

杭州电子科技大学

硕士学位论文

题 目： 基于 LoRa 无线组网技术的漏水
检测系统设计

研 究 生 薛佳帆

专 业 电子科学与技术

指导教师 陈科明 副教授

完成日期 2020 年 3 月

杭州电子科技大学硕士学位论文

**基于 LoRa 无线组网技术的漏水
检测系统设计**

研 究 生： 薛佳帆

指导教师： 陈科明 副教授

2020 年 3 月

**Dissertation Submitted to Hangzhou Dianzi University
for the Degree of Master**

Design of Water Leakage Detection System Based on LoRa Wireless Networking Technology

Candidate: Xue Jiafan

Supervisor: Chen Keming, Associate Professor

March, 2020

杭州电子科技大学

学位论文原创性声明和使用授权说明

原创性声明

本人郑重声明： 所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品或成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

论文作者签名： 日期： 年 月 日

学位论文使用授权说明

本人完全了解杭州电子科技大学关于保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属杭州电子科技大学。本人保证毕业离校后，发表论文或使用论文工作成果时署各单位仍然为杭州电子科技大学。学校有权保留送交论文的复印件，允许查阅和借阅论文；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。（保密论文在解密后遵守此规定）

论文作者签名： 日期： 年 月 日

指导教师签名： 日期： 年 月 日

摘要

家庭供水管道漏水既会带来经济损失，也会造成安全隐患。目前已有多种漏水检测方案，但由于其成本、实时性或检测精度等方面的局限性，均无法在智能家居中普及和推广，而室内无线网络通信技术的发展为研究智能家庭漏水检测系统提供了新思路。

本文提出一套基于 LoRa 无线组网技术的智能家庭漏水检测系统，由电池供电的 LoRa 漏水检测节点、可控制水阀开关的 LoRa-WiFi 集中器网关、可实时监控系统状态的 APP 以及电磁阀遥控器组成。节点用于检测漏水状态并通过 LoRa 模块向集中器网关发送报警信号，集中器网关接收此报警信号后自动关闭总水阀，并将此报警信号通过 WiFi 发送至 APP 提醒用户及时处理，电磁阀遥控器作为辅助，用于控制电磁阀的开关。本系统具有低功耗、低成本、实时性强以及通信可靠性高等优势，并且易于集成到诸如家用地暖等智能家居系统中。

为保证由电池供电的漏水检测节点能长时间工作，本文提出了一种基于自适应功率调节算法的低功耗设计方法。采用均值滤波机制，节点在采集多次信号强度（RSSI）之后，将跳变较大的 RSSI 值去除后取均值，从而提高对数据链路评估的准确度，然后再根据该 RSSI 值自适应地调整其发射功率。测试表明，改进后的算法能有效提高节点功率调节的效率并降低网络通信功耗。

为降低多个漏水检测节点同时访问信道时发生数据碰撞的概率、提高 LoRa 无线网络通信的可靠性，本文提出了一种基于非时隙 CSMA/CA 算法的无线网络防碰撞设计方法。以退避次数 NB 值作为评估当前网络状况的依据，对退避时隙进行了自适应性设计。自适应动态变化的退避时隙可以有效降低各节点选择相同退避时间窗口的概率，减少数据碰撞；通过对退避时隙的优先级加权设计，使得优先级高的节点其退避时隙更短、数据传输失败的概率更低。并基于此对 LoRa 无线网络架构以及通信协议进行了设计。测试结果表明，采用本算法设计的无线网络具有可靠的通信性能，能对管道漏水做出及时准确的反应。

关键词：漏水检测，LoRa 无线网络，自适应功率调节算法，CSMA/CA 算法，低功耗

ABSTRACT

Water leakage in the household water supply pipeline will bring economic losses and safety hazards. At present, there are a variety of water leakage detection schemes, but due to the limitations of cost, real-time nature, or detection accuracy, they cannot be popularized and promoted in smart home systems. The development of indoor wireless network communication technology provides new ideas for the study of smart home water leakage detection systems.

This paper proposes a smart home water leakage detection system based on LoRa wireless networking technology. The system consists of a battery-powered LoRa leak detection node, a LoRa-WiFi concentrator gateway that can control the water valve switch, an APP that can monitor the system status in real time, and a remote control for the solenoid valve. The node is used to detect the leakage state and send an alarm signal to the concentrator gateway through the LoRa module. After receiving the alarm signal, the concentrator gateway automatically closes the main water valve, and sends this alarm signal to the APP via WiFi to remind the user to handle it in time. The remote control of the solenoid valve is used as an auxiliary to control the opening and closing of the solenoid valve. This system has the advantages of low power consumption, low cost, strong real-time performance and high communication reliability, and it is easy to integrate into smart home systems such as home floor heating systems.

In order to ensure that the battery-powered leak detection node can work for a long time, this paper proposes a low-power design method based on an adaptive power adjustment algorithm. Adopting the average filtering mechanism, after collecting multiple signal strengths (RSSI), the node removes the RSSI value with large fluctuations and takes the average value, thereby improving the accuracy of data link evaluation, and then adaptively adjust its transmit power according to the RSSI value. Tests show that the improved algorithm can effectively improve the efficiency of node power adjustment and reduce network communication power consumption.

In order to reduce the probability of data collision when multiple leak detection nodes access the channel at the same time and improve the reliability of LoRa wireless network communication, this paper proposes a wireless network collision avoidance design method based on non-slot CSMA / CA algorithm. Taking the backoff times NB value as the basis for assessing the current network conditions, the adaptability of the backoff time slot is designed. The adaptive dynamically changing backoff time slot can effectively reduce the probability of each node choosing the same backoff time window and reduce data collisions. By designing the priority weighting of back-off time slots, nodes with higher priority have shorter back-off time slots and a lower probability of data

transmission failure. Based on the above algorithm, the LoRa wireless network architecture and communication protocol are designed. The test results show that the wireless network designed with the above algorithm has reliable communication performance and can make timely and accurate responses to water leakage from the pipeline.

Keywords: Water leakage detection, LoRa wireless network, adaptive power adjustment algorithm, CSMA/CA algorithm, low power consumption

目录

摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
目录.....	IV
第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 漏水检测相关技术现状.....	2
1.2.1 漏水检测技术国内外研究现状.....	2
1.2.2 无线网络通信相关技术现状.....	3
1.2.3 功率控制技术.....	7
1.3 本文主要研究的内容.....	9
1.3.1 节点低功耗设计.....	9
1.3.2 LoRa 无线网络防碰撞设计.....	10
1.4 本文各章节内容安排.....	11
第二章 智能家庭漏水检测系统详细设计.....	12
2.1 系统概述.....	12
2.1.1 系统整体架构.....	12
2.1.2 系统需求描述.....	12
2.2 系统硬件设计.....	13
2.2.1 系统硬件设计架构.....	13
2.2.2 节点硬件设计.....	14
2.2.3 集中器网关硬件设计.....	15
2.3 系统软件设计.....	17
2.3.1 节点软件设计.....	17
2.3.2 集中器网关软件设计.....	19
2.4 系统功能测试.....	23
2.5 实物展示.....	25
2.5.1 集中器网关实物图.....	25

2.5.2 节点与遥控器实物图.....	26
2.5.3 APP 界面展示.....	27
2.5.4 本系统在智能地暖系统中的应用.....	28
2.6 本章小结.....	29
第三章 基于自适应功率调节算法的低功耗设计.....	30
3.1 节点自适应功率调节算法的改进与实现.....	30
3.1.1 功率控制技术选择.....	30
3.1.2 基于 RSSI 的室内路径损耗模型.....	31
3.1.3 RSSI 均值滤波.....	32
3.1.4 自适应功率调节算法改进.....	34
3.1.5 算法实现.....	36
3.2 算法测试.....	38
3.2.1 测试方案及测试数据.....	38
3.2.2 测试结果分析.....	40
3.3 节点低功耗硬件设计.....	40
3.3.1 低功耗器件的选择.....	40
3.3.2 硬件低功耗设计.....	40
3.4 节点功耗测试与分析.....	41
3.4.1 测试方案及测试数据.....	41
3.4.2 测试结果分析.....	45
3.5 本章小结.....	47
第四章 基于非时隙 CSMA/CA 算法的 LoRa 无线网络设计.....	48
4.1 基于退避时隙优化的非时隙 CSMA/CA 算法改进及实现.....	48
4.1.1 非时隙 CSMA/CA 算法原理.....	48
4.1.2 传统非时隙 CSMA/CA 算法分析.....	49
4.1.3 基于退避时隙优化的非时隙 CSMA/CA 算法改进及应用.....	50
4.2 基于非时隙 CSMA/CA 算法的 LoRa 无线网络防碰撞机制设计.....	55
4.2.1 信道检测机制比较与分析.....	55
4.2.2 LoRa 无线网络防碰撞机制设计.....	56
4.3 LoRa 无线网络设计与实现.....	59
4.3.1 LoRa 无线网络拓扑结构设计.....	59
4.3.2 通信协议设计.....	60

4.4 无线网络性能测试.....	62
4.4.1 通信距离测试.....	62
4.4.2 多节点通信测试.....	64
4.5 本章小结.....	64
第五章 总结与展望.....	66
5.1 总结.....	66
5.2 展望.....	67
致 谢.....	68
参考文献.....	69
附录.....	72

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

随着无线通信技术的飞速发展，物联网（IOT）技术在人们的日常生活中发挥着日渐显著的作用，给人们的生产和生活都带来了极大的便利。物联网是将诸如射频识别（RFID）设备、红外线等各类传感器、二维码、激光扫描器等种种信息传感装置与互联网相结合而形成的通信网络^[1,2]，可以自动、实时地对物体进行监控、定位、追踪并触发相应事件^[3]，物联网技术可以将物质世界的信息数字化，把现实的事件转换成数据的形式并上传到各类终端进行处理，这极大地提高了人们生产和生活的效率，对社会经济的发展以及各行业的升级改造具有巨大的推动作用。

根据欧盟在报告《Internet of Things in 2020》中的总结，物联网的发展分为四个阶段：第一个阶段是在 2010 年之前，RFID 技术被广泛应用于零售、物流以及医药领域；第二阶段是 2010 年-2015 年，该阶段将实现物与物的全面连接；第三个阶段是 2015 年-2020 年，物联网的发展将进入半智能化；第四个阶段是在 2020 年之后，物联网将全面进入智能化，当前物联网的发展处在第三阶段即半智能化阶段，即将步入全面智能化发展阶段^[4]。

物联网技术的飞速发展也促进了智能家居的日渐普及和完善，智能家居系统是以家庭住宅为平台，通过在家居生活中融入自动控制技术、无线网络通信技术、传感器技术以及安全防范技术等，建立高效、智能化的住宅设施管理系统，从而提高人们生活的安全性、舒适度以及便利性，对实现节能环保和可持续发展也具有重要意义^[5]。

本文所设计的智能家庭漏水检测系统属于上述智能家居的范畴，考虑到在人们的日常生活中，家庭供水管道常常会发生漏水的现象，若不能及时发现，不仅会造成水资源的浪费，还会由于家具、地板等被水浸泡而造成财产损失，甚至还可能引发诸如触电、火灾等严重的安全事故。而且据资料表明，我国每年因为供水管道漏水而造成的水资源损失量高达上百亿吨^[6]，供水平均损失率约为 9.79%，随之产生的安全隐患更是无法评估和量化，因而研究一套可实时监控家庭管道漏水且能及时自动关闭总阀门的智能漏水检测系统具有重要的现实意义。

2

目前 ZigBee 通信技术广泛应用于智能家居等低功耗领域，在可靠性、部署成本、网络容量以及传输时延上具有一定的优势，但是 ZigBee 节点在室内的有效通信距离仅有 20 米，如果希望与超出通信距离的节点进行通信，则需要增加节点的数量以实现路由，而且基于 ZigBee 通信技术的 WSN 网络通常采用动态网络拓扑结构，当网络中的节点发生变化时能动态地重新组建网络，因而具有较强的自恢复能力及较高的稳定性^[15]，但是由于中继节点需要随时对信道进行侦听及数据转发，所以功耗方面仍然不太理想，ZigBee 设备靠两节 5 号电池仅可以维持六个月到两年的使用时间^[16]。另外，由于 ZigBee 在国内主要工作在 2.4G 频段，因而其通信距离短，信号穿透能力差，传输衰减较大，用于室内的 WSN 网络通信时，为保证其通信质量以及网络覆盖范围，其节点的部署密度往往比较大，而且由于 2.4GHz 频段在国际上和国内都是免费的开放频段，因而该频段在室内通信领域已十分拥挤，目前在 2.4GHz 频段上开发的主要应用除了 ZigBee 之外还有：WiFi、蓝牙、部分无绳电话以及其他一些短距离无线通讯设备，这些 2.4GHz 干扰源势必会对 ZigBee 设备的正常通信产生干扰，从而影响系统工作。

1.2.2 无线网络通信相关技术现状

1.2.2.1 无线通信技术的发展现状

当前智能家居领域常用的无线通信技术除了 ZigBee 之外还有 WiFi、蓝牙以及 IrDA（红外数据传输技术），其中 WiFi 和蓝牙技术已经非常成熟，然而其多用于数据传输速率高、通信距离短、网络节点容量少的场景；IrDA 技术不仅通信距离短，而且对传输角度有较高的要求，在实际生活中多用于家电遥控装置上；基于 2G/3G/4G 的无线通信技术，由于通信模块以及流量资费比较昂贵，开发成本较高，因而也不适用于智能家居系统。

表 1.1 LoRa 与 NB-IoT 性能比较

	LoRa	NB-IoT
频段 (MHZ)	433、868、915，非授权频段	850、900，授权频段
传输速率	250bps-11Kbps (LoRa 调制)	160Kbps-250Kbps
组网方式	自组网	基于现有蜂窝网络
网络节点容量	10 万个	20 万个
传输距离	城市 2-5Km，郊区 15Km	>10Km
设备成本	较低，LoRaWAN 协议简单，易开发	适中
通信成本	低，无需额外付费	较高，需向通信服务供应商付费
功耗	低，基于 ALOHA 异步通信协议	较高，采用同步通信协议，节点必须定期联网

发展现状	较成熟，全世界已有多国进行全面部署	标准在 2016 年公布，有待完善
应用	智能抄表、智慧农业	共享单车、智能家居

由此可见，传统的无线通信技术已无法满足人们对低功耗、远距离、大容量的需求，而低功耗广域网 LPWAN（Low Power Wide Area Net Work）的飞速发展为此带来了新的解决方案，LPWAN 克服了传统无线通信方式的障碍，可满足用户对低功耗、远距离以及大容量网络的需求，其中最具代表性的是 NB-IoT 和 LoRa，此二者的主要区别如上表 1.1 所示，从表中可以看出，NB-IoT 和 LoRa 都有通信距离远、网络容量大以及低功耗等优势，然而相较于 NB-IoT，LoRa 通信技术更加成熟，成本更低，而且功耗更小。

1.2.2.2 LoRa 通信技术介绍

LoRa 的全称是“Long Range”，是一种基于扩频技术的新兴无线通信技术，主要应用于由电池供电的无线局域网、广域网设备，其特点是低功耗、远距离、大容量以及高可靠。LoRa 网络已经在世界多地进行试点及部署，LoRa Alliance 公布的数据显示，已经有 9 个国家开始全面构建 LoRa 网络，有 56 个国家进行了试点^[17]。由于 LoRa 采用了基于线性 Chirp 的扩频调制技术，使得无线信号能以低于信道底噪的强度进行传输，而且具有非常宽的频带，因而其抗干扰能力很强、网络覆盖范围很广，同时足够宽带的调制能够补偿信号在室内传播时的衰减。而且在相同的信道条件下，部署 LoRa 调制所提供的总信道容量与 FSK 相比增加了近 50%，LoRa 技术可在智能家居等应用场景中快速部署，可以广泛地应用在数据吞吐量低的物联网系统中^[18]。LoRa 技术采用循环纠错码编码，由于在源数据中加入了冗余信息，其通信的鲁棒性大大提高^[19]。LoRa 的网络架构如下图 1.2^[20]所示。

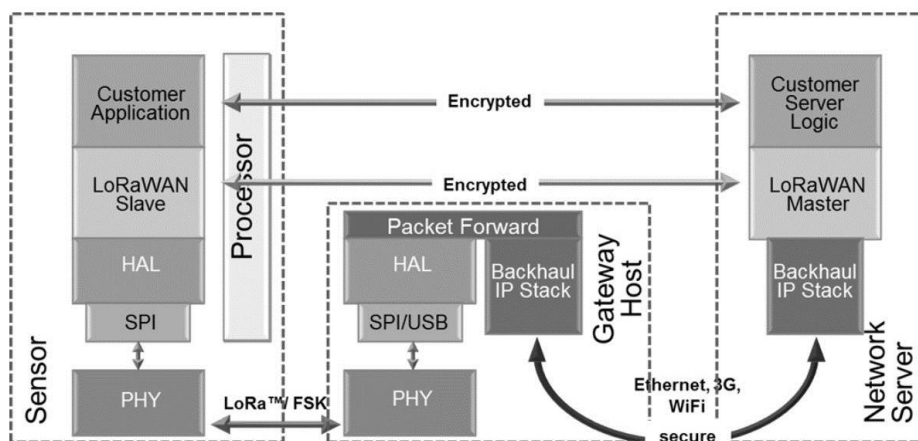


图 1.2 LoRa 网络架构

在 LoRa 通信技术的基础上，LoRaWAN 对通信协议以及系统架构进行了定义，根据应用场景的不同，LoRa 主要分为三种工作模式：ClassA、ClassB 和 ClassC。在 ClassA 模式下，终端节点发送和接收不能同时进行，只有在数据发送完毕后的接收窗口期才能接收下行数据，

即对上行链路没有限制，该模式下系统功耗最低。在 ClassB 模式下，终端节点设置了固定周期的接收窗口，然后在约定的时间进行接收，可以一次接收多个包，该模式是在 ClassA 的基础上增加了节点用于接收下行数据的时隙数，功耗次于 ClassA 模式。在 ClassC 模式下，终端节点在发送以外的其他时间都开启接收窗口用于接收下行数据，功耗最大，但通讯延时最低，常用于需要频繁接收服务器数据的应用场合^[21]。

1.2.2.3 无线网络拓扑结构

选择合适的网络拓扑结构既能拓展网络的传输距离，还能够保证信号传输的稳定性。目前最常用的无线网络拓扑结构有：star（星型）网络拓扑、mesh（网状）网络拓扑以及树状网络拓扑，如下图 1.3 所示。

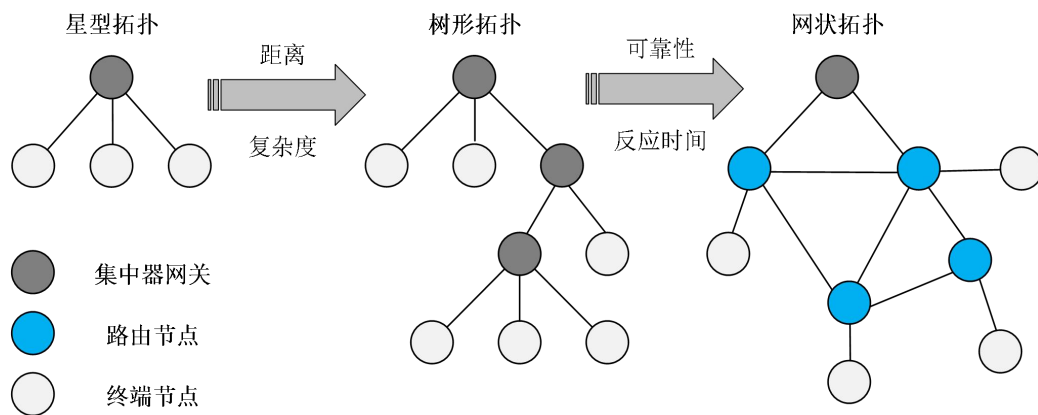


图 1.3 常用的网络拓扑结构

从上图 1.3 中可以看出，在星型网络拓扑结构中，所有终端节点都直接与集中器网关进行通信，节点与节点之间无法直接通信，该拓扑结构的优点是：结构简单、连接方便、配置灵活、易维护管理、网络延迟时间较小而且扩展性强；缺点是：节点与节点之间通信时必须通过集中器网关对数据进行转发，因而其网络共享能力较差，而且当网络中的节点较多时会给集中器网关带来较重的负荷。树状网络拓扑结构实质上是星型拓扑结构的拓展，即多个星型网络之间通过总基站进行相互通信，一般是通过在无线网络中加入集中器网关来实现网络容量的拓展，可以达到延伸网络覆盖范围的目的。mesh（网格）网络也称为“多跳”（multi-hop）网络，在 mesh 网络中，所有终端节点都可以同时作为接入点（AP）和路由器，网络中的每个节点之间都可以相互通信，mesh 网络能够自动感知各节点状态的变化，并动态地重新组建网络，其自组织能力和稳定性较强。

1.2.2.4 无线网络通信协议

在对无线传输网络进行设计时，对通信协议的选择非常重要，目前比较成熟且使用较为广泛的通信协议如下表 1.2^[22]所示，在该表格列举的通信协议中，WiFi 和 Bluetooth 是最常用的，主要频段均为 2.4GHz，适用于传输速率较高、通信距离较短的场景，其室内有效通信距

离仅有数十米，且稳定性较差，可挂载的网络节点数较少；ZigBee 技术在国内的主频段也是 2.4GHz，其室内通信距离与 WiFi 和 Bluetooth 差别不大，然而其可挂载的网络节点数量远比 WiFi 和 Bluetooth 多；Z-Wave 主要应用于国外，在国内其频段并未被国家授权，因此在系统设计时不予考虑；LoRaWAN 通信协议基于 LoRa 扩频调制，具有抗同频干扰能力强、接受灵敏度高、通信距离远以及网络容量大优势，但是因为它在 MAC 层采用的是异步 ALOHA 协议，所以信道利用率较低，研究表明^[23]，在纯 ALOHA 协议中，其信道利用率最大仅有 18.4%，而且数据在传输过程中极容易因为碰撞而导致重发，数据包的冲突重传不仅会影响网络通信的可靠性，还会产生额外的功耗。基于上述考虑，并结合该智能家庭漏水检测系统的实际应用，本文自主设计了一种基于 LoRa 调制的通信协议。

表 1.2 常用的无线协议

	LoRaWAN	ZigBee	Z-Wave	Bluetooth	WiFi
频段 (Hz)	433M/470M/ 868M/915M	2.4G/868M/ 915M	868M/ 915M	2.4G	2.4G/5G
无线标准	LoRaWAN 国际联盟标准	IEEE 802.15.4	私有协议	IEEE 802.15.1	IEEE 802.11
网络节点	5000~10000	65536	232	7	32
最大传输速率 (bps)	21.8k	250k	9.6k/40k	720k	11-54M
网络类型	星型	mesh	mesh	点对点、 星型	星型
调制方式	LoRa 扩频	GFSK	GFSK	GFSK	DSSS、 FHSS、 OFDM、
最大传输距离 (室外)	20km	500m	1km	50m	50m
最大传输距离 (室内)	300m	20m	30m	10m	15m
成本	高	低	低	低	较高
应用	抄表、定位	室内遥控	家居	文件传输	网络通信

1.2.2.5 无线网络防碰撞算法现状

目前常用的解决无线网络数据碰撞的协议如下表 1.3 所示，从表中可以看出，CSMA/CA 算法具有算法简单、性能好等特点，更能满足本系统的设计需求，其原理是^[24]：终端节点在

