和 (chksum) 组成。CTS 数据包用于集中器发送握手响应指令, 当节点收到 CTS 信号, 表明握手成功。根据系统的设计需求, DATA 数据帧除了包含网络标识符、PANID、设备地址和校验和外, 还具备数据包标识字符 'D'、4 字节的电压有效值 (Urms) 和电流有效值 (Irms)。ACK 数据包则用于集中器向节点发送数据包的应答信号, 表明集中器成功接收数据包。

	1Byte	2Byte	2Byte	1Byte	1Byte		
RTS	net_flag	PANID	dev_addr	" R*	chksum		
CTS	net_flag	PANID	dev_addr	" C*	chksum		
DATA	net_flag	PANID	dev_addr	" D*	Urms	Irms	chksum
ACK	net_flag	PANID	dev_addr	" A*	chksum		

图7 数据包格式

#### 3.2 节点软件设计

由于系统采用基于随机竞争的 MAC 协议进行通信, 因此节点端的数据发送方式也采用随机发送的策略。在本系

统的软件设计中, 当检测到用电设备的电流有效值发生大于 5 mA 的变化时, 即认为负载设备的运行状态发生变化, 例如设备从断电状态变为上电运行状态。此时节点立即尝试获取信道资源, 将当前设备的电压电流有效值打包后发送至集中器, 在其它情况下都将 LoRa 模块设置为空闲模式, 以降低 LoRa 模块的功耗。

本系统中的 LoRa 节点主要在 CAD 模式、空闲模式、接收模式、发送模式这 4 种工作模式间切换。节点上电后初始化为空闲模式, 当有数据要发送时, 节点立即进入 CAD 检测模式, 若检测到信道连续空闲时间达到 DIFS, 则获取随机退避值, 进入退避阶段。当随机退避值减为 0 时, 则表明节点成功竞争到信道, 然后切换至发送模式发送 RTS, 发送完毕后进入接收模式等待 CTS 信号。若经过 SIFS 时间后, 仍未收到 CTS 信号, 则说明当前发生超时, 节点回到空闲模式, 等待下次数据发送; 若成功接收 CTS 信号则切换到发送模式发送 DATA 帧, 并等待接收 ACK 帧。在节点通信过程中, 若发生超时和数据包解析错误, 则节点根据退避算法调整 CW 值并切换为空闲模式。节点的通信流程如图 8 所示。

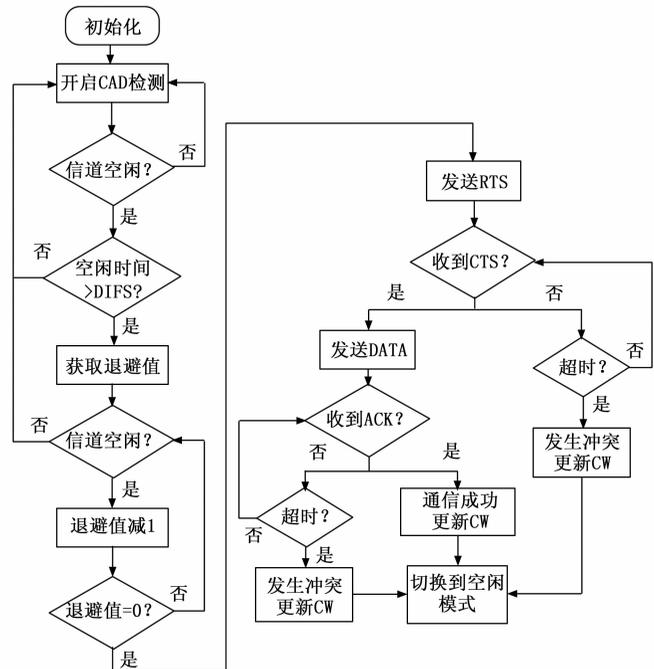


图8 节点端通信流程图

#### 3.3 集中器软件设计

集中器主要由 NB-IoT 通信任务和 LoRa 通信任务组成。集中器上电时, 首先运行 NB-IoT 任务, 主要包括初始化硬件接口, 测试模块是否工作正常, 并与云平台建立连接。集中器的 LoRa 模块主要工作在接收模式和发送模式, 当 NB 模块初始化完成后即开启接收, 用于接收节点发送的 RTS 帧和 DATA 帧。然后解析接收到的数据包, 构造对应的 CTS 帧和 ACK 帧并转换为发送模式发送至节点, 集中器的 LoRa 通信流程如图 9 所示。最后, 由 NB-IoT 任务周