进行数据发送之前首先对信道进行检测侦听，只有在检测到当前的信道处于空闲状态时才发送数据，否则不发送。在 IEEE 802.15.4 标准中，CSMA/CA 算法包括两种信道访问机制：非时隙 CSMA/CA 信道访问机制和时隙 CSMA/CA 信道访问机制^[25]，在此二者中，时隙 CSMA/CA 算法对设计的要求较高，需要节点与集中器具有同步的时钟，不符合本系统的实际需求；而非时隙 CSMA/CA 算法不需要精确的时间同步，只依靠退避机制对无线信道进行竞争，设计较为简单，因而本文采用非时隙 CSMA/CA 算法对无线网络防碰撞机制进行设计。

表 1.3 网络防碰撞常用协议

防碰撞算法类型	特点
TDMA/二进制树	对系统设计要求较高，应用较少
TDMA/ALOHA	逻辑简单，然而性能较低，信道利用率仅有 18.4%
CSMA/CD	信道利用率高达 80%，然而需要设备能边侦测边发送数据，对硬件要求较高，常用于有线网络
CSMA/CA	对设备的硬件要求较低，性能高，常用于无线局域网

1.2.3 功率控制技术

1.2.3.1 功率控制原则

在该漏水检测系统的无线网络中，各节点设备与集中器网关之间的距离一般都不是相等的，无线信号在空气中传输时的损耗可以用下式（1.1）进行估算：

$$L_{os} = 32.44 + 20\lg d + 20\lg f \quad (1.1)$$

其中， L_{os} 是传输损耗，单位为 dB，它与发射机的发射功率、接收机的接收灵敏度以及数据链路状况有关； d 是距离，单位是 Km； f 是工作频率，单位是 MHz。由式（1.1）可知，在工作频率确定的情况下，无线信号的传输损耗与传输距离是成正比的，离集中器网关越远的节点设备，其无线信号在传输过程中的路径损耗越大，相应就要采用较高的发射功率，从而确保数据的可靠传输；对于距离集中器网关较近的节点，由于无线信号的传输路径损耗较小，其发射功率就不需要很高。

在基于 WSN 网络的通信系统中，为了开发方便，一般会把节点设备的参数诸如发射功率和数据传输速率等设置成相同的，这些参数通过程序下载器烧录到节点的 MCU 中，若要更改这些参数，则需通过上位机逐个进行手动修改，该方式不仅工作量大而且容易出错，无法保证调控的自由度和精确性。本文所使用的节点功率控制算法其原则是：以节点与集中器网关之间的数据链路状况为依据，节点根据采集到的 RSSI 值自行调节其发射功率，从而达到优化网络通信功耗的目的。

1.2.3.2 功率控制技术分类

目前，功率控制技术从通信的上、下行链路角度可以分为前向功率控制和反向功率控制；按照环路类型可以分为外环功率控制技术和内环功率控制技术^[26]。

前向功率控制指的是下行链路的功率控制，目的是使所有节点接收到的信号功率或SIR（信干比）基本相等，从而使集中器网关的总发射功率达到最小，该方式可避免向距离近的节点发射过大的信号功率以及误码率增大或通信质量下降等现象，还可以提高前向容量，减小其他前向信道的干扰；反向功率控制指的是上行链路的功率控制，目的是使集中器接收到的所有节点发射过来的无线信号的功率或SIR（信干比）基本相等，反向功率控制使各节点之间的相互干扰最小，能克服“远近效应”，还可以使每个节点设备的发射功率达到最合理的状态，从而节省功耗，延长节点设备的待机时间和使用寿命。

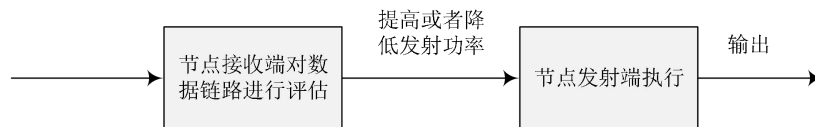


图 1.4 开环功率控制方式

开环功率控制流程如上图1.4所示，其工作原理是：节点以其接收到的信号质量为依据，对无线信道的衰减进行评估，根据集中器网关的响应情况相应地调节其自身的发射功率。在漏水检测系统中，开环功率控制技术的应用方式如下：如果漏水检测节点接收到的信号强度较大，则说明该节点与集中器网关的距离较近，或者说该信号的传输路径比较好，这时可以在保证数据正常传输的前提下适当的降低节点发射功率，从而减小节点设备的功耗；反之，距离集中器网关较远的节点则通过增大其发射功率来补偿无线信道的衰落，从而保证数据的可靠传输。

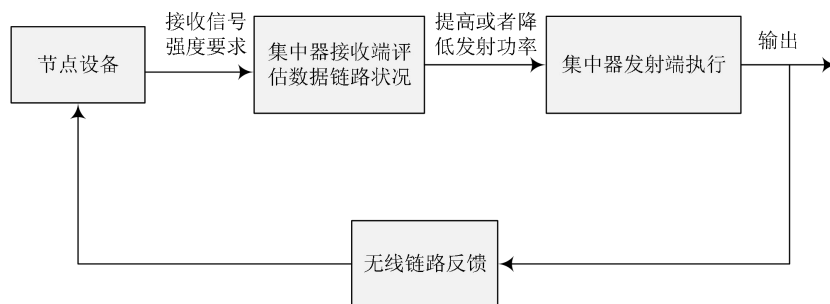


图 1.5 闭环功率控制方式

闭环功率控制流程如上图1.5所示，其工作原理是：集中器接收每个节点所发送信号的SIR（信干比）值，并与预先设定的门限值进行比较，根据比较结果确定功率调节命令，如果节点发射功率大于门限值，则向该节点发送降低发射功率的控制指令，如果节点发射功率小于门限值，则发送增大节点发射功率的控制指令。开环功率控制技术无需反馈，发射机根据自身测量得到的信息对其发射功率进行控制，开环功控技术在信道状况突然变化时能够快速做

出响应，没有数据链路时延的问题，但是该方式受上下行链路衰落一致性的影响，控制精度较低，常用于确定初始发射功率；闭环功率控制技术中发射端的功率大小根据接收端的接收效果来动态调节，其控制精度比较高，但是稳定性较差，而且过调量较大、上升时间长。

本文正是基于上述技术背景，对应用于家庭环境下的漏水检测技术进行了研究，并设计了一套基于 LoRa 组网技术的低功耗、高可靠、大容量以及低成本的家庭漏水检测系统。

1.3 本文主要研究的内容

1.3.1 节点低功耗设计

在该智能漏水检测系统中，由于当漏水检测节点安装在合适的地方（比如易漏水的管道段或者易发生安全事故的管道段）之后，更换设备电池不仅不方便，还会增加额外的经济成本，而且影响用户体验，不利于该漏水检测系统在智能家居中的推广。所以需要对节点进行低功耗设计，提高整个系统的使用寿命。降低 WSN 网络中节点功耗比较常用的方法有两个：提高发射机的发射功率和降低接收机的接收功率。然而这两种方式均会对系统的通信质量造成影响，易导致数据通信失败。

在 WSN 网络中，节点设备一般主要由四部分构成：射频收发单元、MCU 主控单元、传感器检测单元以及电源部分，其中除了电源部分以外的其他三部分均消耗电能，其在数据传输过程中的能耗也有较大差异^[27]。有研究曾对 WSN 网络中节点设备上不同模块处理任务时的功耗进行了测试，他们分别对节点在数据采集、无线传输和 MCU 处理任务时的功耗进行了测量^[28]，测试统计结果如下图 1.6 所示。

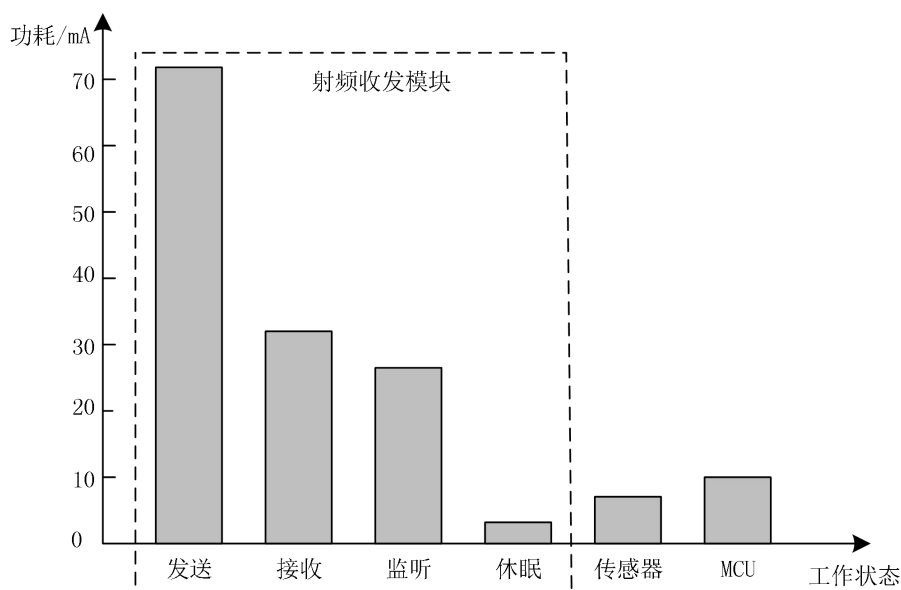


图 1.6 能耗分布图

从上图中可以看出,节点设备上能量消耗占比最大的是射频收发模块,MCU 和传感器的工作能耗所占比重非常小。在射频收发模块的能耗分布中,信号发送状态所消耗的能量最多,休眠状态消耗的能量最少。所以,对节点设备的低功耗设计主要应从两个角度出发:一是优化终端节点的数据收发及唤醒机制,二是适当地降低射频模块的数据发送功耗。

本系统的低功耗设计思路如下:在低功耗硬件设计的基础上,采用自适应功率调节算法对系统功耗进行优化,并对传统的自适应功率调节算法进行了改进,节点以RSSI值作为评估数据链路状况的依据,并对其发射功率进行自动调节,从而在保证通信质量的前提下,使得距离集中器网关较近的节点其发射功率较低,距离集中器网关较远的节点其发射功率较高,这就使得各个节点的发射功率处于最合理的状态,从而达到优化网络通信功耗的目的。另外,本文所设计的节点唤醒机制能够保证其大部分时间都处于极低功耗的休眠状态,可进一步提高系统的工作寿命。

改进后的自适应功率调节算法是在功率调节环节加入了RSSI均值滤波机制,将跳变较大的RSSI值滤除后取均值,从而得到一个能更准确反映数据链路状况的RSSI值。节点采集到准确的RSSI值不仅可以缩短系统功率调节的时间,提高功率调节的效率,还能有效减小该环节丢包率验证的次数,对延长节点工作寿命、降低系统网络功耗具有重要意义。另外,该系统中所设计的节点唤醒机制以及网络防碰撞机制等能有效降低系统功耗、延长节点工作寿命。

1.3.2 LoRa 无线网络防碰撞设计

本文基于非时隙 CSMA/CA 算法对 LoRa 无线网络的防碰撞机制进行了设计,由于在非时隙 CSMA/CA 算法中,当多个节点同时访问信道时,通常采用简单的二进制指数退避算法产生一个随机的退避时隙,使各节点延迟接入信道从而避免数据发生碰撞,该方式虽然简单,但是各节点选择相同退避时间窗口的概率较大^[29],当这些节点的退避时间同时归零后会一起接入信道,导致通信失败。为减小上述网络碰撞的概率,本文在原有的二进制指数退避算法的基础上对退避时隙进行了改进,使各节点的退避时间具有一定的自适应性,而且使得优先级高的节点具有更短的退避时间窗口,从而使得其数据传输失败的概率更低,该改进算法可以有效减小无线网络发生数据碰撞的概率,具有较高的实用意义。

另外,考虑到 LoRaWAN 协议虽然具有通信距离远、网络容量大以及抗干扰能力强等优势,然而其在 MAC 层采用的是异步 ALOHA 协议,信道利用率很低,当多个节点同时向集中器网关发送数据时,会因为数据碰撞而导致重发,这不仅会影响系统网络通信的可靠性,还会产生额外的功耗^[22]。结合该智能家居漏水检测系统对低功耗、高抗干扰能力以及易于开发等方面的实际需求,本文自主设计了一种通信协议,该自定义协议命名为 SWSN 协议,由于该协议与 LoRaWAN 协议在物理层上的设计基本相同,因而继承了 LoRa 扩频调制的诸多优势,比如网络覆盖范围广、抗干扰能力强以及网络容量大等,而在物理层及物理层以上的

协议中采用了截然不同的设计，以此来弥补 LoRaWAN 中存在的网络碰撞等缺陷，从而保证无线网络具有良好的响应实时性和容错率，使该系统的通信可靠性更高。

1.4 本文各章节内容安排

本文对该智能家庭漏水检测系统的设计与实现进行了详细的介绍，对各关键技术的选择及相应设计进行了充分的阐述，尤其对漏水检测节点的低功耗设计以及无线网络的防碰撞设计作了较全面的分析，本文各章节的安排如下：

第一章 绪论，本章主要介绍了智能家庭漏水检测系统的研究背景和意义，对漏水检测技术的发展现状进行了介绍，分析了各技术在应用于家庭漏水检测时的不足，并介绍了无线网络通信技术、功率控制技术以及网络防碰撞技术等现状，然后由此提出基于 LoRa 无线组网技术的智能家庭漏水检测系统，最后对本文主要研究的内容进行了概述。

第二章 系统概述，本章首先对该系统的总体设计架构、设计需求以及正常工作流程进行了介绍，然后对系统各部分的硬件设计、软件设计依次进行了详细阐述，对系统功能进行了测试，并对 APP 界面、硬件实物图以及该系统在智能地暖系统中的应用进行了展示。

第三章 本章首先结合本系统的实际应用情况对功率控制技术、室内路径损耗模型以及 RSSI 高斯滤波等相关技术依次进行了介绍和分析，并据此提出了本文所使用的基于 RSSI 均值滤波的自适应功率调节算法，然后对该算法在本系统中的具体实现过程作了详细的描述，并对改进后的算法进行了测试和分析。最后结合低功耗硬件设计，对漏水检测节点的低功耗设计做了更加全面的阐述，并对节点功耗进行了测试及分析。

第四章 基于非时隙 CSMA/CA 算法的 LoRa 无线网络设计，本章首先对非时隙 CSMA/CA 算法的原理进行了介绍，分析了其不足之处，然后结合本系统的实际需求对原非时隙 CSMA/CA 算法进行了优化，并在此基础上对系统的防碰撞机制、LoRa 无线网络架构以及通信协议进行了分析与设计。最后对无线网络的通信距离及通信性能进行了测试。

第五章 总结与展望，对本文在该智能家庭漏水检测系统所做的工作进行了总结，并结合现有技术的发展现状，为该系统今后的发展提供了一些改进措施。

第二章 智能家庭漏水检测系统详细设计

2.1 系统概述

2.1.1 系统整体架构

该智能漏水检测系统的系统架构如下图 2.1 所示，系统主要由漏水检测节点、集中器网关、电磁阀遥控器以及 APP 构成。

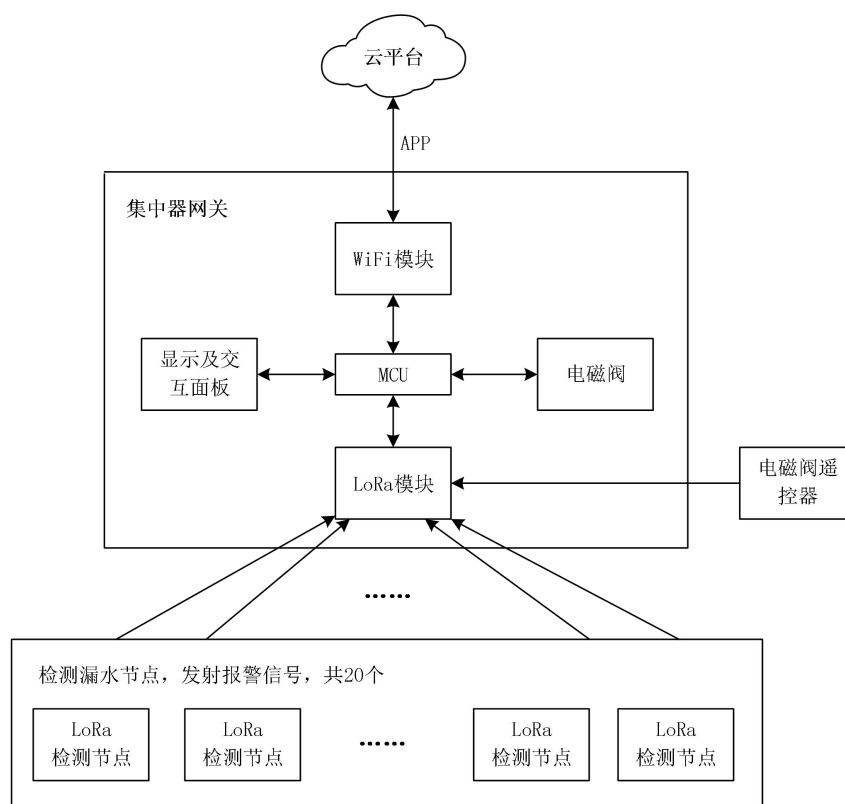


图 2.1 系统架构

2.1.2 系统需求描述

主要设计需求：

1. 节点与集中器之间的通信距离须充分满足一般家庭的漏水检测需求，设计要求为：视距通信距离大于 30m，非视距通信（即信号穿墙能力）时无线信号应能穿过两堵墙；
2. 节点设备的正常工作时间应在 2 年以上，避免频繁更换电池；
3. 无线通信网络应具有防碰撞机制，当系统中的 20 个节点同时发送报警信号时不发生

数据包丢失的情况；

4. 实现漏水报警、低温报警、自动关闭水阀、APP 同步报警及远程监控等基本功能。

在安装调试阶段对漏水节点的功率进行调节之后，该系统进入正常工作状态，如下所述：漏水检测节点用于检测漏水状态并发射报警信号，通过其上的 LoRa 传输模块与集中器网关通信。节点安装在家庭中各管道容易漏水的地方或者对漏水情况比较敏感的位置，比如盥洗池下、输水管道的接缝处、电源插座处等位置。当节点检测到漏水时会被唤醒，并同时检测其电池电量，若电池电量低，则同时发送漏水报警信号以及电池电量过低的报警信号至集中器网关；若电池电量正常，则只发送漏水报警信号至集中器网关。报警信号发送完之后，若该节点处仍然处于漏水状态，则休眠 6s 之后继续向集中器网关发送上述报警信号，直到该节点处的漏水状况被用户发现并处理，漏水情况处理完后节点继续进入低功耗模式。

集中器网关用于接收节点发送的信号并发出报警信号，在接收到节点发送的漏水信号时，其显示面板上的 WATER DETECTED 指示灯亮为红灯(平常状态为绿灯)，用户可通过面板上的红色数字 LED 灯获知是哪个位置的节点所发出的报警。另外，集中器网关通过 WiFi 模块与手机 APP 进行通信。当接收到节点的信号时，集中器网关的蜂鸣器会持续鸣叫并立即通过控制电机的转动来关闭总水阀，同时用户在 APP 上会收到报警提醒。如果节点的电池电量过低则会向集中器网关发送低电量报警信号，集中器网关收到该信号后会发出低电量报警，及时提醒用户更换节点设备的电池。如果环境温度低于 5 摄氏度，集中器网关会发出低温报警信号，其显示面板上对应的指示灯会被点亮，并通过 WiFi 将这些报警信号发送到用户的手机 APP 上；用户可以通过集中器网关上的显示面板来查看整个水阀装置的状态，比如：节点和集中器网关的电池电量状态、环境温度状态、漏水检测状态、每个节点的工作状态、电磁阀开关状态、WiFi 连接状态、供电电源状态和集中器网关的异常工作状态等。

手机 APP 用于同步集中器网关的所有工作状态，可以将集中器面板上所有的指示信息实时地同步给用户，用户还能在 APP 上查看所有节点检测到漏水的历史记录。电磁阀遥控器作为辅助，用来控制水阀的开关。

2.2 系统硬件设计

2.2.1 系统硬件设计架构

该智能漏水检测系统的硬件框架如下图 2.2 所示，系统硬件主要包含：1 个集中器网关，20 个漏水检测节点和一个电磁阀遥控器。

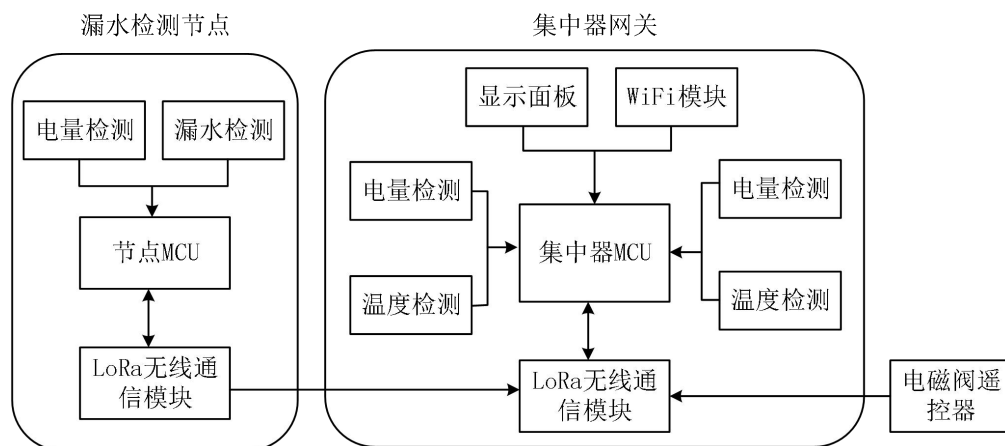


图 2.2 硬件整体架构

2.2.2 节点硬件设计

漏水检测节点的硬件功能框图如下图 2.3 所示：

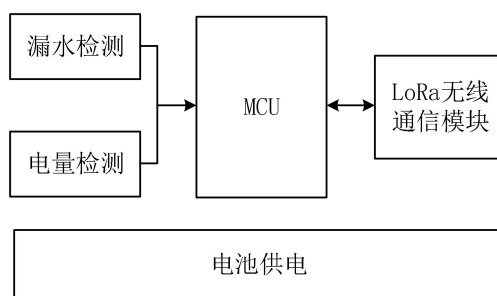


图 2.3 节点硬件功能框图

节点硬件主要包括以下部分：

1. 供电模块及电池电量采集单元。主要由电池供电电路和稳压电路构成；电池供电电路由两节 3V 干电池供电和一个用于电池防反的 NMOS 构成；电池电量采集模块的设计原理如下所述：为保证 SX1278 芯片电压及器件特性的稳定性,该 LoRa 芯片在整个工作温度及操作电压范围内采用内部电压调控机制，从而保证其能在 1.8V-3.7V 电压范围内保持稳定的 +17dBm 输出功率以及在 2.4V-3.7V 电压范围内保持稳定的 +20dBm 输出功率，而所使用的单片机 STM8L051F3P6TR 其工作电压范围是 1.8V-3.6V，由于在对节点进行功率调节阶段需要将其发射功率设置为最大值+20dBm，综合考虑之下，将低电量报警的阈值电压设置为 2.4V。

电源模块及电池电量采集模块的电路设计如下图 2.4 所示：

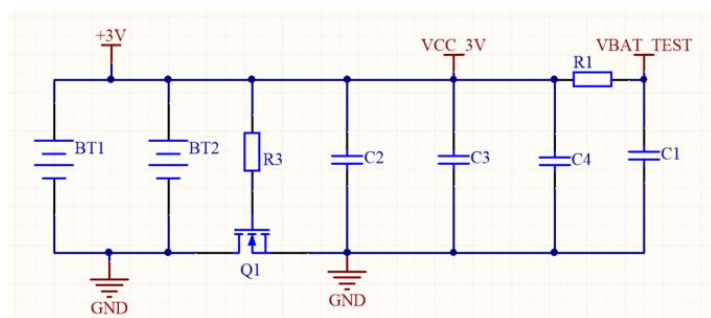


图 2.4 节点电源及电池电量采集电路

2.漏水检测模块（短路检测），主要由两个金属导片和灵敏度调节电阻组成，金属导片在没有检测到漏水状态时处于断路状态，当漏水情况发生时两个导片短路，对应的单片机 I/O 口接地后被触发，通过调节上拉电阻的阻值来控制节点感应短路状态的灵敏度。

3.LoRa 射频模块，主要由 SX1278 芯片和预留匹配电路构成，在正常工作状态下向集中器网关发送漏水报警信号和电池低电量报警信号，其电路设计如下图 2.5 所示：

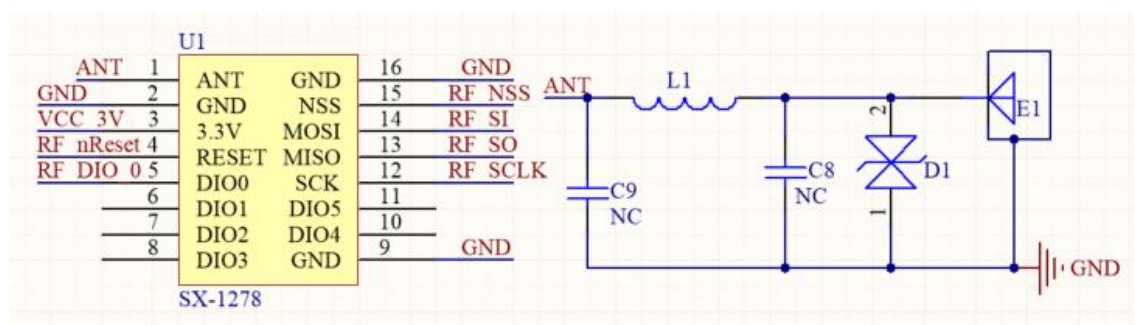


图 2.5 LoRa 射频模块

4.MCU 主控模块，由单片机及外围电路组成，用于响应漏水短路信号并向射频模块发送数据。

2.2.3 集中器网关硬件设计

该系统中集中器网关的硬件功能流程图如下图 2.6 所示:

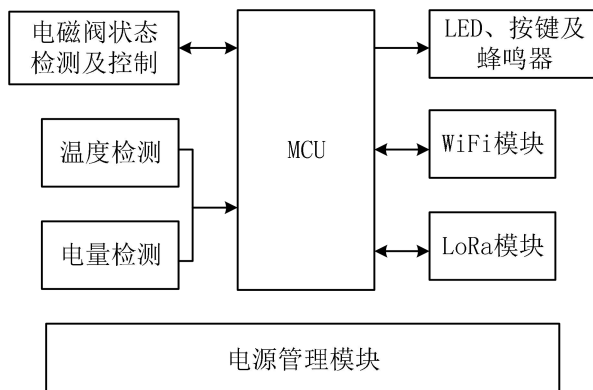


图 2.6 集中器网关硬件功能框图

集中器网关的硬件主要包括：

1.电源模块，主要由滤波电路、供电选择电路、稳压电路以及电池电量检测电路组成。

滤波电路将来自电源适配器的 12V 电压进行滤波，为电路提供稳定的直流电源，供电选择电路利用二极管的反向截止特性实现电源的自动切换，当电源适配器停止供电时，备用的 9V 干电池开始供电，电路设计如图 2.7 所示；由 DC/DC 芯片 SY8121B 输出 3.3V 电压。如果用单片机对 9V 的电池电压直接进行采样，会烧毁单片机，产生严重后果，所以采用两个大阻值电阻串联，接成分压电路，单片机通过采集相应分压电阻两端的电压进行高低电量判断，该电压值最高幅值为 3.3V。

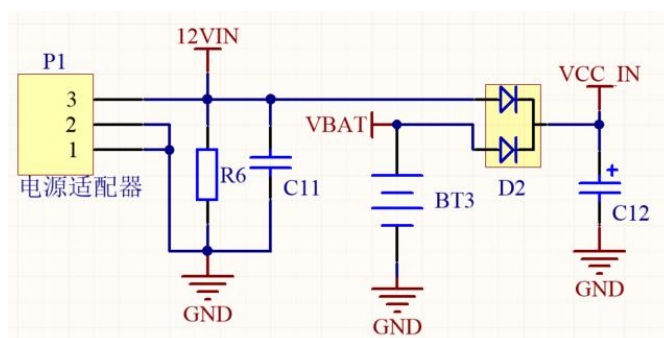


图 2.7 集中器网关双电源供电设计

2. LoRa 射频模块，电路方案选用的是与漏水检测节点相同的 SX1278 射频收发芯片，主要用于接收节点发射器的漏水报警信号和低电量报警信号，它与节点在室内的可靠通信距离可达 80m。

3.低温报警模块，主要由温度传感器组成，当环境温度低于 5 摄氏度时会向单片机发送低温报警信号。

4.电磁阀驱动模块，该模块主要由驱动芯片、一个双向二极管、一个旁路电容和反馈电路组成，该模块用于控制电磁阀的开和关；上述的驱动芯片是电压驱动芯片，为电机提供足够的驱动电压；双向二极管和旁路电容均起到保护的作用，前者用于感性负载的续流，后者用于稳定输出端电压；反馈信号 OLS 和 CLS 直接与 MCU 相连，用于检测阀门的开关状态，并在主板显示面板上显示出来。

5.蜂鸣器模块，用于接收单片机的控制信号并发出持续报警声。

6.I/O 扩展模块，用于 I/O 口的扩展，单片机发出的信号通过两路 I²C 扩展来驱动薄膜显示板上的多个 LED 灯。

7.薄膜显示模块，用于显示节点和集中器网关的各项参数的工作状态。

8.WiFi 模块，所使用的是 ESP8266-07S 模块，该模块与手机 APP 进行通信，通过串口与 MCU 连接实现 WiFi 功能，其电路图设计如下图 2.8 所示：

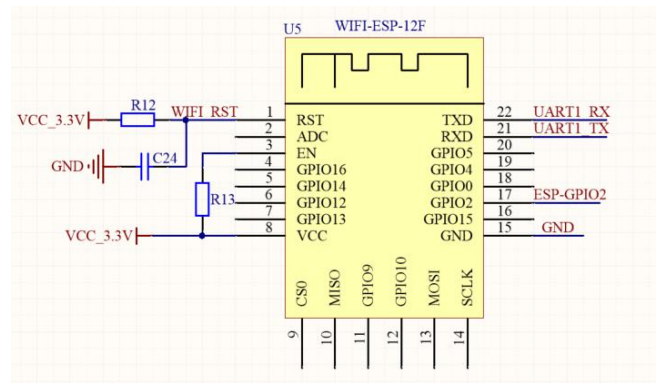


图 2.8 WiFi 通信模块

9.MCU 主控模块单元，由单片机及外围电路组成，用于接收并处理节点的报警信号以及与手机 APP 的通信。

2.3 系统软件设计

2.3.1 节点软件设计

在安装调试阶段对漏水检测节点进行完功率调节之后，该漏水检测系统进入正常工作模式，节点软件的总体设计描述如下：

1.在无任何报警的情况下，即节点在没有检测到漏水以及电池低电量的情况下，进入深度睡眠模式。

2.当某节点检测到漏水时，会被唤醒并同时检测其电池电量，若电池电量低，则同时发送漏水报警信号以及电池电量过低的报警信号至集中器网关；若电池电量正常，则只发送漏水报警信号至集中器网关。在节点发送完报警信号并自动关闭总水阀之后，若该节点处的漏水情况仍未被解决，则休眠 6s 之后继续向集中器网关发送上述报警信号，直到该节点处的漏水状况被用户发现并处理，之后节点继续进入深度睡眠模式。

3.当节点没有检测到漏水时，每隔 12 个小时会被唤醒一次，进行电池电量检测，若电池电量低，则发送电池电量过低的报警信号至集中器网关；若电池电量正常，则节点继续进入深度睡眠模式。

2.3.1.1 节点唤醒与报警信号发送机制

在漏水检测节点中，单片机在进行 BSP 初始化之后，会打开外部中断用于检测是否漏水，同时开启 RTC 时钟用于 12 个小时的定时唤醒。另外，由于漏水检测节点的安装位置复杂多变，比如安装在盥洗池下、输水管道的接缝处、电源插座处等位置，在进行电池更换的时候非常不方便。如果对节点电池进行定期统一更换，不仅会产生额外的经济成本，还会给用户带来极大的不便。另外，尽管漏水检测节点基于低功耗设计，理论上可以在不更换电池的情

况下正常运行十年，然而在实际使用中，可能会由于电池漏电或者用户所选用的电池质量差等问题，使节点的工作寿命大打折扣。

基于上述考虑，本系统在设计节点时加入了双通道自动检测电池电量的功能，节点定时唤醒并检测自身的电池电量，在检测到电池低电量后会及时发送报警信号，提醒用户更换电池。上述电池电量检测有两种机制：一是通过单片机对电池电压进行 ADC 采样，如果采样值低于所设置的阈值 2.4V，则发送低电量报警信号；二是通过 LoRa 芯片自带的电池电量检测器进行电池电量判断，SX1278 的低电池检测器在电源电压低于设置阈值 2.4V 时生成中断信号，该阈值通过寄存器 RegLowBat 进行调整，并通过编辑 RegDioMapping 将中断信号映射到 DIO 引脚上，然后发送给 MCU 进行处理。上述两种机制在节点进行电量检测时一起使用，从而保证电池电量检测的准确性。电池电量检测机制对提高节点电池的利用率、延长节点的工作寿命、提高漏水检测系统的可靠性都具有重要意义。

节点唤醒与报警信号发送流程的框图如下图 2.9 所示：

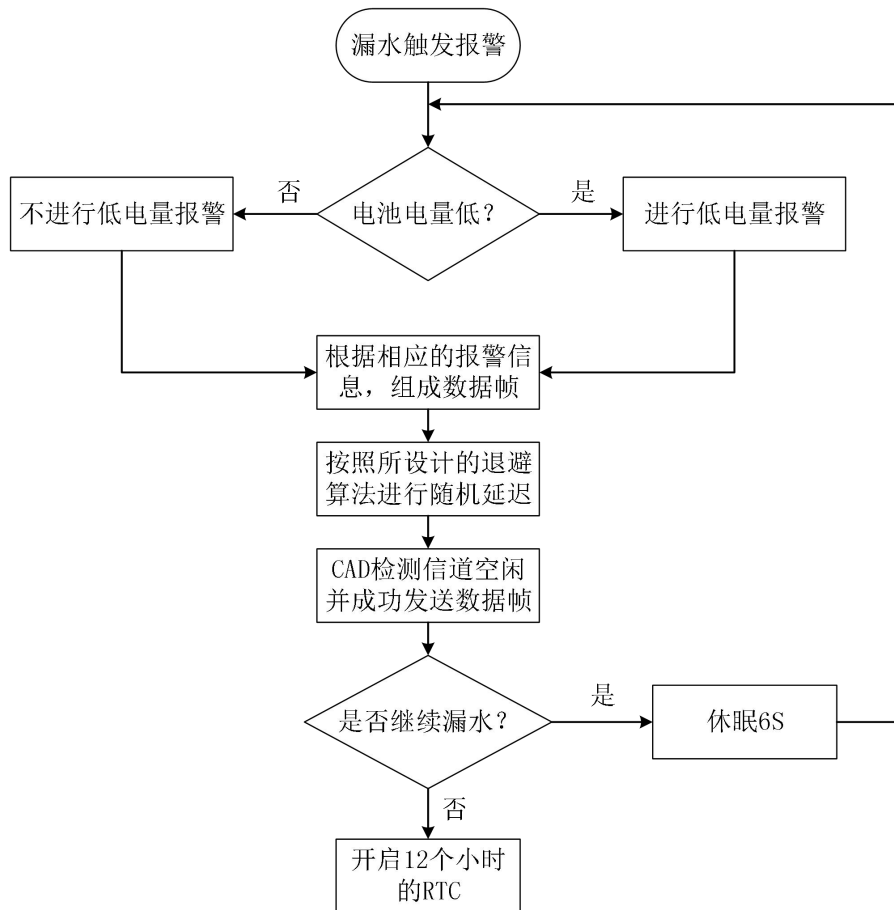


图 2.9 节点唤醒与报警信号发送机制

2.3.1.2 解码流程

节点的解码流程如下图 2.10 所示：

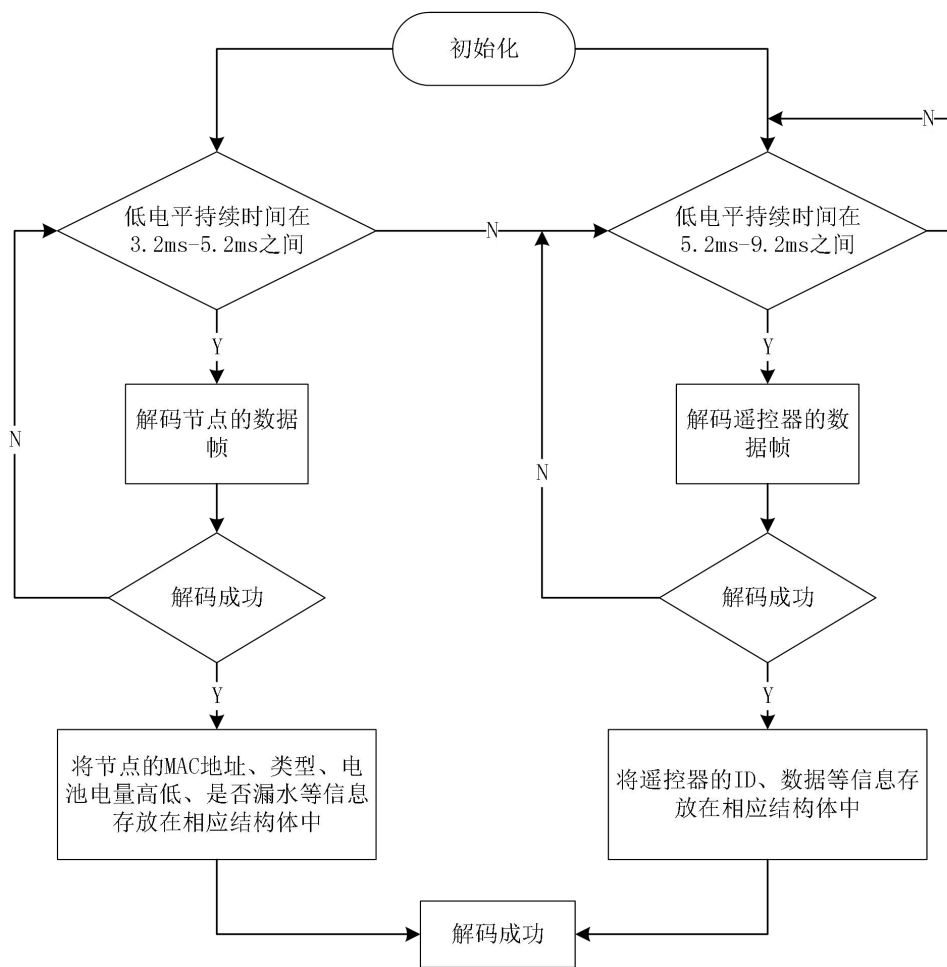


图 2.10 解码流程图

2.3.2 集中器网关软件设计

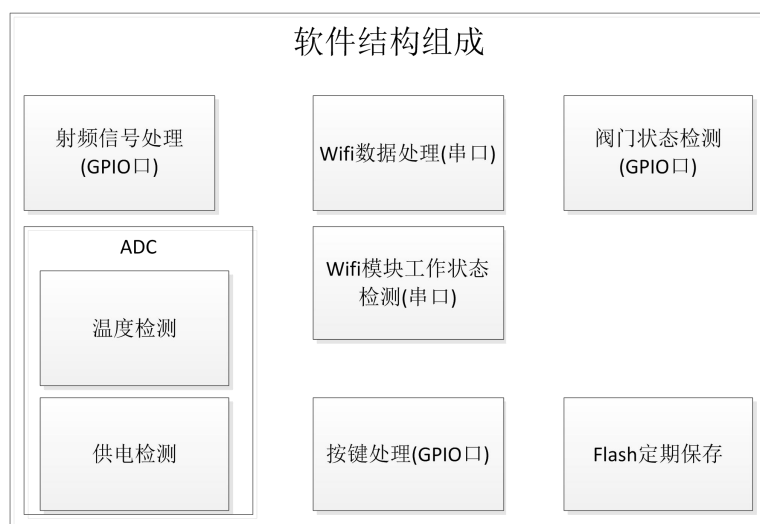


图 2.11 集中器网关软件结构组成图

集中器网关软件的主要组成部分有：射频信号处理，WiFi 数据处理，WiFi 模块工作状态

检测，电磁阀状态检测，ADC，按键处理以及 Flash 定期保存等。软件结构如上图 2.11 所示。下面将对集中器网关软件中一些主要部分的设计依次进行介绍。

2.3.2.1 射频信号处理

该部分对射频模块接收到的数据进行处理和解析，当集中器接收到射频信号时，首先对数据的有效性进行验证，如果数据有效则判断该信号是由节点或者遥控器所发送，若信号由节点发送，则当集中器网关处于配对模式时对该节点的信息进行保存，否则集中器根据接收到的数据进行报警；若信号由遥控器发送，则当集中器网关处于配对模式时对该遥控器的 ID 信息进行保存，若集中器处于非配对模式，且此时并未处于报警状态，则根据数据帧对阀门的开关进行控制。射频信号处理的软件设计流程图如下图 2.12 所示：

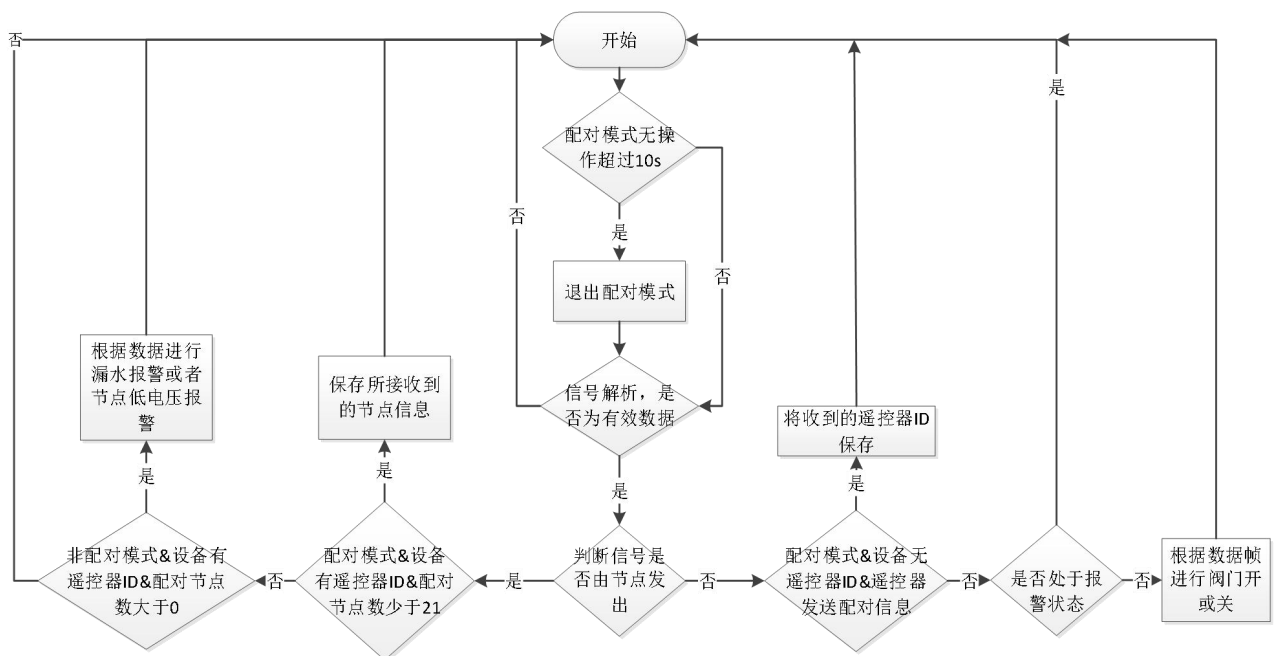


图 2.12 射频信号处理

2.3.2.2 WiFi数据处理

该部分代码主要是对 WiFi 模块接收到的数据进行处理，而 WiFi 模块的数据发送在代码中是采用串口发送的方式，将数据发给 WiFi 模块，该部分的软件设计流程图如下图 2.13 所示：

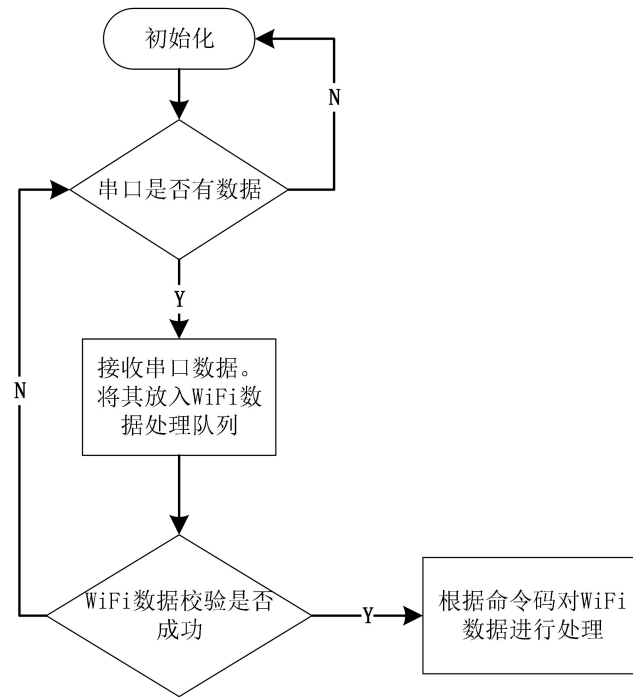


图 2.13 WiFi 数据处理流程

2.3.2.3 WiFi模块工作状态检测

该部分代码根据 WiFi 模块的工作状态进行 LED 灯的提示，软件设计流程图如下图 2.14 所示：

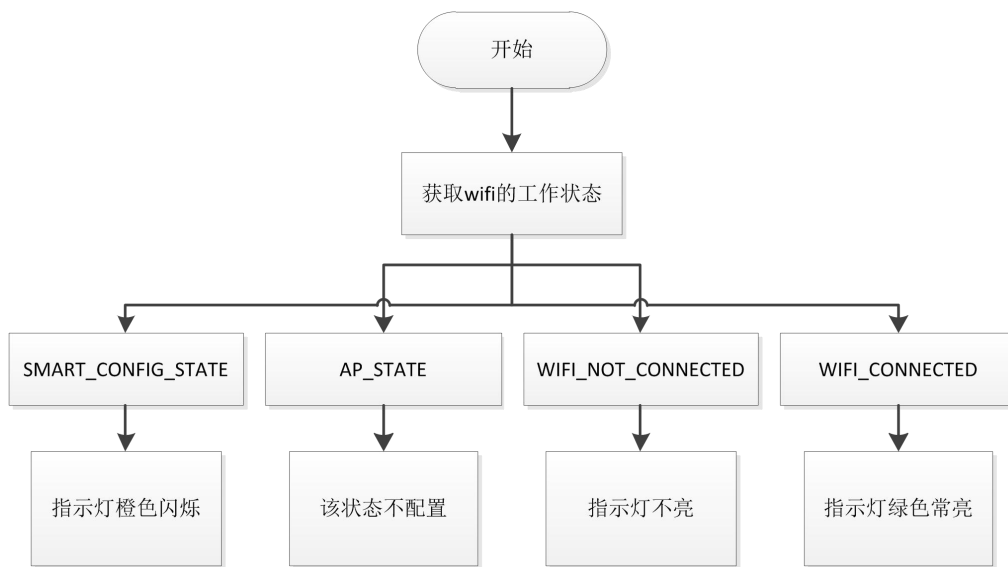


图 2.14 获取 WiFi 模块工作状态

2.3.2.4 电磁阀状态检测

该部分的代码用于检测电磁阀的开关状态，程序首先对当前阀门状态是否与之前相同进

行判断，若不相同则读取此时的阀门开关反馈状态，在控制时间未超时的条件下，若阀门反馈状态与预期设置的状态相同，则表明阀门工作正常，详细设计流程图如下图 2.15 所示：