期性的将采集到的各节点数据封装成 MQTT 协议支持的格式并发送至物联网云平台。

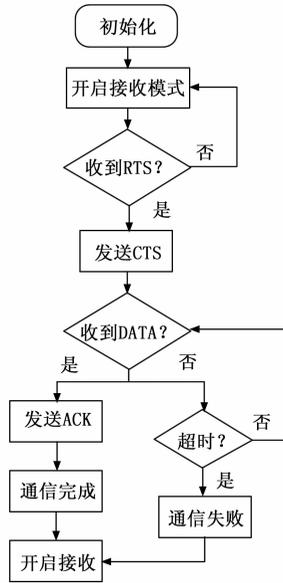


图 9 集中器通信流程图

### 4 实验结果与分析

实验测试环境由 4 个 LoRa 节点和 1 个集中器组成，各 LoRa 节点读取传感器数据并随机进行上报，通过 RTS/CTS/DATA/ACK 的握手通信机制与集中器进行通信，同时将通信过程、随机获取的退避值、更新的竞争窗口 CW、请求发送的次数和成功发送的次数通过串口输出到本地。LoRa 集中器将接收的各节点的电流电压数据和各节点的数据包统计量通过串口定时输出，并通过 NB-IoT 模块将各节点的电流数据传送到阿里云平台。对比 LoRa 节点上报的数据量与集中器成功接收的数据包数量可以验证通信过程中是否丢包，程序是否按照设定的协议正确执行。在系统运行 15 分钟后查看集中器和各节点的运行结果。

节点 1 的串口输出结果如图 10 所示。由图中可知，节点 1 当前得到的随机退避值为 6，竞争窗口 CW 值为 31。节点 1 总共随机发起了 186 次 RTS/CTS 握手请求，成功通信的次数为 150 次，数据包投递率为 80.6%。其中，通信失败的原因主要是由于节点间发生碰撞从而导致了集中器接收的数据包不正确或者接收超时造成的。

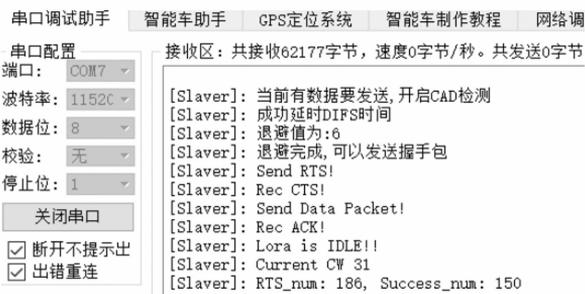


图 10 节点 1 运行结果

集中器的输出结果如图 11 所示，集中器将节点的地址、当前上报的电压电流值和各节点上报数据包的数量总和通过串口输出值 PC 端。由输出结果可知，集中器成功接收的节点 1 上报的数据包数量为 150，与节点 1 的运行结果相同，验证了程序的正确性。并且可以看到 4 个节点随机上报数据的成功次数相差不大，因此也可反映出协议具有一定的公平性。

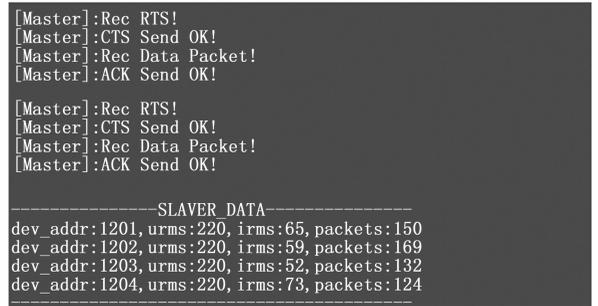


图 11 集中器运行结果

阿里云物联网平台的显示结果如图 12 所示，可以看出集中器通过 NB-IoT 模块成功将各节点的电流数据发送至云平台上。其中，由节点 1 的电流变化曲线可知，该节点在某一时刻开始上电工作，并在运行一段时间后又断电停止工作。

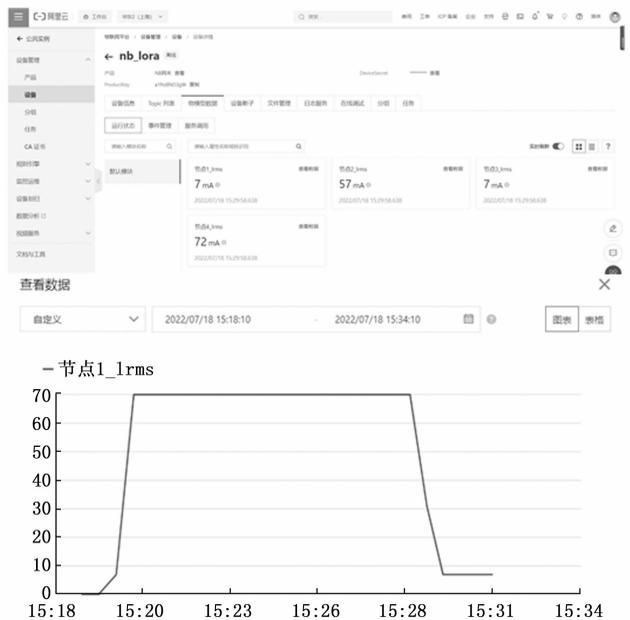


图 12 物联网平台显示结果

### 5 结束语

本研究设计了一套新型的用电设备电能采集方案，该方案采用 LoRa 无线通信自组网技术，并实现基于 CSMA/CA 竞争通信机制的星型传感器网络，经过实验测试，系统各功能均正常实现。与传统的蓝牙、ZigBee 和 NB-IoT 等物

(下转第 261 页)