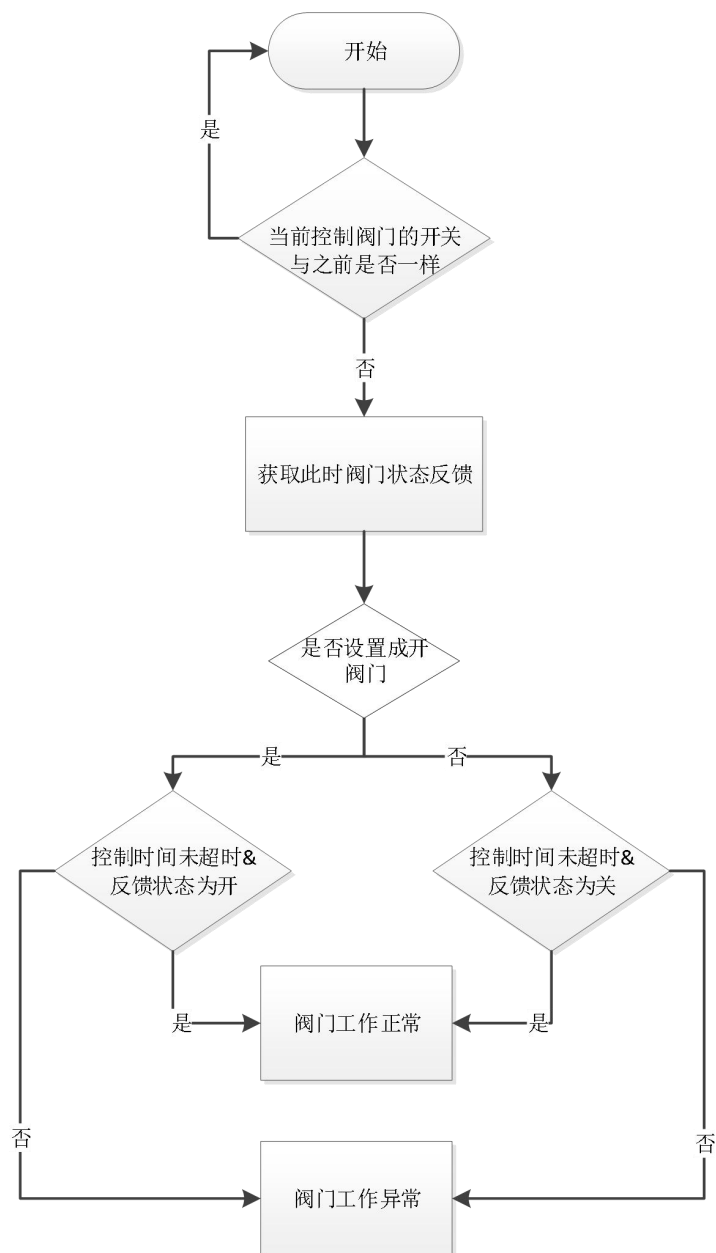


图 2.15 阀门工作状态检测

2.3.2.5 ADC检测

ADC 的检测有两部分：一部分是检测集中器网关的电池电压，从而判断当前是外部适配器供电还是电池供电，同时能检测电池供电时是否处于低电压；另一部分是获取温度检测芯片的反馈值，当环境温度小于 5℃时进行低温报警，温度检测芯片是通过反馈电压来表示检测到的温度，公式如下式(2.1)所示：

$$V_{out} = T_c + T_a + V_{0^\circ\text{C}} \quad (2.1)$$

上式 (2.1) 中, V_{out} 是温度检测芯片给出的电压值; T_c 为固定值 $19.5\text{mV}/^\circ\text{C}$; T_a 表示当前环境下的温度; V_{0c} 表征的是在 0°C 下的温度补偿值, 这里为 0.4V 。

2.3.2.6 Flash定期保存

间隔 10 秒, 会进行当前数据与存入 flash 中的数据进行对比, 如果不同, 就把当前数据存入 flash。

2.4 系统功能测试

下表 2.1 为系统功能测试结果。

表 2.1 系统功能测试

测试用例	测试前置条件/备注	测试执行步骤	预期执行结果	测试结果
集中器主控板清码	主控板上面的数字 LED 灯不闪烁	1.主控板上电; 2.此时数字 LED 灯不闪烁, 表示内部有码存在; 3.长按 RESET 和主控板侧边开关	数字 LED 灯一起闪烁, 表示清码完成	与预期相同
集中器主控板配置遥控器	主控板上面的数字 LED 灯闪烁	1.主控板上电; 2.按一下主控板侧边开关, 主控没有码时, 数字 LED 灯前三个进行闪烁, 表示主控板进入配对模式; 3.同时按下遥控器上面的两个按键	配对成功, 数字 LED 灯变成绿灯并闪烁	与预期相同
集中器主控板配置节点	主控板已经配置了遥控器	1.主控板上电; 2.按一下主控板侧边开关, 此时薄膜开关上数字灯呈现绿灯闪烁; 3.用湿的手触发下某一个节点的两块金属	薄膜开关上对应的 LED 指示灯变成绿灯常亮, 说明此水位感应器学习成功, 同时绿灯会跳到后面一个进行闪烁, 配对结束后, 等待 10 秒, 主控板退出配对模式	与预期相同
节点报警	该节点已经配置到集中器主控板中	1.主控板上电; 2.用湿的手触发下节点的两块金属	主控板蜂鸣器响起, WATER DETECTED 指示灯亮为红灯 (平常状态为绿灯), 数字 LED 灯通过红灯指示是哪个节点报警, 阀门关闭	与预期相同
取消报警	集中器主控板已经进行报警	1.此时无法通过手机 APP 和遥控器进行阀门控制; 2.短按 CANCEL 键, 取消报警	蜂鸣器不响, WATER DETECTED 指示灯亮为绿灯, 报警的数字 LED 灯变为绿灯, 此时可以用 APP 和遥控器控制阀门	与预期相同

续表 2.1

测试用例	测试前置条件/备注	测试执行步骤	预期执行结果	测试结果
复位水阀	阀门处于关闭状态	1.主控板上电; 2.短按 RESET 按键	水阀会重新打开	与预期相同
重置 wifi	wifi 网络发生变化	1.阀门上电; 2.CANCEL+接收器侧边的轻触开关: 同时按住这两个键 3 秒以上可以重置 wifi	wifi 指示灯变为橙色闪烁	与预期相同
wifi 配网	将集中器接入 wifi 网络	1.阀门上电; 2.wifi 指示灯为橙色闪烁; 3.打开 APP, 选择相应设备, 进行配网	配网成功后, wifi 指示灯变为绿色, 同时可通过 APP 进行控制	与预期相同
AC POWER OUTAGE 指示灯	集中器电源指示灯	使用适配器进行供电 使用电池进行供电	亮绿灯 亮红灯	与预期相同
BATTERY LOW MAIN UNIT 指示灯	集中器低电压指示灯	非电池供电 电池供电, 电池电量充足 电池供电, 电池电量不足	不亮 亮绿灯 橙色灯闪烁	与预期相同
节点电池低电压	节点的电池电量不足	使用低电量电池给节点供电	BATTERY LOW SENSOR 指示灯变为橙色(绿色表示无低电压报警), 数字 LED 灯通过红灯指示是哪个节点发出的报警信号	与预期相同
STATUS OK 指示灯	阀门工作状态	阀门工作正常 阀门工作不正常	亮为绿灯 亮为红灯	与预期相同
BATT/TEMP 指示灯	低温报警指示灯	外界温度低于 5 摄氏度 外界温度高于 5 摄氏度	亮为红灯 亮为绿灯	与预期相同
TBD 指示灯	电磁阀状态	阀门开启 阀门关闭	亮为绿灯 亮为红灯	与预期相同

由上表 2.1 可知, 该系统的基本功能测试结果均与预期执行结果相同, 系统各项功能需求均可实现。

2.5 实物展示

2.5.1 集中器网关实物图

集中器网关的实物图如下图 2.16 所示：

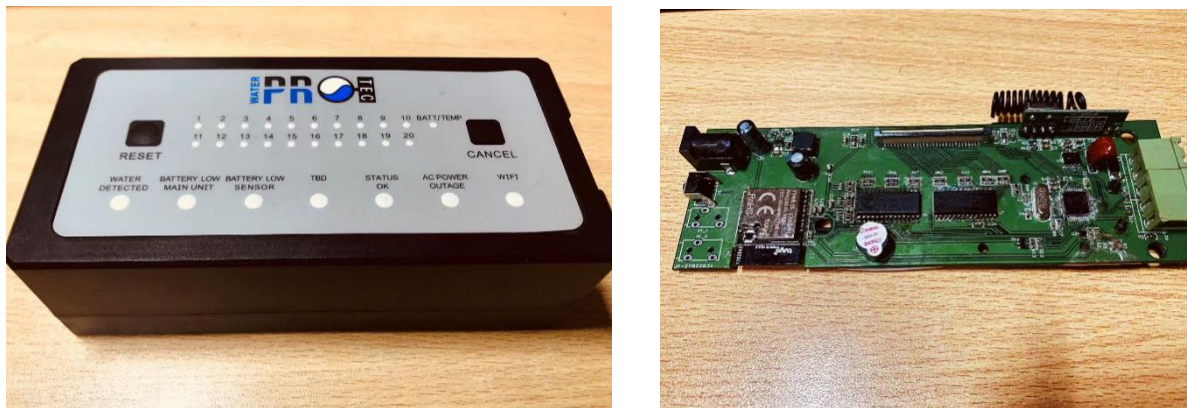


图 2.16 集中器网关实物图

集中器网关正常工作状态下的实物图如下图 2.17 所示，测试中与集中器配对的漏水检测节点有两个，对应的 LED 灯呈绿色，表明两节点均处于未检测到漏水的状态。



图 2.17 集中器网关未报警

下图 2.18 是漏水检测节点 2 号处检测到漏水时集中器网关的显示面板实物图，此时 2 号节点对应的 LED 灯由绿色变成红色，WATER DETECTED 指示灯呈红色表明有节点发送了漏水报警信号，TBD 指示灯呈现红色表明电磁阀处于关闭状态。



图 2.18 集中器网关发出警报

2.5.2 节点与遥控器实物图

漏水检测节点的实物图如下图 2.19 所示：



图 2.19 漏水检测节点实物图

电磁阀遥控器的实物图如下图 2.20 所示：



图 2.20 电磁阀遥控器实物图

该智能家居漏水检测系统的硬件实物图套装如下图 2.21 所示：



图 2.21 智能家庭漏水检测系统硬件实物图

2.5.3 APP 界面展示

手机 APP 的界面截图如下图 2.22 所示：

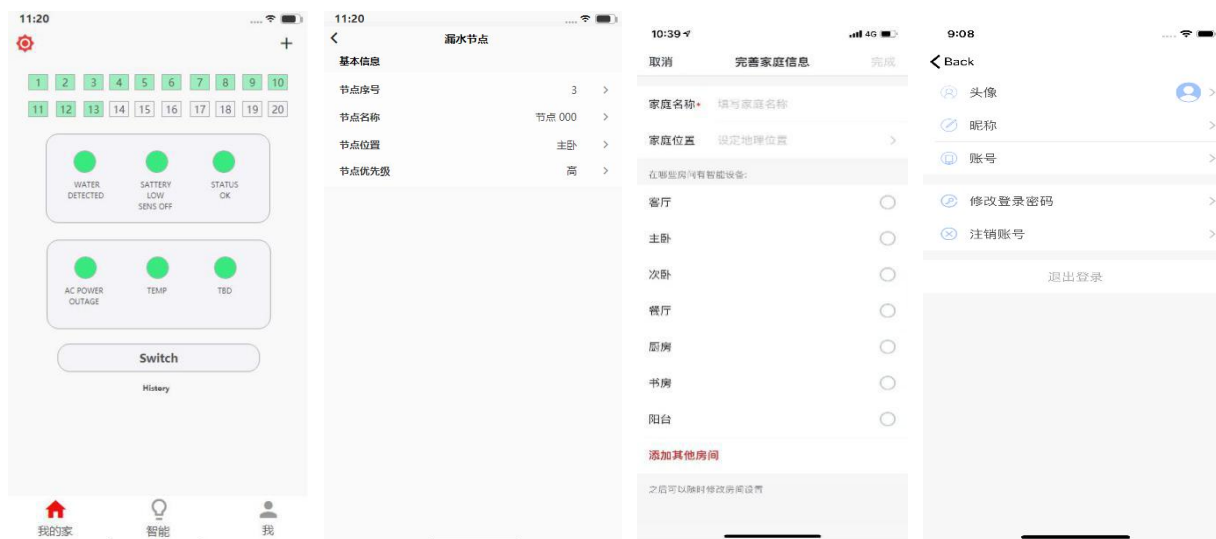


图 2.22 APP 界面展示

在上图 2.22 中，从左到右依次是：APP 主界面，节点信息界面，节点位置编辑界面以及个人中心。

2.5.4 本系统在智能地暖系统中的应用



图 2.23 智能地暖系统中的集中器网关实物图

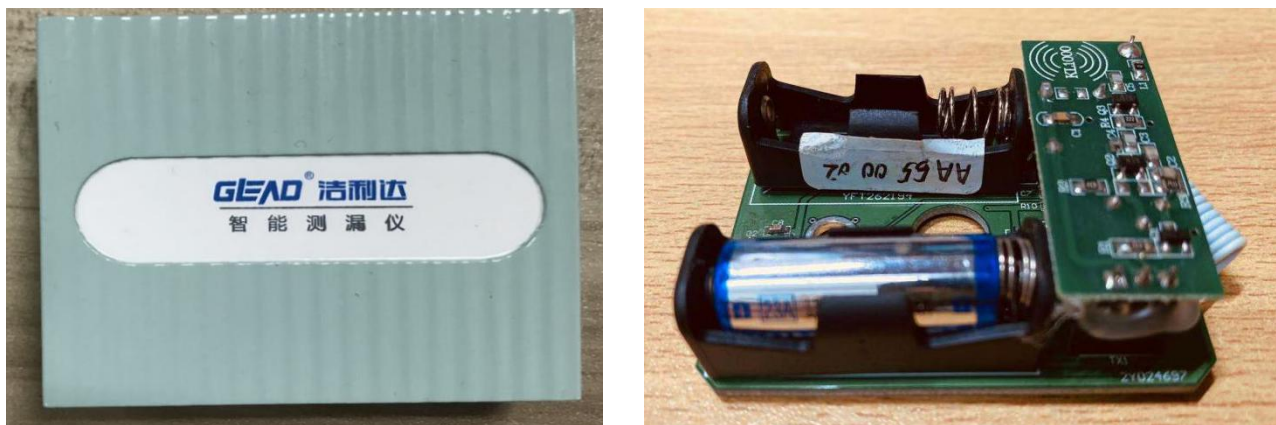


图 2.24 智能地暖系统中的漏水检测节点

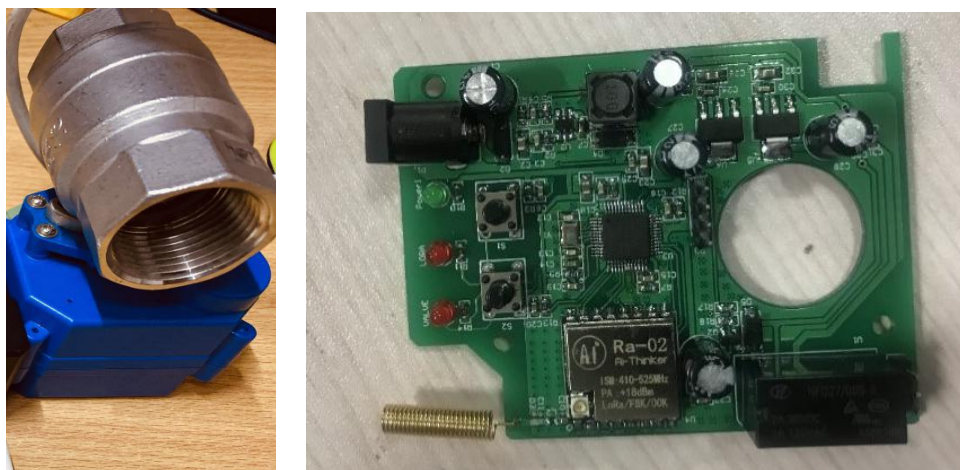


图 2.25 智能地暖系统中的无线电磁阀



图 2.26 智能地暖 APP 主界面

2.6 本章小结

本章首先对该智能家庭漏水检测系统的总体架构、设计需求以及工作流程进行了介绍，系统主要由漏水检测节点、集中器网关、电磁阀遥控器以及 APP 构成，然后对系统各部分的硬件设计、软件设计依次进行了详细阐述，并对系统功能进行了测试，测试结果表明该系统的基本功能均可实现，最后对 APP 界面以及硬件实物图做了展示，并对该系统在其它智能家居比如智能地暖系统中的应用进行了展示。

第三章 基于自适应功率调节算法的低功耗设计

在基于WSN网络的通信系统中，为了开发方便，一般会把节点设备的参数诸如发射功率和数据传输速率等设置成相同的，而且为了保证所有节点能够正常通信，一般会将发射功率设置为最大值。这些参数通过程序下载器烧录到节点的MCU中，若要更改这些参数，则需通过上位机逐个进行手动修改，该方式不仅工作量大而且容易出错，无法保证调控的自由度和精确性。本文所使用的节点功率控制算法其原则是：以节点与集中器网关之间的数据链路状况为依据，节点根据采集到的RSSI值自行调节其发射功率，从而达到优化网络通信功耗的目的。而在传统的自适应功率调节算法中，对节点的功率调节是以一次RSSI值的采集为依据^[27]，该方式适用于数据链路状况较稳定的场景中，当应用在数据链路状况复杂多变的室内环境时，无线信号会由于人员走动、阻挡物迁移等原因而发生诸如多径、绕射以及反射等影响数据链路状况的情况^[43]，使得接收机采集到的RSSI值产生较大的波动，因此若采用传统算法则会导致功率调节的可靠性及效率非常低。为得到更能准确反映数据链路状况的RSSI值，本文在传统的功率调节算法中加入了RSSI均值滤波机制，将跳变较大的RSSI值剔除后取均值来提高节点对数据链路评估的准确度，准确的RSSI值不仅可以缩短系统对节点进行功率调节的时间，提高功率调控的效率，还能有效减小丢包率验证的次数，对延长节点工作寿命、降低系统网络功耗具有重要意义，另外高效的功率调节流程能大大提高用户的使用体验，有助于该智能家庭漏水检测系统的推广。

3.1 节点自适应功率调节算法的改进与实现

3.1.1 功率控制技术选择

该漏水检测系统的功率控制原则是在保证信号质量的情况下，尽量降低节点设备的发射功率。由于该系统对功率控制的精度要求不是很严格，而且节点与集中器网关的安装位置一般都是固定的，所以其上下行数据链路的衰减情况大体一致。考虑到本系统中节点设备的低功耗设计要求，所以应从上行数据链路进行功率控制，另外，由于开环功率控制技术无需反馈，发射机只需根据自身测量得到的信息对其发射功率进行调节，在信道状况突然变化时能够快速做出响应，没有数据链路时延的问题，常用于确定初始发射功率，适用于本系统，所以本文对漏水检测节点进行发射功率调节时采用的是反向开环功率控制方式。

3.1.2 基于 RSSI 的室内路径损耗模型

本文采用的是基于RSSI的自适应功率调节算法，该算法实现的前提是对数据链路上无线信号的衰减情况做出可靠的评估，有研究通过使用RSSI值对无线信号的数据链路状况进行评估，并通过实验证明了RSSI值能很好的反映无线信道的链路质量^[30]。准确的RSSI值不仅可以缩短系统对节点进行功率调节的时间，提高功率调控的效率，还能有效减小丢包率验证的次数，对延长节点工作寿命、降低系统网络功耗具有重要意义，另外高效的功率调节流程能大大提高用户的使用体验，有助于该智能家庭漏水检测系统的推广。

在实际的应用环境中，信号强度 RSSI 值会随着传输距离的增加而衰减，常用的 RSSI 信号衰减模型有：不规则度模型、对数路径损耗模型、对数正态阴影路径损耗模型、自由空间传输模型以及无线电不规则模型等^[31]。其中使用最多的是对数正态阴影路径损耗模型，也叫室内路径损耗模型^[32]，该模型如下所述：

$$R_L(d) = R(d_0) + 10\lambda \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (3.1)$$

上式（3.1）中， $R_L(d)$ 是无线信号经过距离 d 的信道损耗； d_0 为参考距离； λ 为路径损耗系数； X_σ 是由多径效应、反射和干涉等引起的信号强度波动的随机变量，它是外部环境干扰的主要体现，服从标准高斯分布即： $N \sim (0, \sigma^2)$ ，其中 σ 的取值根据传播环境来决定。表3.1^[33]列出了不同环境下 λ 和 σ 的取值。

表 3.1 不同环境下的路径损耗模型参数取值

环境条件	λ		σ	
	LOS	NLOS	LOS	NLOS
室内	11.79	4.58	2.22	3.51
室外	1.76	2.5	0.83	2
户外开阔环境	1.58	—	3.96	—
办公室环境	1.63	3.07	1.9	3.9
LOS：无线信号的视距传输；NLOS：无线信号的非视距传输				

由式（3.1）可知，无线信号的传输距离越远，即 d 越大，信号在传输过程中的衰减越大。式（3.1）中的 $R(d_0)$ 是在参考距离 d_0 处接收到的信号强度^[34]，具体计算公式如下所示：

$$R(d_0) = 10 \lg \left[G_t G_r \left(\frac{c}{4\pi f} \right)^2 \right] \quad (3.2)$$

在式（3.2）中， G_t 为发射天线的增益， G_r 为接收天线的增益， c 为光速， f 为载波频率，可见 $R(d_0)$ 主要与天线增益有关，它在系统中是一个定值。

信号接收端接收到的 RSSI 值与信号传输距离之间的理论计算关系如下所示^[35]：

$$R(d) = R_s + R_w - R_L(d) \quad (3.3)$$

在式 (3.3) 中, $R(d)$ 是与信号发射端相距 d 时信号接收端接收到的 RSSI 值, R_s 是发射信号的初始发送强度, R_w 是经过天线增益的信号强度, $R_L(d)$ 是信号传输损耗。由式 (3.3) 可知, 无线信号的传输距离越远, 其路径损耗越大, 则在接收端接收到的信号强度就越小, 表明该数据链路的通信状况越差^[36]。

由上述 RSSI 室内路径损耗模型可知: 当节点向集中器网关发送数据时, 距离集中器网关较近的节点, 其在数据传输过程中的信号衰减较小, 接收端对应的 RSSI 值较大, 因而数据链路状况较好; 而距离集中器网关较远的节点, 由于其传输损耗较大, 所以接收端对应的 RSSI 值较小, 其数据链路状况较差。

3.1.3 RSSI 均值滤波

在系统功率调控阶段, 当节点设备对来自集中器网关的多组信号的 RSSI 值进行采集时, 由于本系统的应用场景为家庭, 难免会有人员走动、阻挡物迁移等影响无线信号传播的情况发生, 从而造成 RSSI 测量值产生较大波动, 这将直接影响到功率调节的效率及可靠性, 所以需要波动较大的跳变数据进行处理^[37], 从而得到一个能准确反映数据链路状况的 RSSI 值。下面将对常用的 RSSI 高斯滤波方式进行介绍和分析, 然后根据本系统的实际情况, 提出 RSSI 均值滤波方案。

3.1.3.1 RSSI 高斯滤波

研究表明^[38-40], 接收端接收到的 RSSI 值是一个概率问题, 其分布密度最大的地方就是测量值和真实值最接近的地方, 所以可通过对接收到的 RSSI 值进行高斯拟合及滤波, 方便地滤除由大部分小概率事件所引起的错误数据, 从而提高所采集的 RSSI 值的精确性。

基于 RSSI 高斯滤波的算法^[41]描述如下:

在式 (3.1) 中, X_σ 服从正态分布, 即: $N \sim (0, \sigma^2)$, 其期望值 $E(X_\sigma) = 0$, 于是有:

$$E(R_L(d)) = E[R(d_0) + 10\lambda \lg\left(\frac{d}{d_0}\right)] \quad (3.4)$$

在实际应用中, 对 RSSI 进行高斯滤波时可选用的距离损耗模型如下式 (3.5) 所示:

$$RSSI = 10n \lg d + A \quad (3.5)$$

在式 (3.5) 中, A 表示在距离发射器 1m 处所接收信号平均能量的绝对值, n 是与信号传输环境有关的传输系数, 其取值可以参考表 3-1, d 表示接收点与发射点之间的距离。

RSSI 的高斯分布模型的概率密度函数如下:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.6)$$

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (3.7)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - m)^2 \quad (3.8)$$

在上述公式中， X_i 表示接收端接收到的第*i*个RSSI测量值， n 表示RSSI值的信号个数，在一些研究中，把高斯分布函数值在区间 $[0.5,1]$ ^[38]或者 $[0.6,1]$ ^[42]时的情况当作是大概率事件，通过滤除这个区间以外的RSSI值来提高数据的准确性。

经过上述高斯滤波之后得到的RSSI值滤除了小概率事件的干扰，提高了RSSI值的精确性。然而该滤波方式并不适用于本系统，因为LoRa基于扩频通信技术，具有抗干扰能力强、可靠性高等优势，所以节点采集到的RSSI值波动范围不会特别大，而且在本系统中，由于节点与集中器网关的位置一般都是固定的，其进行通信时，无线信号的路径损耗一般不会有特别大的变动，另外，由于本系统在对节点功率进行调节时，每个功率等级对应的RSSI值是在一个范围之内，而且在对节点进行完功率调节之后会有丢包率验证环节，因而对功率调节的精确性要求不高。综上所述，基于高斯分布的RSSI滤波不适用于本系统。

3.1.3.2 RSSI均值滤波

在人员走动、室内阻挡物迁移的条件下，分别对距离集中器网关较近的节点2和距离较远的节点5所采集到的50个RSSI值进行统计，统计结果分别如下图3.1和图3.2所示：

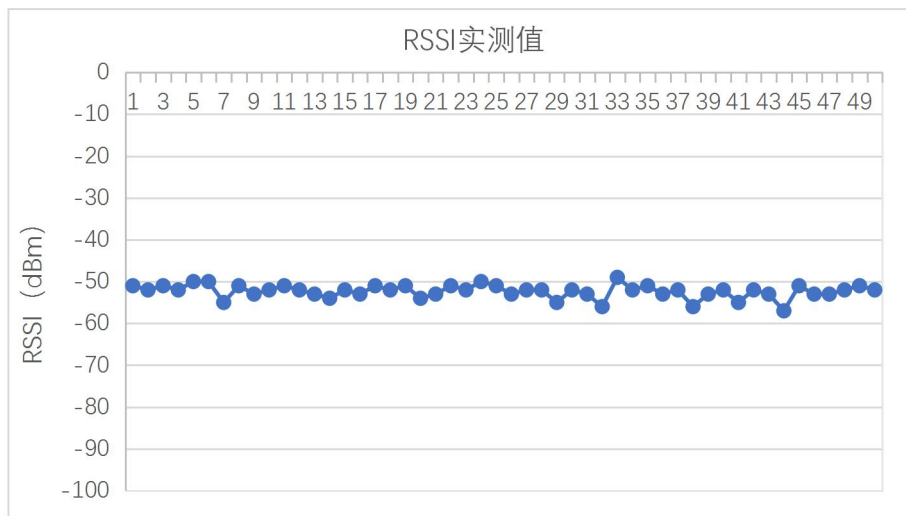


图3.1 节点2的RSSI实测值

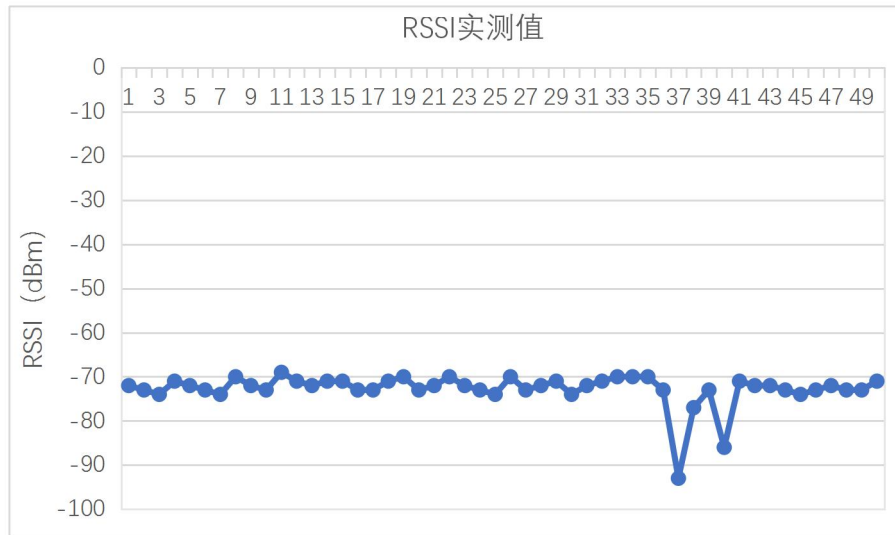


图3.2 节点5的RSSI实测值

上图3.1表明，距离集中器网关较近的节点2所采集到的RSSI值相对比较稳定，表明在信号强度采集过程中其数据链路上无线信号的衰减情况大致相同；从图3.2中可以看到，在节点5采集到的RSSI值中，除了个别跳变较大的数值之外，其余的值相对比较平稳。

综合上述分析，本文采用均值滤波算法对节点采集到的RSSI值进行处理，该算法的原则是：将一组RSSI测量值中跳变较大的值剔除^[43]，对剩余的RSSI取均值，并以该平均值作为功率调节的依据。该算法不仅能排除偶然因素的影响，提高功率调节的准确性，而且易于实现。

RSSI均值滤波算法具体如下所述：

假设节点接收到的一组RSSI值为 $(RSSI_1, RSSI_2, \dots, RSSI_m, \dots, RSSI_{50})$ ，首先计算每两个相邻RSSI的差值 $\Delta R = RSSI_m - RSSI_{m-1}$ ，并求出这些差值的平均值 Δ ，然后将每个 ΔR 与变化均值 Δ 进行比较，为提高RSSI值的准确度，将大于 Δ 的部分所对应的数据视为产生跳变的RSSI异常值，需要将其剔除，最后把余下符合条件的RSSI取平均值，并以此平均值作为节点功率调节的依据。

3.1.4 自适应功率调节算法改进

3.1.4.1 改进算法简介

在传统的WSN网络中，由于距离集中器较远的节点其信道路径损耗较大，又基于开发方便的考虑，所以通常会把所有节点设备的发射功率调节一致，而且一般设置为最大发射功率，以此来保证所有节点设备的可靠通信。然而在该方式下，距离集中器网关较近的节点由于采用最大发射功率会造成功耗的浪费，这对节点的续航以及整个系统的工作寿命产生显著影响。

为解决上述问题，本文采用基于RSSI均值滤波的自适应功率调节算法，在传统算法的基础上加入了RSSI均值滤波环节以提高功率调节的效率，该算法可以把每个节点设备的发射功

率调节到最合理的状态，使集中器网关接收到各节点信号的强度大致相同，从而达到降低功耗、延长整个网络工作寿命的目的。对各节点设备的发射功率调节在系统安装调试阶段进行。

该算法的原理是：根据实际应用场景，对节点接收到的多组RSSI值进行均值滤波处理，剔除跳变较大的数据，以此来提高数据链路评估的准确性，并根据实际测试情况建立节点发射功率和接收信号强度RSSI的对应表，节点以滤波后的RSSI均值作为数据链路状况的参考依据，对其发射功率进行自动调节。另外，对节点的发射功率调控完之后，将根据实际的丢包率对该发射功率下的数据通信状况进行评估，如果丢包率测试结果在设定的阈值范围之外，则将节点的输出功率等级调大一级后重新验证，直到满足丢包率要求为止，该验证环节不仅可以提高功率调节的可靠性，还能对其效率进行评估。

3.1.4.2 理论依据

在通信网络中，无线信号的发射功率、接收功率和距离的关系可用下式(3.9)来表示^[44]：

$$Pr = \frac{Pt}{d^r} \quad (3.9)$$

式(3.9)中，Pr为接收功率，Pt为发射功率，功率单位均为mW；d是信号发射距；r为传播因子，该值主要与环境有关。功率换算公式如下所示：

$$dBm = 10 \lg\left(\frac{P}{1mW}\right) \quad (3.10)$$

根据式(3.10)对式(3.9)进行功率换算后可以得到下式^[27]：

$$RSSI_r = RSSI_t - 10r \lg(d) \quad (3.11)$$

在式(3.11)中，10r lg(d)表征无线信号在传播过程中的路径损耗量，RSSI_r和RSSI_t的单位均为dBm，分别表示信号接收强度和信号发射强度。

在该漏水检测系统的功率调控阶段，节点是信号接收端，集中器网关是信号发送端；在调控后的测试阶段以及正常工作状态下，节点是数据发送端，集中器网关是信号接收端。假设节点设备的接收功率为P_r，发射功率为P_t；集中器网关的发射功率为P_T，接收功率为P_R，其单位均为dBm。由于节点设备和集中器网关的位置均是固定的，所以认为其上下行数据链路的衰减情况基本一致，结合式(3.11)可得出下式：

$$P_T - Pr = Pt - P_R = 10r \lg(d) \quad (3.12)$$

假设节点的信号接收功率为RSSI_N (dBm)，集中器网关的信号接收功率为RSSI_C (dBm)，结合式(3.12)可得：

$$RSSI_C = P_t - P_T + RSSI_N \quad (3.13)$$

在进行数据通信时，为优化网络功耗，同时保证数据传输的可靠性，应将集中器网关的接收功率即RSSI_C控制在一定的范围内。在式(3.13)中，P_T是集中器网关的发射功率，由于集

中器主要由电源适配器供电，所以不需要进行低功耗设计，因此 P_T 值是固定的，通常设置为最大值。所以，当节点所接收到的信号其 $RSSI_N$ 值偏大时，为了将 $RSSI_C$ 维持在一定范围，可以通过降低节点发射功率 P_t 的方式进行调节；反之，当节点所接收到的信号其 $RSSI_N$ 值偏小时，可以通过增大节点发射功率 P_t 的方式进行调节。

该算法按照节点与集中器网关之间实际的数据链路质量对节点发射功率进行等级划分，根据不同的数据链路衰减情况分配相应的发射功率，从而达到优化网络功耗的目的，而且对RSSI的均值滤波可以提高功率调节的效率及可靠性。

3.1.5 算法实现

3.1.5.1 相关软硬件设置

本系统中所使用的 LoRa 芯片为 SX1278，该芯片内部主要配备了三个不同功率的放大器，分别为 PA_HF、PA_LF 和 PA_HP，其中 PA_HF 与 RFO_HF 引脚相连接，PA_LF 与 RFO_LF 引脚相连接，其射频功率动态调节范围均为-4dBm~14dBm，调节步长为 1dB；PA_HP 与 PA_BOOST 引脚连接，其功率调节范围为-2dBm~20dBm，可持续输出 17dBm，周期性工作功率可达到 20dbm，且这个功率放大器可以覆盖频率合成器处理的所有频段。PA_HF 主要覆盖 860Mhz 以上的频段，而 PA_LF 覆盖的是 525Mh 往下的频段。

与 PA_BOOST 引脚相连接的功率放大器 PA_HP 其输出功率计算如下式（3.14）所述：

$$P_{out} = 20 - (15 - OutputPower) \quad (3.14)$$

在实际使用中，以 SX1278 芯片的 PA_BOOS 引脚作为射频输出信号口，因为该引脚的输出功率最高，可以使漏水检测节点的通信网络覆盖到更大的范围空间，也能保证节点设备有更大的发射功率调控范围。通过设置 SX1278 内部的寄存器 RegPaConfig 来调节输出功率，寄存器地址与功率对应表如下表 3.2 所示，为保证距离集中器网关较远的节点能正常通信，节点的初始功率均设置为最大值 20 dBm。

表 3.2 寄存器地址与功率对应表

寄存器地址	0x09F1	0x09F3	0x09F5	0x09F7
功率 (dBm)	6	8	10	12
寄存器地址	0x09F9	0x09FB	0x09FD	0x09FF
功率 (dBm)	14	16	18	20

3.1.5.2 功率等级划分

RSSI值与发射功率的对应表根据实际测试结果建立，由于所使用的SX1278的射频输出引脚PA_BOOST的输出功率调节范围是-2 dBm~20dBm，而接收信号的RSSI值覆盖范围是

-30dBm~-99dBm，显然节点发射功率与接收信号的RSSI值不能一一对应，所以在设计时将节点的每一级发射功率与某个范围的RSSI值相互对应。为了能使节点有更大的发射功率调节范围，本文将发射功率设置为八个等级，每级发射功率都对应一个范围的RSSI值。

表 3.3 节点接收信号的 RSSI 值与其发送功率对应关系

功率等级	1	2	3	4
发射功率(dBm)	6	8	10	12
RSSI(dBm)	>-50	-50~-60	-60~-70	-70~-80
功率等级	5	6	7	8
发射功率(dBm)	14	16	18	20
RSSI(dBm)	-80~-85	-85~-90	-90~-95	<-95

结合lg函数的特性，根据室内路径损耗模型即式（3.1）可知，在相同硬件射频参数和数据传输环境的条件下，与集中器网关之间的距离较近的节点，其路径损耗RL(d)随距离d的变化量就越大，这就意味着节点所接受到的信号强度RSSI在距离集中器网关较近时变化程度较大；反之，与集中器网关之间的距离较远的节点，所接受到的信号强度RSSI的变化程度较小。上述分析表明，不应均匀划分出八个RSSI的范围，而是通信距离越远，即对应的节点发射功率越大，其对应的RSSI范围越小。节点接收信号的RSSI值与其发射功率对照表如上表3.3所示。

3.1.5.3 算法详细实现

本文所设计的自适应功率控制算法采用的是反向开环功率控制方式，首先集中器网关会发送多个数据包给漏水检测节点，检测节点接收并采集数据包中的RSSI值，经过对跳变较大的数值进行处理以及均值计算后，得到一个能更准确反映数据链路状况的RSSI值，节点根据该RSSI值进行发射功率的调节，RSSI均值滤波算法的原理如前所述。

节点直接采集到的RSSI相关值存放在寄存器RegPktRssiValue中，通过以下公式转换成有效的RSSI值：

$$RSSI = -137 + PacketRssi \quad (3.15)$$

在式（3.15）中，PacketRssi 是节点直接读取的 RSSI 相关值。

该漏水检测系统在安装调试阶段对节点设备进行功率调节，调控流程如下：中央控制器逐一唤醒漏水检测节点并向其发送50个数据包，节点采集到50个RSSI值，这些值由SX1278芯片采集后通过SPI总线传输给单片机进行均值滤波处理并得到一个RSSI₀，节点根据该RSSI₀值调节其发送功率，节点接收信号的RSSI值与其发射功率对照表如表3.3所示。

当调整完某节点的发射功率之后，将根据实际的丢包率状况对该发射功率下数据通信的可靠性进行评估和验证，验证流程如下：节点向集中器网关连续发送 400 个数据包，集中器网关接收并统计这些数据包，如果丢包率小于 1%，则向节点返回 Pa_ConOk 指令；如果丢包

率大于 1%，则向节点发送 Pa_ConFail 指令，节点接收该指令并自动将其发射功率调大一级后重复上述测试，直到满足丢包率要求为止。在每个节点的功率依次调节完毕后，此安装调试阶段结束，系统进入正常工作状态。本文所使用的自适应功率调节算法流程图如下图 3.3 所示。

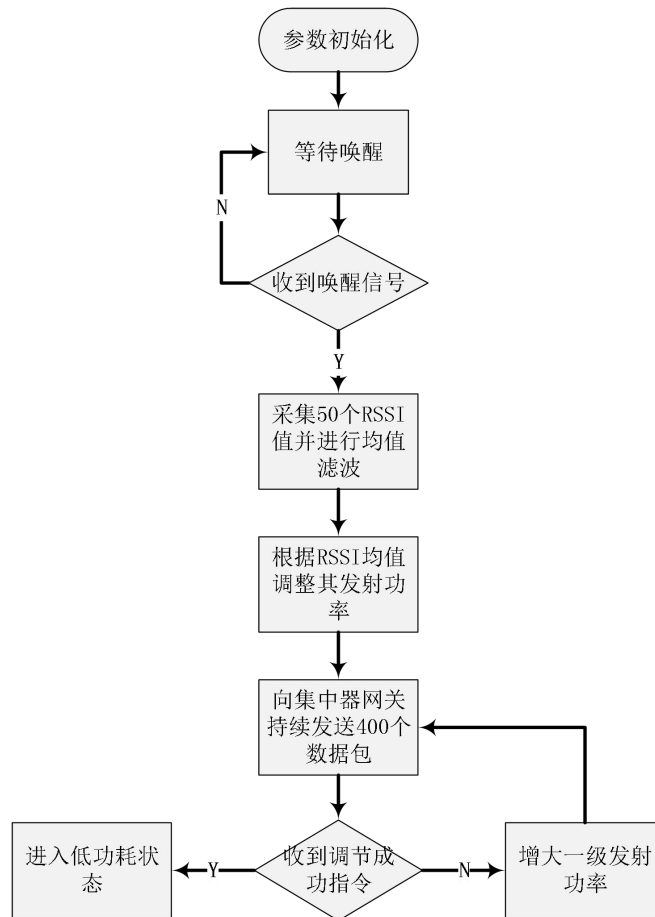


图3.3 漏水检测节点发射功率调节流程

3.2 算法测试

3.2.1 测试方案及测试数据

本测试旨在对改进后的自适应功率控制算法的性能及效率进行评估，以功率调节后的丢包率验证次数作为衡量算法效率的依据，若丢包率验证次数仅为一次，则说明节点与集中器网关在一轮数据传输后便完成了其对功率的调节。

测试条件：室内，以集中器网关为中心，将 10 个节点按照由近及远的距离依次放置；射频参数：扩频因子 SF=7、带宽 BW=125KHz、编码率 CR=4/5、数据速率 DR=5.47kbps。

当所有节点按照本文所设计的自适应功率控制改进算法，对其发射功率调整完之后，各

节点会将包含发射功率、滤波后的 RSSI 均值以及丢包率检测次数等信息的数据包发送给集中器网关，集中器网关对这些数据包进行统计并上传到上位机，测试结果如下表 3.4 所示：

表 3.4 节点功率调节测试结果

节点地址	发射功率 (dBm)	RSSI 均值 (dBm)	丢包率验证次数 (次)
0x01	6	-41	1
0x02	8	-52	1
0x03	8	-59	1
0x04	10	-67	1
0x05	12	-73	1
0x06	14	-83	1
0x07	16	-85	2
0x08	18	-94	1
0x09	20	-98	1
0x0a	20	-99	1

本次测试所使用的上位机软件界面如下图 3.4 所示：

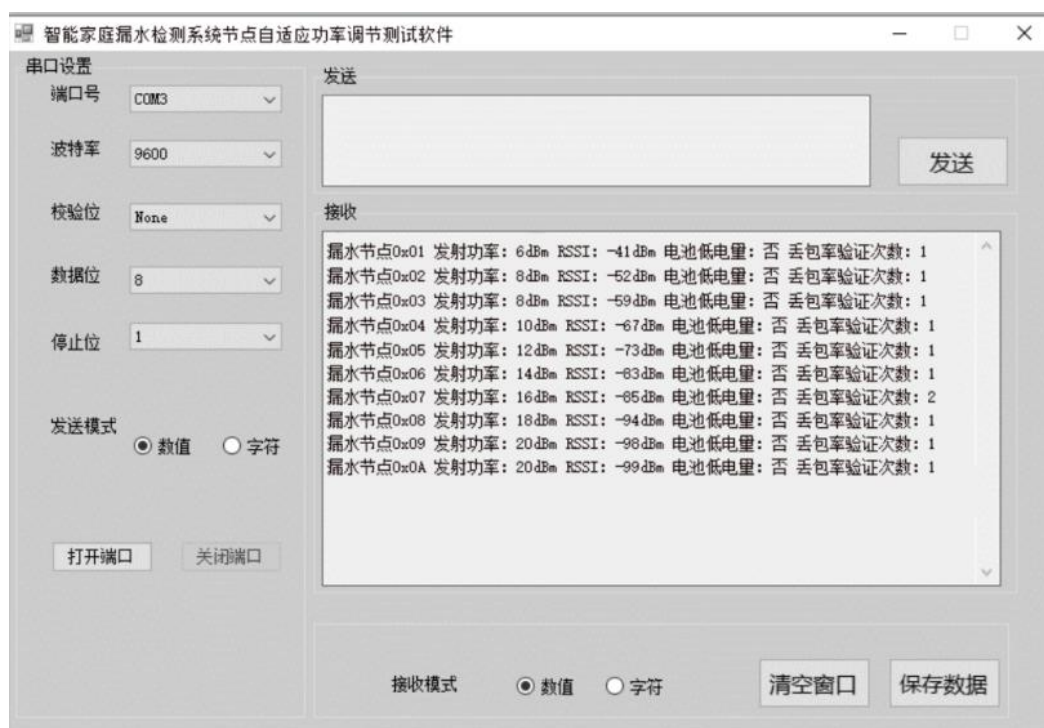


图3.4 上位机测试界面

3.2.2 测试结果分析

从表 3.4 中可看出，距离集中器网关距离较远的节点配置了最大的发射功率 20dBm，如节点 9 和节点 10，从而保证数据通信的可靠性；而距离集中器网关较近的节点配置了较小的发射功率，如节点 1 和节点 2，其发射功率分别为 6 dBm 和 8 dBm，从而大大降低节点功耗。而且除了节点 7 之外，其余节点在功率调节阶段的丢包率验证次数均为一次，这表明功率调节的效率非常高，这不仅能有效降低系统安装调试阶段的节点功耗，还能缩短安装调试的时间，提高用户使用体验，对该智能家庭漏水检测系统的推广具有重要意义。

3.3 节点低功耗硬件设计

3.3.1 低功耗器件的选择

该智能漏水检测系统的硬件主要包含集中器网关和漏水检测节点。集中器网关的核心元器件是LoRa射频模块和WiFi模块；漏水检测节点的核心元器件主要包括低功耗MCU和LoRa射频模块。在硬件设计中，其他元器件都是围绕上述两个核心器件工作的。由于集中器网关正常情况下是由适配器供电，只有在家庭停电时才会自动切换到电池供电，而漏水检测节点始终由干电池供电，所以在本系统的硬件设计中，仅考虑对漏水检测节点进行低功耗设计。

在对漏水检测节点进行硬件设计的阶段，考虑到系统对低成本、低功耗以及高稳定性的实际需求，对关键器件的选型如下：

1. MCU选用STM8L051F3P6TR，它属于超低功耗，并且拥有足够的RAM，其微型性以及外设接口足以满足本系统的应用需求，具有8KB的闪存、1KB的RAM和256B的EEPROM以及丰富的模拟数字外围接口。

2. 射频通信模块选用SX1278芯片，该芯片在休眠模式下的功耗可以忽略不计。SX1278基于LoRa TM扩频调制技术，具有抗干扰能力强、可靠性高等优势，其远距离通信优势主要得益于扩频调制技术，而非通过增大发射功率，所以在相同的能耗下可以达到更远的通信距离。该芯片在不同工作状态下的电流消耗如下：休眠状态下小于0.2uA，空闲状态下为1.6mA，接收状态下为12mA，最大功率发射的条件下为120mA，该芯片在远距离通信中具有很大的优势。

3.3.2 硬件低功耗设计

在对漏水检测节点的硬件进行低功耗设计时，除了选用低功耗器件，还须对硬件参数设

置进行适当的考虑。在由电池供电的 LoRa 终端节点中，持续耗电电量的主要是 MCU，其能耗分为静态功耗和动态功耗^[45]。其中静态功耗主要与 MCU 的制造工艺有关；动态功耗主要与 MCU 的工作频率和工作电压有关，其计算公式如下所述：

$$E_{Dym} = C \times V^2 \times f \quad (3.16)$$

在式（3.16）中，C 为负载电容，V 为供电电压，f 为时钟频率。MCU 的总功耗是静态功耗 E_{Sta} 和动态功耗 E_{Dym} 之和，如下式（3.17）所述：

$$E = f \times E_{Dym} + E_{Sta} \quad (3.17)$$

因此，MCU 的电能消耗主要与以下因素有关^[46]：制造工艺、工作电压、时钟频率、外设数目以及运行模式等。本文在对节点进行硬件低功耗设计时，主要通过以下方式优化 MCU 的功耗：1. 在完成处理任务时，MCU 立即休眠并开启 RTC；2. 在不影响任务处理的前提下，降低工作频率以减小功耗；3. 合理设置外设接口的数量。

3.4 节点功耗测试与分析

3.4.1 测试方案及测试数据

节点功耗测试内容主要包括四部分：LoRa 模块发射功耗、LoRa 模块接收功耗、休眠时的节点功耗以及唤醒后的节点功耗。

3.4.1.1 LoRa 模块发射功耗测试

当节点检测到漏水信号或电池低电压信号时，初始化 LoRa 模块，并向集中器网关发送数据。

测试方案：将阻值为 9.6Ω （万用表实测阻值）、精度为 0.1% 的采样电阻串联到 LoRa 模块的电源输入端，用示波器抓取该电阻两端的电压。

测试对象：如 3.2 章节中所述的 10 个漏水检测节点，即以集中器网关为中心，按照由近及远的距离依次放置的 10 个节点，其射频参数为：扩频因子 SF=7、带宽 BW=125KHz、编码率 CR=4/5、数据速率 DR=5.47kbps。测试对象实物图如下图 3.5 所示：



图3.5 测试对象

下图 3.6 是节点 7 的 LoRa 信号发射瞬间实测的采样电阻两端电压波形：

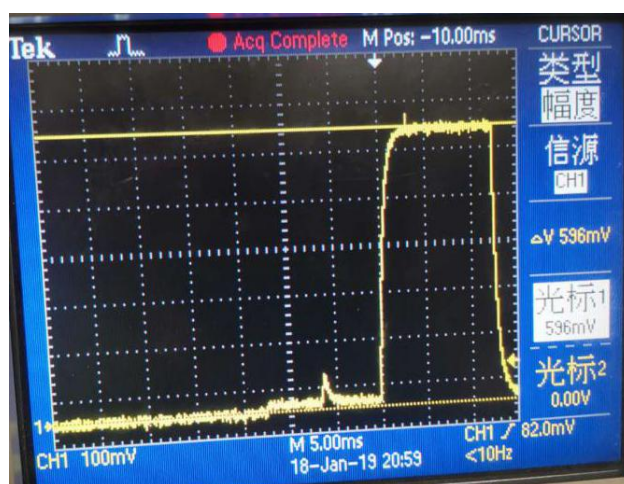


图3.6 发射瞬间采样波形

从上图中可以看出，LoRa 模块信号发射瞬间，该采样电阻两端电压的幅值为 596mV，由此可得发射瞬间 LoRa 模块所消耗的电流为 $596\text{mV}/9.6\Omega=62.08\text{mA}$ ，电池电压实测为 2.86V，由此可得节点 7 的 LoRa 发射瞬间功耗约为 178mW。

依次对 10 个节点的 LoRa 模块发射功耗按照上述测试方案进行测试，测试数据统计结果如下表 3.5 所示，从表中可以看到，所测试的 10 个节点设备在 LoRa 发射瞬间的平均电流消耗为 57.71mA，平均功耗为 165.12mW。

表 3.5 LoRa 模块发射功耗测试结果

节点地址	电池电压 (V)	消耗电流 (mA)	功耗 (mW)	发射功率 (dBm)
0x01	2.84	18.75	53.25	6
0x02	2.87	21.43	61.50	8
0x03	2.81	22.08	62.04	8
0x04	2.89	25.45	73.55	10
0x05	2.88	33.24	95.73	12

续表 3.5

节点地址	电池电压 (V)	消耗电流 (mA)	功耗 (mW)	发射功率(dBm)
0x06	2.83	47.96	135.73	14
0x07	2.86	62.08	177.55	16
0x08	2.88	103.75	298.80	18
0x09	2.86	119.78	342.57	20
0x0a	2.86	122.56	350.52	20
平均值	2.86	57.71	165.12	—

3.4.1.2 LoRa模块接收功耗测试

表 3.6 LoRa 模块接收功耗测试结果

节点地址	采样电阻电压 (mV)	消耗电流 (mA)	功耗 (mW)
0x01	139	14.48	2.01
0x02	145	15.10	2.19
0x03	129	13.44	1.73
0x04	149	15.52	2.31
0x05	138	14.38	1.98
0x06	145	15.10	2.19
0x07	148	15.42	2.28
0x08	133	13.85	1.84
0x09	136	14.17	1.93
0x0a	142	14.79	2.10
平均值	140	14.63	2.06

对 LoRa 模块进行射频接收模式下的功耗进行测试时, 采用与上述相同的方案, 即对采样电阻两端的电压波形进行抓取。对上述 10 个节点依次进行测试, 测试统计结果如上表 3.6 所示, 从表中可以看出, 节点在射频接收模式下的功耗平均值为 14.63mA。

3.4.1.3 节点休眠功耗测试

由于 SX1278 在休眠模式下的典型电流消耗仅为 0.2uA, 可以忽略不计, 所以节点在休眠模式下的功耗主要来源于开启了 RTC 功能的 MCU。在节点休眠模式下, 用毫安表电流档位测量上述 10 个节点的电流, 经过统计计算后得到节点休眠时的平均电流为 1.7uA。

3.4.1.4 节点唤醒功耗测试

当检测到漏水或者电池低电量时, 漏水检测节点被唤醒, 在此状态下, 将阻值为 9.6Ω、精度为 0.1%的采样电阻串联到 MCU 的电源输入端, 用示波器抓取该电阻两端的电压, 下图 3.7 为节点 1 的采样波形:

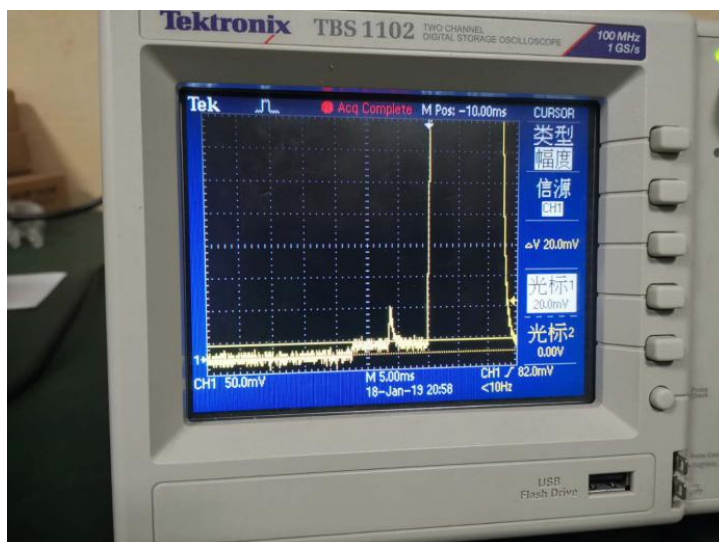


图3.7 节点唤醒时采样波形

从上图可以看到，采样电阻两端电压幅值为 20mV，由此可知，当节点检测到漏水并被唤醒时，MCU 的启动电流为 $20\text{mV}/9.6\Omega=2.08\text{mA}$ 。对 10 个节点依次进行上述测试，统计计算后得到节点唤醒时 MCU 的平均启动电流为 2.23mA。

3.4.2 测试结果分析

节点各个状态的功耗测试结果统计如下表 3.7 所示，从表中可以看出，本系统中基于自适应功率调节算法所设计的低功耗节点，其在数据发送时的平均电流消耗仅为 57.71mA，而所使用的 LoRa 芯片 SX1278 在 20dBm 发射功率下的电流消耗典型值为 120mA，由此可见，相比于在传统 WSN 网络中将所有节点的发射功率设置成最大值的设计方案，本文所设计的漏水检测节点在发送状态下的平均电流消耗仅为 47%，这意味着在相同条件下进行数据发送时，相比于传统的 WSN 通信网络，本系统所设计的节点网络可以节省约 53% 的发射能耗，从而大幅度延长系统的工作寿命。

表 3.7 节点各个状态平均功耗

测试对象	功耗均值
休眠时的节点	1.7uA
唤醒时的节点 MCU	2.23mA
接收模式下的 LoRa 模块	14.63mA
发射模式下的 LoRa 模块	57.71mA

假设漏水检测节点由两节碱性干电池串联供电，电池在正常工作状态下的电量为 2000mAh。在漏水检测节点正常工作时，大部分时间都处于休眠模式，为评估节点的工作寿命，保守估计其每天检测到一次漏水事件。在节点发送完报警信号并自动关闭总水阀之后，

若该节点处的漏水情况未被解决,则在休眠 6s 之后重新发送报警信号,直到被用户发现并处理,假设用户的反应时间为 15 分钟,由于 RF 信号发送的时间仅为数毫秒,与休眠时间 6s 相比可以忽略不计,因此可认为节点平均 6s 发送一次报警信号,每分钟发送 10 次,则在用户的反应期间节点会发送 150 次 RF 报警信号,每次发送报警信号的时长为 12.5ms,以节点发射信号时的平均电流 57.71mA 为参考,可计算出节点在每次检测到漏水事件时 RF 信号发送所消耗的电量 $C1$,如下式 (3.18) 所示:

$$C1 = 150 \times 12.5ms \times 57.71mA \approx 0.03mAh \quad (3.18)$$

假设节点每次发送报警信号时均未发生碰撞或者失败,则在上述漏水事件中会接收 150 次确认信号,每次接收信号的持续时间为 10ms,节点在接收状态下的平均电流消耗为 14.63mA,由此可得信号接收所消耗的电量 $C2$,如下式 (3.19) 所示:

$$C2 = 150 \times 10ms \times 14.63mA \approx 0.006mAh \quad (3.19)$$

在此期间 MCU 的唤醒时间为 60s,除此之外节点每天会唤醒两次以检测电池电量,每次唤醒时间仅为 8ms,相比于 60s 而言该值可忽略不计,因而 MCU 唤醒状态所消耗的电量 $C3$ 如下式 (3.20) 所示:

$$C3 = 60s \times 2.23mA \approx 0.037mAh \quad (3.20)$$

除了上述状态之外,其余时间节点均处于休眠模式,与休眠状态持续的时间相比,上述漏水事件所持续的时间可以忽略,由此可估算出节点每天处于休眠状态所消耗的电量 $C4$ 为:

$$C4 = 24h \times 1.7\mu A \approx 0.041mAh \quad (3.21)$$

综上所述,在节点每天检测到一次漏水事件、每次发送报警信号均未发生碰撞或失败,而且假设用户的反应及处理时间为 15 分钟的条件下,节点平均每天所消耗的总电量 C 为:

$$C = C1 + C2 + C3 + C4 \approx 0.114mAh \quad (3.22)$$

在上述能耗情况下,当节点使用常规的 2000mAh 干电池供电时,理论上可以工作的时长如下式 (3.23) 所示:

$$T = 2000 \div 0.114 \div 365 \approx 48(\text{年}) \quad (3.23)$$

在实际应用中,由于干电池一般都会有漏电流,而且在干电池使用到后期或者在低温条件下放电时,电极可能会出现钝化,从而使电池的工作性能急剧恶化^[47],因而节点无法达到理论上 48 年的使用寿命,由于目前市面上的 AA 电池其有效使用寿命在 10 年左右,所以在不考虑其他偶然因素诸如电池质量等问题的情况下,可估计节点的平均使用寿命为 10 年。

3.5 本章小结

本章首先结合本系统的实际应用情况对功率控制技术、室内路径损耗模型以及 RSSI 高斯滤波等相关技术依次进行了介绍和分析,并据此提出了本文所使用的基于 RSSI 均值滤波的自适应功率调节算法,然后对该算法在本系统中的具体实现过程作了详细梳理和描述,并对改进后的算法进行了测试,测试数据表明,与集中器网关距离不同的节点自动配置了合理的发射功率,而且功率调节完成后的丢包率平均验证次数仅为一次,这表明改进后的自适应功率调节算法的效率很高,这对该系统的推广以及用户体验具有重要意义。最后结合低功耗硬件设计,对漏水检测节点的低功耗设计做了更加全面的阐述,并对节点功耗进行了测试,测试数据表明,在相同条件下进行数据发送时,相比于传统的 WSN 通信网络,本系统所设计的节点网络可以节省约 53%的发射能耗,从而大幅度延长系统的工作寿命,节点使用 2000mAh 的干电池供电时,其平均工作寿命可长达 10 年。

第四章 基于非时隙 CSMA/CA 算法的 LoRa 无线网络设计

考虑到在原非时隙 CSMA/CA 算法中,当多个节点同时需要发送数据时,通常采用简单的二进制指数退避算法产生一个随机的退避时隙^[24],使各节点延迟接入信道从而防止数据发生碰撞。该方式虽然简单,但是各节点选择相同退避时间窗口的概率较大^[29],当这些节点的退避时间同时归零后会一起接入信道,从而造成通信失败。为减小上述网络碰撞的概率,本文在原有的二进制指数退避算法的基础上对退避时隙进行了改进,在设计退避时隙时将当前的网络状况考虑在内,使得各节点的退避时间具有一定的自适应性,因而其选择相同退避时间窗口的概率会大大降低。另外,该改进算法对退避时隙的优先级进行了设计,使得优先级高的节点具有更短的退避时间窗口,访问信道时更有竞争力,从而使得其通信失败的概率更低。该改进算法可以有效减小无线网络发生数据碰撞的概率,具有较高的实用意义。另外,对目前常用的网络拓扑结构和通信协议进行了比较和分析,并在此基础上对系统的 LoRa 无线网络架构以及通信协议进行了设计。

4.1 基于退避时隙优化的非时隙 CSMA/CA 算法改进及实现

4.1.1 非时隙 CSMA/CA 算法原理

在 IEEE 802.15.4 标准中,CSMA/CA 算法包括两种信道访问机制:非时隙 CSMA/CA 信道访问机制和时隙 CSMA/CA 信道访问机制^[25],此二者中,时隙 CSMA/CA 算法对设计的要求较高,需要节点与集中器具有严格的时钟同步,不符合本系统对低功耗设计的要求;非时隙 CSMA/CA 算法不需要精确的时间同步,只依靠退避算法对无线信道进行竞争,由于此方式中时隙不需要对齐,因此具有较好的实时性,所以本文采用非时隙 CSMA/CA 算法进行防碰撞设计。非时隙 CSMA/CA 算法中有两个重要参数需要维护:NB 和 BE。NB 表示已经执行的随机退避次数;BE 为退避指数,表示退避阶段的时间阶数。

非时隙 CSMA/CA 算法的原理^[48]是在发送数据之前先对信道进行两次检测以避免冲突,其工作方式如下:节点在需要接入信道进行数据发送时,会先随机退避 $2^{BE}-1$ 个时隙,在退避时间结束后,对当前信道进行 CCA 检测,若信道空闲,则节点可以接入信道进行数据传输,否则进入退避阶段并在退避时间结束后再次对信道进行检测,直到数据发送成功,或者超过最大退避次数后丢弃本次的数据帧。该算法的流程图如下图 4.1 所示。

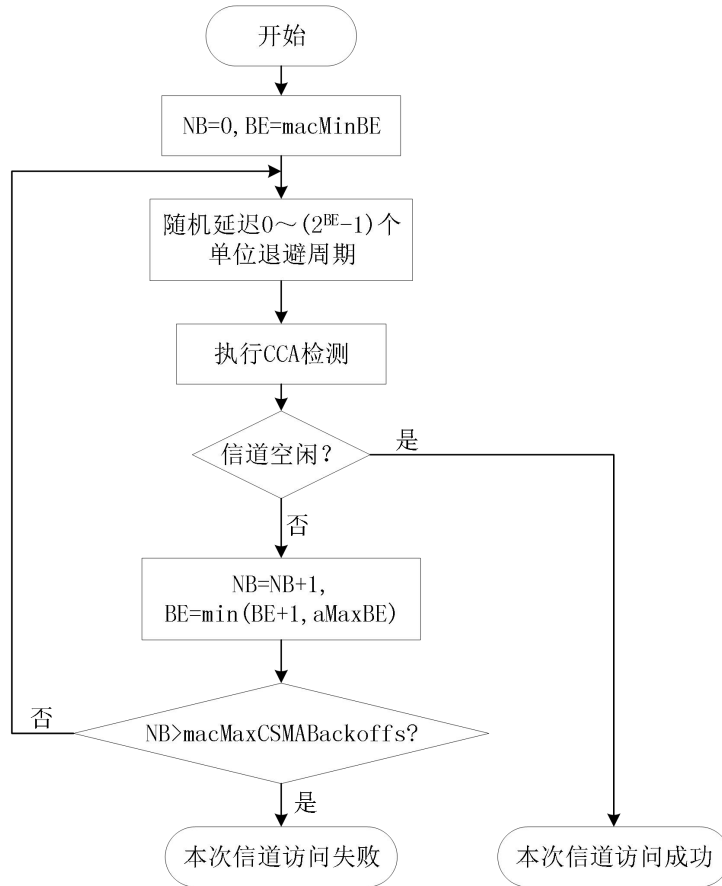


图 4.1 非时隙 CSMA/CA 算法流程图

4.1.2 传统非时隙 CSMA/CA 算法分析

在传统的非时隙 CSMA/CA 算法中，节点在进行随机退避延迟阶段采用的是简单的二进制指数退避算法，该算法对退避时隙的设计不够合理，多节点同时需要发送数据时选择相同退避时间窗口的概率依然较大^[48]，各节点在退避时间同时结束后会一起接入信道，因此其发生数据碰撞和通信失败的概率较大，下面将对其发生数据碰撞的概率进行理论分析。传统的退避时隙计算公式如下式^[29] (4.1) 所示：

$$T = (2^{BE} - 1) \times t_0 \quad (4.1)$$

式 (4.1) 中，BE 表示退避指数，可根据实际需要 BE 值进行设置，出于开发方便的考虑，网络中各节点的 BE 值一般都相同； t_0 为定值，表示退避周期的单位时间间隔，该值通过 PIB 属性值设置，一般取值为数据收发节点之间最大传播时延的两倍。

为了更加直观地展示本文对碰撞概率的优化结果，下面对非时隙 CSMA/CA 算法的退避过程进行了简化，后续的分析与比较均基于此前提条件。如图 4.2 所示，当节点 1 完成通信并经过一个分布式协调帧间隔 DIFS 之后，节点 2、节点 3 和节点 4 同时进入随机退避阶段，假设此时 BE=2，则上述三个节点会从 t_0 , $2t_0$, $3t_0$ 中随机选取一个时间长度进行退避，假设

各节点均选取了 $3t_0$ 的退避时间，则在退避时间结束后各节点会同时检测到信道空闲，此时三个节点会一起接入信道进行数据发送，从而造成数据碰撞，导致通信失败。



图 4.2 传统的 CSMA/CA 退避机制

在该算法中，各节点选择相同退避时隙的概率仅与 BE 值有关，对退避时隙的随机选择服从均匀分布^[48]，则在图 4.2 中 BE=2 的条件下，各节点选择相同退避时隙的概率 P_1 如式(4.2)所述：

$$P_1 = \frac{1}{3} \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{3} = \frac{1}{27} \quad (4.2)$$

由式(4.2)可知，在假定的前提条件下，采用传统的非时隙 CSMA/CA 算法对退避时隙进行设计时，节点选择相同退避时间窗口的概率为 1/27，对于本系统而言，这意味着当 20 个漏水检测节点同时通信时，通信失败的概率会很大，将大大降低漏水报警的实时性及通信可靠性。为降低发生数据碰撞和通信失败的概率，本文对上述算法进行了改进。

4.1.3 基于退避时隙优化的非时隙 CSMA/CA 算法改进及应用

采用原非时隙 CSMA/CA 算法中的二进制指数退避算法对退避时隙长度设计时仅考虑了退避指数 BE，而没有考虑当前的网络状况，因此使得网络数据碰撞的概率依然较大^[24]，而且没有对退避时隙的优先级进行等级划分。考虑到在该系统中，每个漏水检测节点所安装的位置不同，发生漏水所造成的安全隐患也有大小之分，比如在电源插座附近的节点其接入信道的优先级应当更高，在竞争信道时通信失败的概率应当更低，因而对不同位置上的节点设置合理的优先级具有实用性以及现实意义。基于此，并结合本系统的实际需求，本文对传统的退避时隙算法进行了优化。

4.1.3.1 退避时隙设计优化

假设第 n 次的退避时隙为 T_n ，本文所设计的退避时隙计算公式如下式(4.3)所示：

$$T_n = \left(\frac{2^{BE_{n-1}}}{NB_{n-1}} \right) \times t_0 \times P \quad (4.3)$$

式(4.3)中， BE_n 表示第 n 次的退避指数； NB_{n-1} 表示第 $n-1$ 次退避次数，对任一节点而

言，该值可体现出当前网络信道的使用状况，NB 的取值范围一般是[0,4]； t_0 为定值，表示退避周期的单位时间间隔；P 为该终端节点的优先级加权，用户可通过 APP 对节点的优先级进行自定义设置，由于本系统对通信时延的要求不高，因此将优先级的权重从高到低依次设置为 0.5、1 和 2，如下表 4.1 所示。

表 4.1 优先级与权值对应表

优先级	高	中	低
P	0.5	1	2

由式 (4.3) 可知，当节点进行第 n 次退避时，退避时间在传统算法的基础上除以第 n-1 次退避的次数，即第 n 次退避的时隙会根据此前已经退避的次数自适应地调整自身的退避时间，简而言之，随着退避次数的增加，退避时隙会随之减小，如此动态变化的退避时隙不仅可以降低数据碰撞的概率，而且对提高网络的吞吐量具有重要意义。另外，优先级较高的节点由于具有较短的退避时隙，因此可以更快地接入信道进行数据通信，具有实用意义。

下面对具有相同优先级的节点选择同一退避时隙的概率进行理论计算。为使比较结果更清晰，依然假设某时刻各节点的退避指数 BE=2，而且有研究表明，NB 取值越大则网络丢包率越小^[24]，本文设置的退避次数为 4 次，因而这里取 NB=4 进行概率分析，设退避次数相同的概率为 P_{NB} ，则有：

$$P_{NB} = \frac{1}{4} \times \frac{1}{4} \times \frac{1}{4} = \frac{1}{64} \quad (4.4)$$

假设在 BE=2 条件下各节点选择相同退避时隙数的概率为 P_2 ，则有：

$$P_2 = \frac{1}{3} \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{3} = \frac{1}{27} \quad (4.5)$$

则三个节点同时接入信道并发生数据碰撞的概率 P_S 为：

$$P_S = P_{NB} \times P_2 = \frac{1}{1728} \quad (4.6)$$



图 4.3 相同优先级下节点碰撞概率分析

对于优先级不同的节点而言，在与上述前提条件相同的情况下，由于权值的划分间隔较大，低优先级的节点其退避时隙与高优先级节点的退避时隙之间是成整数倍的关系，因此数据发送失败的概率更小。假设优先级相邻的两个节点其选择相同退避时间窗口并发生数据碰撞的概率为 P_a ，即高优先级与中优先级碰撞、中优先级与低优先级碰撞，则有：

$$P_a = P_S \times \frac{1}{2} = \frac{1}{3456} \quad (4.7)$$

设高优先级与低优先级发生数据碰撞的概率为 P_b ，则有：

$$P_b = P_S \times \frac{1}{4} = \frac{1}{6912} \quad (4.8)$$

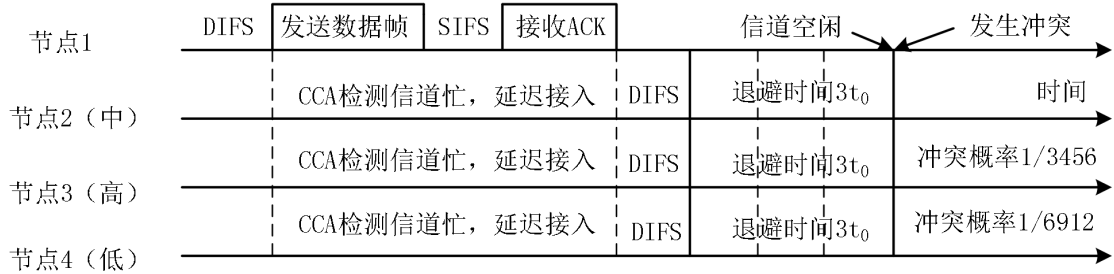


图 4.4 不同优先级下节点碰撞概率分析

综上所述，在与 4.1.2 章节同样的前提条件下，该改进算法中优先级相同的节点其发生数据碰撞的概率为 $1/1728$ ，优先级不同的节点其发生数据碰撞的概率为 $1/3456$ 和 $1/6912$ 。相比于同等条件下传统二进制指数退避算法 $1/27$ 的数据碰撞概率，该改进算法最高可以将节点选择相同退避时隙的概率降低 256 倍，从而大大提高该系统无线网络的通信可靠性。

4.1.3.2 关键参数分析及设置

(1) NB 最大值设置

NB(Number of Backoff)表示在竞争信道时 CSMA/CA 算法已经执行随机退避的次数，每发生一次退避 NB 值加 1，其最大值默认为 4，每次信道竞争开始时 NB 值初始化为 0，可通过设置 MAC 层的 `macMaxCSMABackoffs` 值设置 NB 的最大值，当 NB 值达到最大后若依然检测到信道忙碌，则放弃本次传输，以避免过大的开销。研究表明^[24]，`macMaxCSMABackoffs` 值的设置对网络丢包率和网络时延具有显著影响，该研究将 `macMaxCSMABackoffs` 值设置为 2,3,4,5 并分别进行了仿真，仿真结果如下图 4.5 和图 4.6 所示。

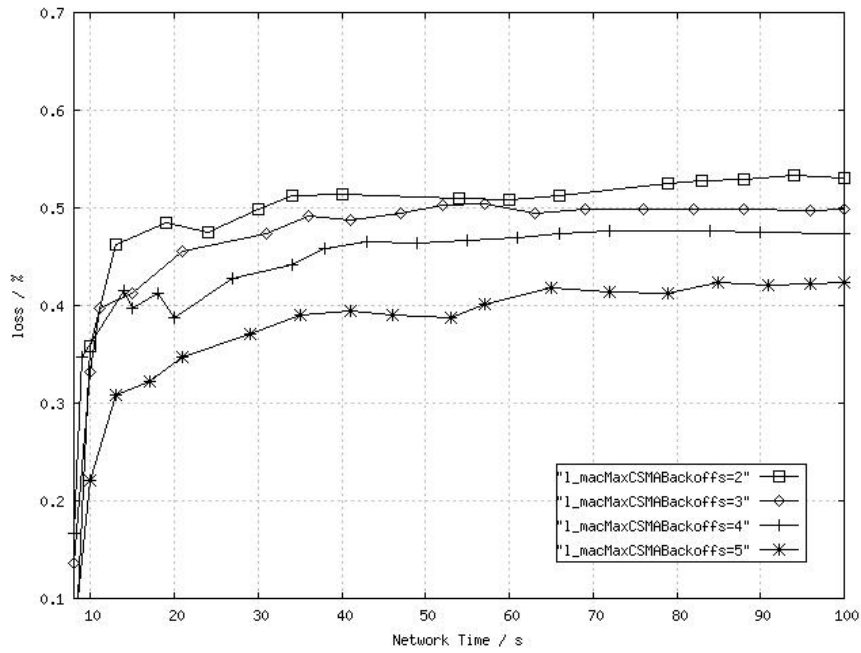


图 4.5 NB 的最大值对网络丢包率的影响

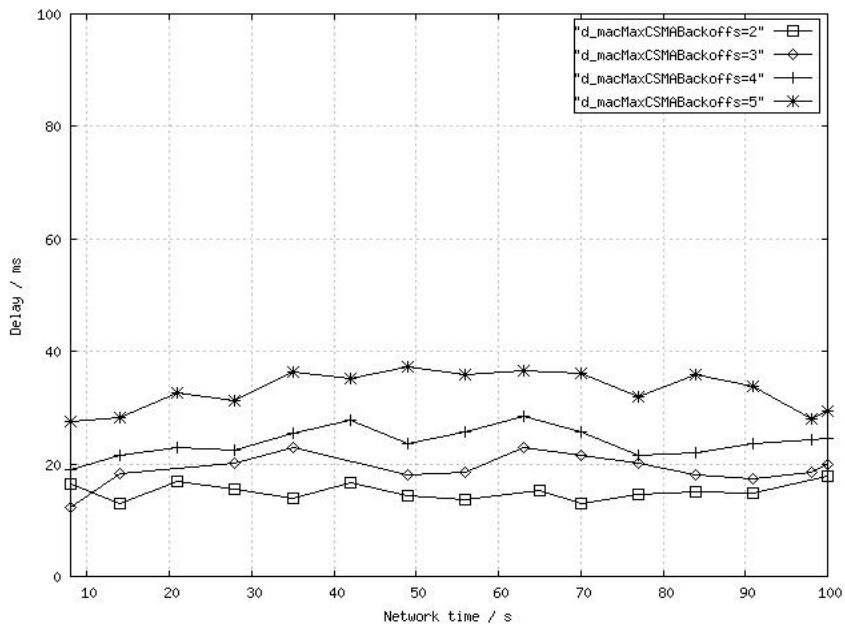


图 4.6 NB 的最大值对网络时延的影响

从上图中可以看出，在其他条件相同的情况下，`macMaxCSMABackoffs` 值设置越大，网络丢包率越小，而网络时延越大。考虑到本系统的实际需求，即对网络丢包率的要求较高，而对通信时延的要求不高，而且 20ms 的延迟优化对本系统没有太大的实用意义，另外，基于马尔科夫链的退避失败概率研究表明^[49]，可通过提高 NB 最大的值来有效降低退避失败的概率，因此本文将 `macMaxCSMABackoffs` 值设置为 5，即最大退避次数为 5 次，从而最大限度地降低网络丢包率。

(2) BE 值设置

BE(Backoff exponent)为退避指数,表示节点竞争信道时随机退避范围的上限值, BE 的默认值为 3, 最大值默认为 5。分析 BE 值时主要考虑两个参数的影响: minBE 和 maxBE。minBE 表示每次尝试接入信道时设置的初始值, maxBE 为最大值, 每发生一次退避 BE 值加 1, 下图 4.7 是 minBE 分别设置为 2,3,4 时对网络丢包率影响的对比图^[24], 从图 4.7 中可以看出, minBE 越大, 则丢包率越小, 这是因为随机退避时隙具有更大的选择范围, 因为多节点同时访问信道时选择相同退避窗口的概率更小。

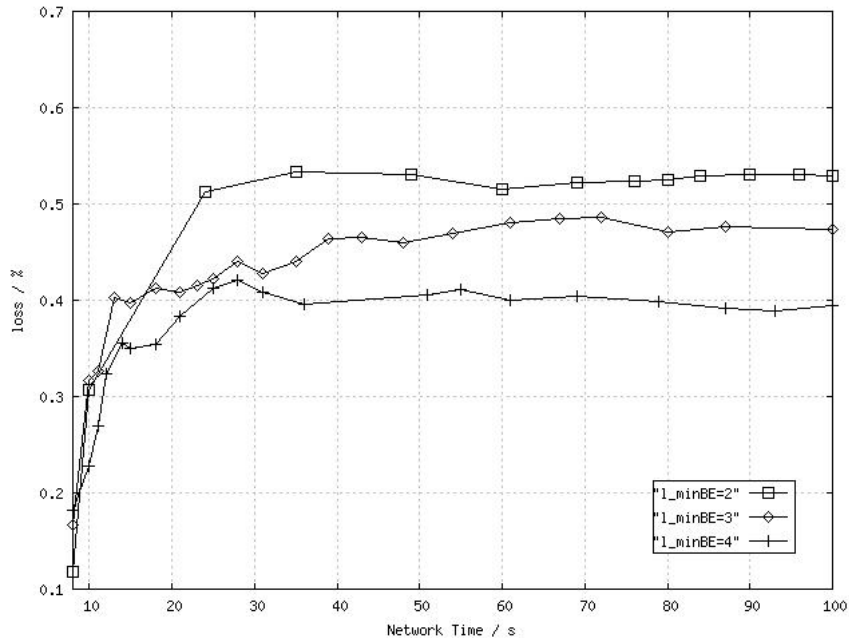


图 4.7 minBE 对网络丢包率的影响

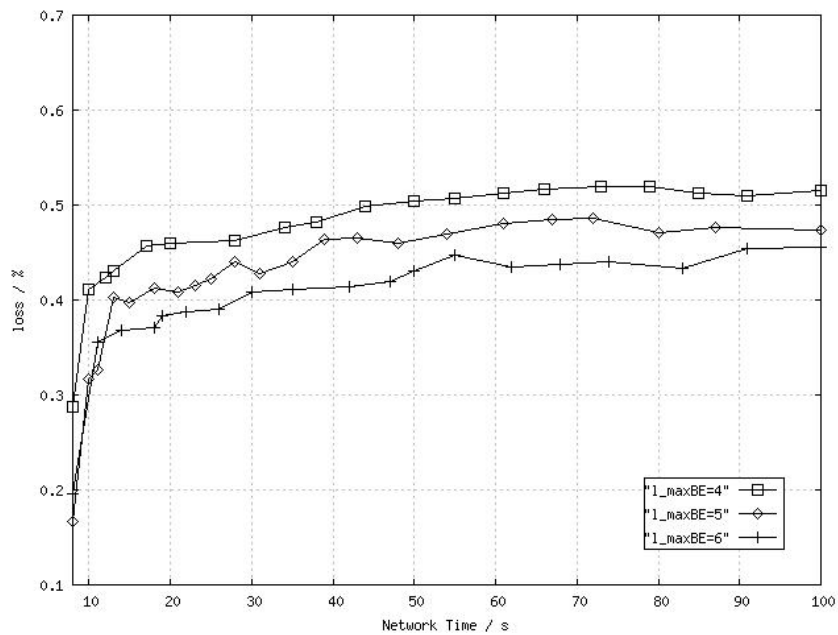


图 4.8 maxBE 对网络丢包率的影响

上图 4.8 是 maxBE 分别设置为 4,5,6 时对网络丢包率影响的对比图^[24],从图 4.8 中可以看出, maxBE 越大,网络丢包率越小,理由同上。综上所述,为了是本系统的无线网络在通信时具有更低的丢包率,因此设置 minBE=4, maxBE=6。

4.1.3.3 算法实现

用户可根据实际应用需求在手机 APP 端对节点的优先级、序号、名称以及安装位置等信息进行自定义设计, APP 上的节点信息编辑界面如下图 4.9 所示:



图 4.9 节点信息编辑界面

另外,统计研究表明^[48],当 WSN 网络中节点设备的数量为 20 的时候,终端节点丢帧的概率不足 0.1,网络延时也低于 20ms,因此本系统中所设计的漏水检测节点数量为 20,不仅能满足家庭环境下的实际需求,还可以提高无线通信网络的性能。

4.2 基于非时隙 CSMA/CA 算法的 LoRa 无线网络防碰撞机制设计

4.2.1 信道检测机制比较与分析

目前较常用的信道检测基于信号强度即 RSSI 值,终端节点通过判断所接收信号的相对强

度是否超过所设定的阈值，来评估当前信道是否空闲^[50]，比如通过将无线收发模块采集到的 RSSI 值与阈值 -60dBm 相比较，来判断当前信道是否空闲，该方式存在的问题有：1.信号强度检测必须在接收模式下进行，在发送模式下的检测结果不准确；2.应用在家庭环境中时，根据室内路径损耗模型可知，无线信号的 RSSI 会产生随机波动，使得检测结果错误。另外对于本系统而言，由于 LoRa 基于扩频调制技术，使得有效信号比接收机的噪声信号强度还低，所以在检测信道是否空闲时不能以 RSSI 值为依据。

相比于上述信道检测方式，基于前导码的检测方式更可靠^[51]，因为终端节点在能正常通信的情况下均可检测到信道中的前导码，而且通过本文所设计的自适应功率调节算法可以保证各节点均能正常通信，所以本文采用 LoRa 特有的前导码检测机制对信道状况进行判断，其原则是以尽可能高的功耗效率检测无线信道上 LoRa 数据包中的前导码，该前导码与信号强度无关，即使发射信号强度低于接收设备的底噪，接收机仍然能够通过前导码将当前信道中的 LoRa 信号检测出来，因此相较于直接检测 RSSI 值的方式，该信道检测机制的可靠性更高。

4.2.2 LoRa 无线网络防碰撞机制设计

4.2.2.1 防碰撞机制设计

本文所设计的无线网络防碰撞机制基于上述改进后的非时隙 CSMA/CA 算法，其设计原理为：节点在进行数据发送前，先对无线信道上 LoRa 数据包的前导码进行检测（CAD 检测），如果检测到了前导码，表明当前信道已被占用，此时该节点会通过随机延迟来避免数据冲突，之后继续对信道进行检测，直到数据发送成功，或者超出最大重试次数为止。本系统中无线网络通信防碰撞机制的流程图所下图 4.10 所示。

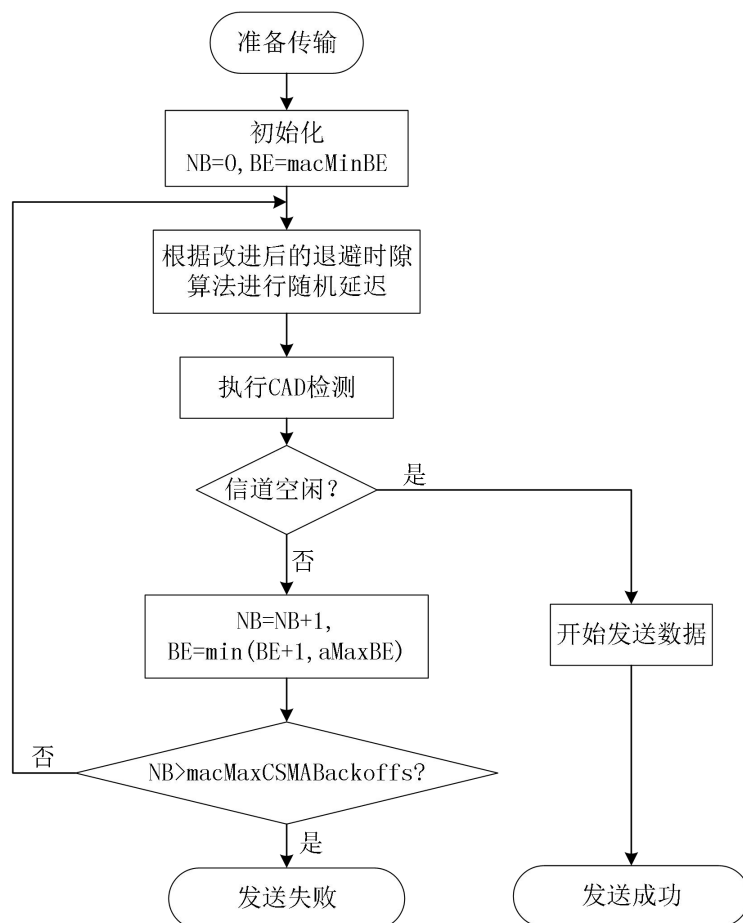


图 4.10 防碰撞机制流程图

4.2.2.2 失败重发机制

当节点数据包丢失或者长时间抢占不到信道时，会造成数据发送失败，失败后待发送数据会被写入缓冲区，经过所设定的时间周期之后会对该数据进行重发，最大重发次数设定为 3 次，每次重发时均会执行图 4.10 所述的防碰撞流程。本系统中失败重发机制的流程图如下图所示 4.11 所示。

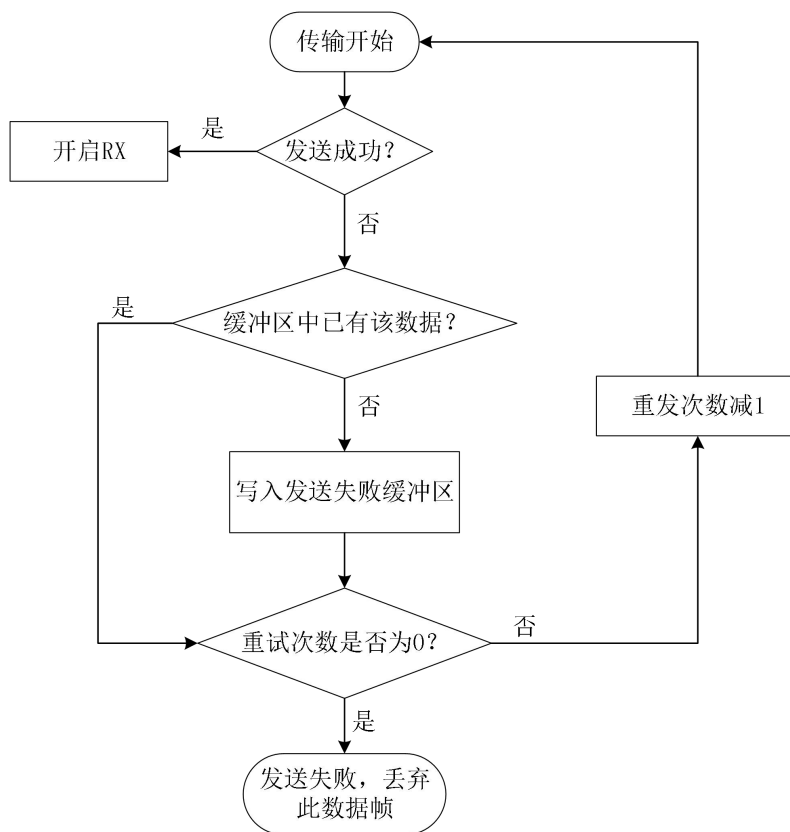


图 4.11 发送失败处理流程

4.2.2.3 ACK 确认机制

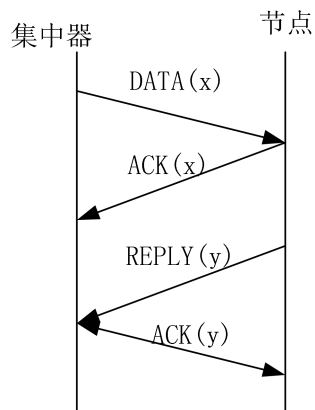


图 4.12 ACK 确认机制

节点在每次成功发送数据之后，会开启一个等待时间窗口，只有在收到回复帧后才认为本次数据发送成功，该窗口的时长根据所发送的数据长度来设计，如果节点在此期间没有收到回复帧，则按照图 4.11 所述的失败重发流程重新发送数据。以集中器网关和节点进行一轮数据交互为例，其通信流程如上图 4.12 所示。

4.3 LoRa 无线网络设计与实现

4.3.1 LoRa 无线网络拓扑结构设计

对于节点数目动辄超过数十个的 WSN 网络而言，选择合适的网络拓扑结构能够充分发挥无线网络的优势，既能拓展其通信距离，还能够保证信号传输的稳定性。基于 LoRa 的星型网络拓扑结构与 mesh 网络拓扑结构的若干网络性能比较如下表 4.2 所示：

表 4.2 star 与 mesh 网络特性比较

性能项	Star 网络拓扑结构	Mesh 网络拓扑结构
时延	小，实时性可控	大，信息最终接收时间不可控
能耗	低，数据收发后立即休眠	高，中继节点随时侦听转发
容量	大，增加网关即增加带宽	适中，节点越多，路由转发所占带宽越多
跳数	单跳，节点仅与网关通信	多跳，需中继节点转发
可靠性	高，可及时发现丢包并重传数据	低，任意一跳失败则本次数据传输失败
复杂度	低，不需要路由转发	高，需处理路由转发
扩展性	强，增加网关即可	弱，需调整网络结构
覆盖盲区	需增加网关，成本较高	增加中继节点即可，成本较低

从上表中可以看出，在基于 LoRa 的通信网络中，与 mesh 结构相比，星型网络具有通信距离远、功耗低、拓展性强、可靠性高、成本低以及易于实现等优点，结合本系统的实际应用场景：漏水检测节点安装位置固定，节点与节点之间无需通信，均只与集中器网关之间进行数据传输，且该系统对节点的低功耗设计要求较高。综合上述因素，本系统选用星型网络结构，拓扑结构如图 4.13 所示，无线网络以集中器网关为中心，包含 20 个节点。

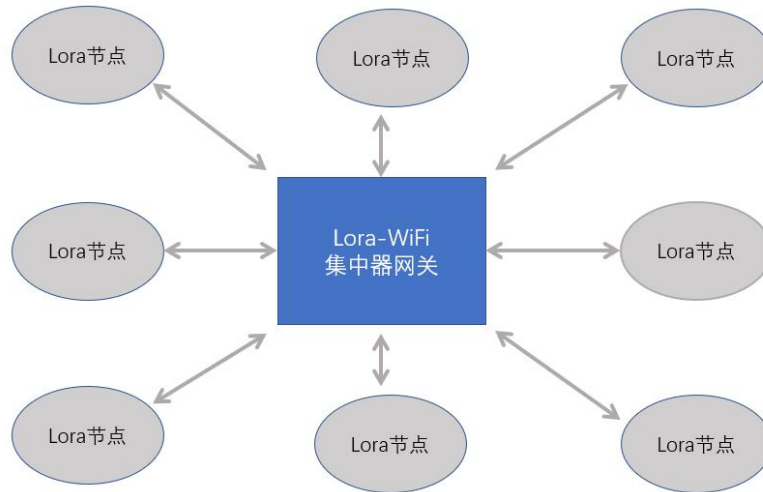


图 4.13 星型网络拓扑结构

4.3.2 通信协议设计

在设计无线通信网络时，对通信协议的选择非常重要，目前在基于 WSN 网络的智能家居中常用的无线通信协议有 WiFi、蓝牙、ZigBee 以及 LoRaWAN，前三者的室内有效通信距离都仅有数十米，而且基于 WiFi 和蓝牙通信方式的网络中可挂载的节点数较少^[52]；LoRaWAN 通信协议基于 LoRa 扩频调制，具有抗同频干扰能力强、接受灵敏度高、通信距离远以及网络容量大优势，但是因为它在 MAC 层采用的是异步 ALOHA 协议，所以信道利用率较低，研究表明^[23]，在纯 ALOHA 协议中，其信道利用率最大仅有 18.4%，而且数据在传输过程中极容易因为碰撞而导致重发，数据包的冲突重传不仅会影响网络通信的可靠性，还会产生额外的功耗。

基于上述考虑，并结合该智能家庭漏水检测系统对低功耗、高抗干扰能力以及易于开发等方面的实际需求，本文自主设计了一种通信协议，该自定义协议命名为 SWSN 协议，由于该协议与 LoRaWAN 协议在物理层上的设计基本相同，因而继承了 LoRa 扩频调制的诸多优势，比如网络覆盖范围广、抗干扰能力强、网络容量大等，而在物理层及物理层以上的协议中采用了截然不同的设计，以此来弥补 LoRaWAN 中存在的网络碰撞等缺陷，从而保证通信网络具有良好的响应实时性和容错率，使该系统的通信可靠性更高。

本文所设计的 SWSN 网络协议基于 OSI 七层模型，只对其中的物理层、MAC 层、网络层和应用层的功能进行了定义。该网络协议的架构如下图 4.14 所示。

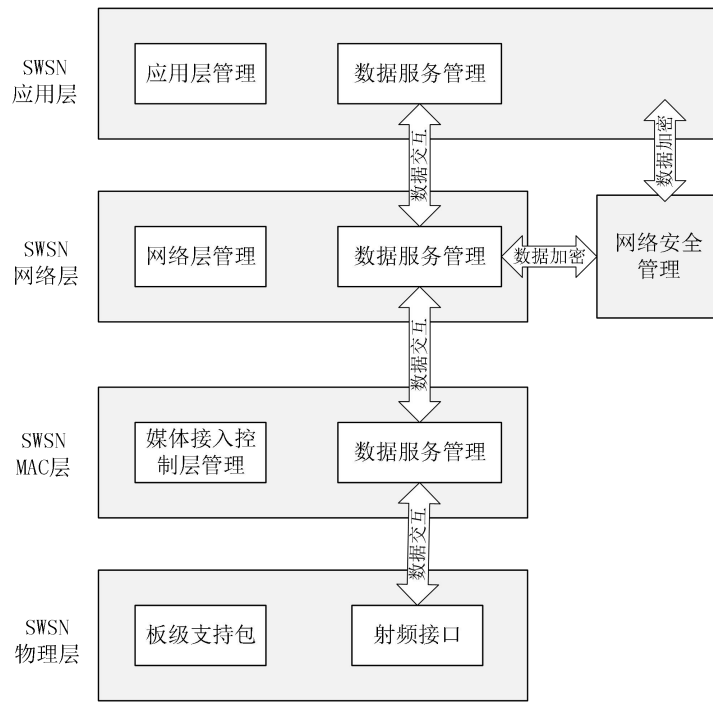


图 4.14 SWSN 网络协议架构

在上述架构中，物理层是最基础的部分，由两部分组成：板级支持包以及射频接口，板级支持包中包括时钟、外设接口、定时器等外设的配置和初始化以及中断处理，为不同的硬件平台提供不同的硬件驱动；射频接口负责管理物理 RF 收发器以及消息帧的读取，并执行信道选择以及能量和信号管理功能。

MAC 层主要用于分配数据传输所需要的信道资源，协调各个设备的通信，防止数据发生碰撞，并且负责对射频各个部分状态进行调度，在优化设备功耗方面起主要作用。

网络层主要是为了确保正确的操作 MAC 层和为应用层提供服务接口，进行网络管理、数据服务管理和网络安全管理。

应用层包括应用层管理和数据服务管理，主要负责用户信息的处理，包括用户对网络参数的修改、数据的采集、网络设备的管理等^[22]。

下图 4.15 是本文设计的 LoRa 无线网络所使用的内部数据通信格式：

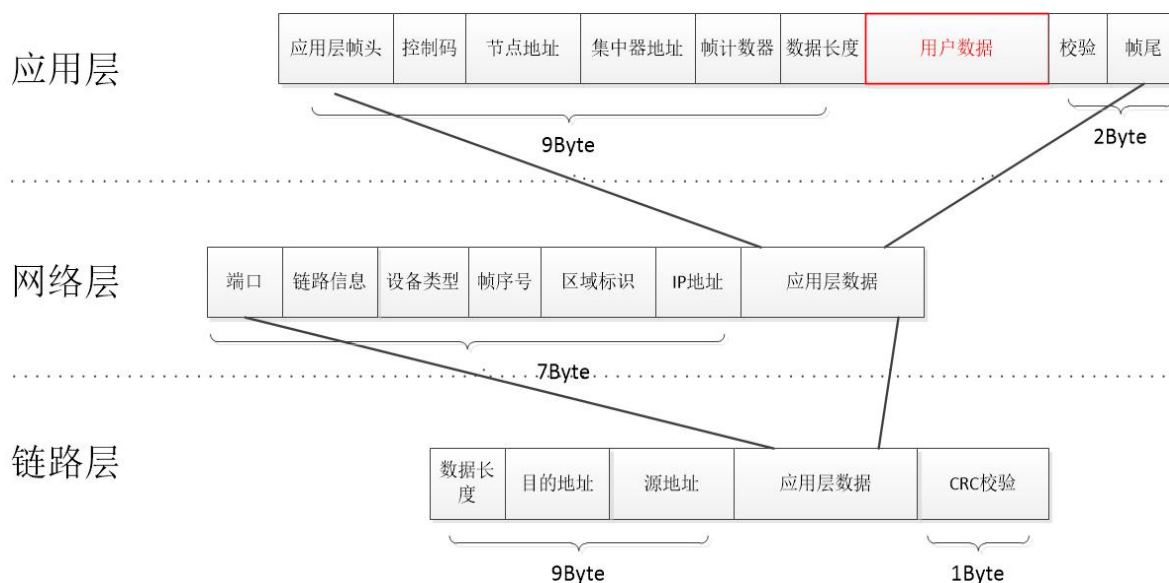


图 4.15 LoRa 组网内部数据帧格式

4.4 无线网络性能测试

4.4.1 通信距离测试

本测试旨在对该系统中节点与集中器网关的可靠通信范围进行评估，测试环境在室内，测试环境如下图 4.16 和图 4.17 所示：



图 4.16 测试环境平面图



图 4.17 实际测试环境

节点的射频参数：发射功率配置为最大值 20dBm、扩频因子 SF=7、带宽 BW=125KHz、编码率 CR=4/5、数据速率 DR=5.47kbps。

测试方案：将集中器网关放置在 258 房间内，通过移动节点测试丢包率。

丢包率测试方法：将节点连接到 PC 机上，在移动的同时，通过 PC 机上专用的 LoRa 网络测试软件给节点发送命令进行相应的测试，集中器网关在收到节点发送的数据后会回复 ACK 进行确认，节点根据集中器网关回复的 ACK 进行丢包判断，该测试软件通过统计节点发送和接收到的字节数，对丢包率进行计算，软件界面如下图 4.18 所示：

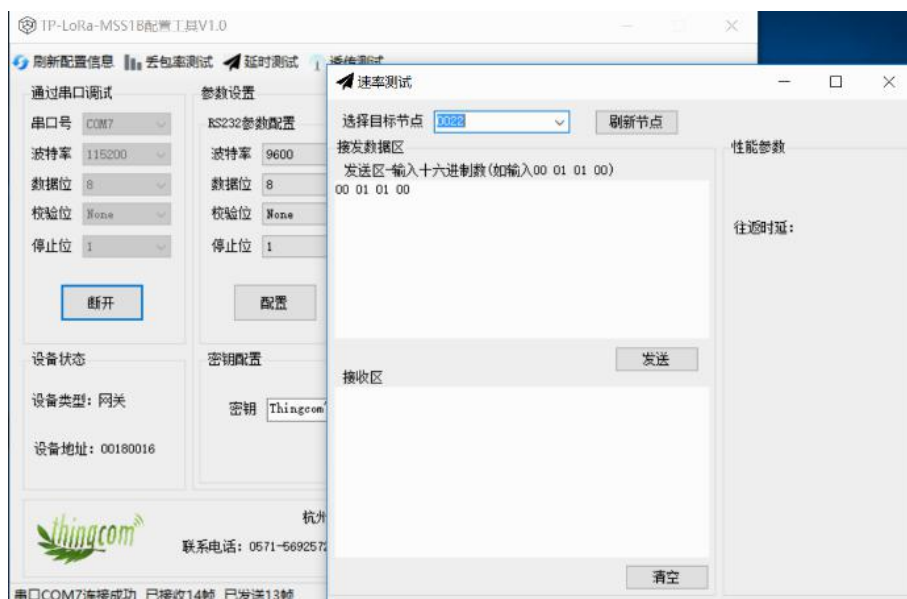


图 4.18 测试软件界面

测试过程中，节点每次向集中器网关发送 100 个数据包，不同通信距离下的网络丢包情况统计如下表 4.3 所示：

表 4.3 不同距离下的丢包率测试统计

节点位置	与集中器的直线距离 (m)	发送/接收数据包个数	丢包率 (%)
248 房间门口	28	100/100	0
214 房间门口	46	100/100	0
204 房间门口	80	100/100	0
234 房间门口	93	100/65	35
358 房间	垂直 3.5	100/100	0
458 房间	垂直 7	100/100	0
558 房间	垂直 10.5	100/22	78

从上表可以看出，在节点发射功率配置为 20dBm 的条件下，当节点与集中器网关在同一楼层进行数据传输时，其可靠通信距离最大约为 80 米；而当节点与集中器网关在不同的楼层

进行通信时，其信号可靠的穿透范围为两层楼。上述通信范围可以满足绝大部分家庭的漏水检测需求。

4.4.2 多节点通信测试

本测试旨在对无线网络的可靠性进行验证，对系统中所设计的防碰撞机制以及失败重发机制等进行评估，测试环境及节点配置同上。

测试方案：使多个节点同时向集中器网关发送数据，在不同的通信距离下测试各节点的丢包率。测试结果如下表 4.4 所示：

表 4.4 多节点通信测试结果

节点个数	与集中器网关的距 离 (m)	平均发送/接收数据 包个数	丢包率 (%)
10	28	100/100	0
10	46	100/100	0
10	80	100/100	0
15	28	100/100	0
15	46	100/100	0
15	80	100/100	0
20	28	100/100	0
20	46	100/100	0
20	80	100/100	0

从上表可以看出，在可靠的通信距离范围内，当多个节点同时与集中器网关进行数据通信时，均没有发生丢包情况。测试结果表明，本系统所设计的无线网络具有高可靠性，对漏水情况能做出及时准确的反应。

4.5 本章小结

本章节首先对非时隙 CSMA/CA 算法的原理及工作流程做了介绍，指出原算法中存在的不足，然后结合本系统的实际应用场景，提出了基于退避时隙优化的非时隙 CSMA/CA 改进算法，对采用原算法和改进算法时发生数据碰撞的概率进行了分析和比较，并对关键参数的设置以及算法的实现进行了介绍，在此基础上对系统的无线网络防碰撞机制进行了设计。然后对该系统的网络框架设计进行了分析，对比了星型网络拓扑结构和 mesh 拓扑结构，并对常用的无线通信协议做了对比及分析，基于此提出了本文所自主设计的基于 LoRa 调制的 SWSN 协议，并对该协议的设计与实现作了详细的阐述，最后对无线网络的通信距离及性能进行了

测试，测试结果表明，节点与集中器网关在同一楼层进行数据传输时的可靠通信距离最大约为 80 米，其信号可靠的穿透范围为两层楼，该通信范围可以满足绝大部分家庭的漏水检测需求，另外在可靠的通信范围内当多个节点同时与集中器网关进行数据通信时，均没有发生丢包情况，表明本系统所设计的无线网络具有高可靠性。

第五章 总结与展望

5.1 总结

近年来,无线通信技术得到了飞速的发展,物联网行业日趋成熟,其部署范围及应用领域日渐扩张。随着2020年的到来,物联网技术将迈入全面的智能化阶段,随之带来的不仅仅是各传统行业的数字化升级改造,还有人们生活方式的巨大变革,物联网技术在智能家居中的广泛应用不仅可以提高人们生活的安全性、舒适度以及便利性,对实现节能环保和可持续发展也具有重要意义。在人们的日常生活中,家庭供水管道常常会发生漏水,不仅会造成财产损失,还可能引发诸如触电、火灾等严重的安全事故,而传统的漏水检测系统由于各自的局限性,均不适用于家庭管道的漏水检测,本文所设计基于LoRa无线组网技术的漏水检测系统正是基于此背景进行研究的,本文所做的工作主要包括:

- 1.分析了各常用的漏水检测技术在应用于家庭漏水检测时所存在的弊端,存在着成本高、复杂度大、通信覆盖范围小、抗干扰能力差等不足,因而均无法在智能家居中推广,然后结合无线网络通信技术的发展现状,提出基于LoRa无线组网技术的家庭漏水检测方案,并对系统各部分的具体设计与实现进行了详细的阐述。本系统将LoRa的优势诸如通信距离远、网络容量大、成本低、功耗低以及抗干扰能力强等应用在家庭漏水检测中,从而解决传统检测方案的不足。

- 2.根据目前的功率控制技术、室内路径损耗模型以及RSSI高斯滤波等相关技术的研究现状,并结合本系统的实际应用场景及需求,对传统的自适应功率调节算法进行了改进,引入RSSI均值滤波来提高节点功率调节的效率。该算法通过使距离集中器网关不同的漏水检测节点自动配置更合理的发射功率,从而延长节点的工作寿命,降低系统的总功耗。

- 3.基于非时隙CSMA/CA算法对LoRa无线网络进行了设计,并在原有非时隙CSMA/CA算法的基础上,对二进制指数退避算法进行了优化,使得退避时隙具有一定的自适应性,可有效降低多个节点同时访问信道时选择相同退避时间窗口的概率,并对退避时隙进行了优先级加权设计,使得优先级高的节点其数据发送失败的概率更低。另外,对当前常用的通信协议进行了比较及分析,并结合该系统的实际应用设计了一种基于LoRa调制的SWSN通信协议,该协议在具有通信距离远、抗干扰能力强等优势的同时,能弥补LoRaWAN中存在的网络碰撞等缺陷,从而保证通信网络具有良好的响应实时性和容错率,可靠性更高。

- 4.对该系统中的漏水检测节点功耗、自适应功率调节算法、无线网络的通信可靠性以及系统基本功能等依次进行了测试和分析。

5.2 展望

本文所设计的基于LoRa无线组网技术的智能家庭漏水检测系统具有诸如覆盖范围广、网络容量大、成本低、功耗低以及抗干扰能力强等优势，可充分满足当前的家庭漏水检测需求。然而由于项目开发周期较短以及个人经验的不足，本系统仍然有很大的改进空间，总结如下：

1. 随着基于声波检测的漏水检测技术的日益成熟，其在抗干扰能力、复杂度、可靠性以及成本等方面将越来越具有竞争力，如果将这项检测技术融合到该系统的漏水检测节点中，将会大大提高节点检测漏水的可靠性以及灵敏度，结合LoRa无线组网技术的远距离、低功耗以及大容量、易拓展等优势，该系统不仅可以应用于智能家居领域，还可用于城市供水管道的漏水检测，为智慧城市的发展添砖加瓦。

2. 考虑到用户在使用该系统时会出现手机通信质量差、数据收发失败等情况，尤其是在郊区或者人流量较大的场所，导致无法正确接收来自云平台的漏水报警信号，因此可以在该智能漏水检测系统的集中器网关上加入4G模块作为漏水报警的辅助，当系统发出报警时可以通过发送短信告知用户，该方式可大大提高系统的可靠性。

致 谢

在此春暖花开、笼罩中国大地数月的疫情阴霾逐渐消散之际，我的研究生生涯也接近了尾声，过去的三年成长经历是我人生中最珍贵的财富，感谢给予我帮助的每一个人。

首先，感谢我的导师陈科明副教授，老师严谨的教学态度、渊博的学识积累及勤勉的工作精神都让我敬佩不已。在三年的学生生涯中，我对陈老师严厉的教导铭记于心，也感动于老师对我们亲力亲为的指导和鼓励。在今后的学习、工作和生活中，我定当牢记老师的教诲，督促自己不断进步，在此谨向我最敬爱的陈老师表达我最诚挚的敬意和衷心的感谢。

感谢我的同门虞盛峥、周雪梅、张河东和乔冠，他们在学习、工作和思想上都给予了我莫大的帮助和鼓励，也感谢我的师弟师妹们在学校为我提供的一切帮助，能够和他们一起学习和成长使我感到非常荣幸。

感谢我的父母及家人，他们是我求学之路上的坚强后盾，在我面临人生选择的迷茫之际为我排忧解难，使我能够顺利完成学业。

最后，我要向在百忙之中抽时间对本文进行评阅、评议和参与本人论文答辩的各位老师表示衷心的感谢！

参考文献

- [1] Amardeo C, Sarma, J G. Identities in the Future Internet of Things[J]. Wireless Personal Communications,2009,49(3):353-363.
- [2] Gustavo R G, Mario M O, Carlos D K. Early infrastructure of an Internet of Things in Spaces for Learning[C]. Eighth IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies,2008:381-383.
- [3] 王保云.物联网技术研究综述[J].电子测量与仪器学报,2009,23(12):1-4.
- [4] 苏美文.物联网产业发展的理论分析与对策研究[D].长春:吉林大学,2015:3-8.
- [5] 王怡,鄂旭.基于物联网无线传感的智能家居研究[J].计算机技术与发展,2015,25(2):234-236.
- [6] 袁志彬.我国城市供水管网漏失率状况及其管理措施[J].城市管理与技术,2004,6(2):82-84.
- [7] 方超.基于 DSP 的家庭漏水检测系统设计[J].电子科技,2019,12(4):10-11.
- [8] 孙凯杰,罗飞,许玉格,黄晓红.基于 DSP 和 MCU 的管道漏水检测和定位系统研究[J].计算技术与自动化,2014,33(1):29-31.
- [9] 吴鹏程.基于 MCU 的智能漏水检测系统设计[J].现代电子技术,2010,33(14):155-156.
- [10] 王雅君,胡宇祥,张仕镜.基于物联网的智能家居防漏水系统[J].科技与创新,2016(21):86-90.
- [11] 袁厚明.地下管线检测技术[M].北京:中国石化出版社,2006:151-170.
- [12] KYUNG, BO YUNG. Water Leakage Detecting System Using Two Sound Change Comparison[P].外国专利:KR20090025045, 2009-03-10.
- [13] 龚政.基于 ZigBee 的漏水定位监测系统[D].呼和浩特:内蒙古大学,2019:9-16.
- [14] 张维勇,冯琳,魏振春.ZigBee 实现家庭组网技术的研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2005,28(7):755-759.
- [15] 冯剑锋.基于 ARM 与 ZigBee 技术的智能家居系统设计[D].长春:吉林大学,2014:14-25.
- [16] 余波.无线传感器网络技术在漏水检测系统中的应用[D].昆明:云南大学,2010:13—24.
- [17] 刘云浩.物联网导论[M].北京:科学出版社,2010:12-4.
- [18] 李金瑶.LoRa 物联网技术及应用[J].电子技术与软件工程,2019(19):5-6.
- [19] 赵静,苏光添.LoRa 无线网络技术分析[J].移动通信,2016,40(21):50-57.
- [20] 李泽宇.基于 LoRa 的智能节水灌溉系统[D].呼和浩特:内蒙古大学,2019:2-18.
- [21] Sanchez-Iborra Ramon, Sanchez-Gomez Jesus, Ballesta-Viñas Juan, Cano Maria-Dolores, Skarmeta Antonio F. Performance Evaluation of LoRa Considering Scenario Conditions [J]. Sensors (Basel, Switzerland),2018,18(3):324-329.

- [22] 徐俊祎.高频次低时延动态数据采集技术研究[D].杭州:杭州电子科技大学,2018:12-18.
- [23] SCHOUTE F C. Dynamic frame length ALOHA[J]. IEEE Transactions on Communications,1983,31(4):565-568.
- [24] 黎帮毅.基于时隙 CSMA_CA 算法的 ZigBee 信道接入机制的研究[D].长春:吉林大学,2013:4-48.
- [25] 刘新营.IEEE802.11 标准的信道估计与检测技术研究[D].成都:西南交通大学,2014:23-46.
- [26] 金峥.第三代移动通信系统功率控制技术研究[D].西安:西北工业大学,2003:8-12.
- [27] 张文伟.基于 LoRa 技术的低功耗无线抄表数据传输节点的设计与实现[D].南京:东南大学,2017:11-15.
- [28] Margi, C.B., de Oliveira, B.T., et al. Impact of Operating Systems on Wireless Sensor Networks (Security) Applications and Testbeds[C]. Computer Communications and Networks (ICCCN), 2010 Proceedings of 19th International Conference on,2010:1-6.
- [29] 万小博,谭国平,马赛赛.一种有效降低冲突概率的 CSMA/CA 退避算法[J].电子设计工程,2014,22(05):89-91.
- [30] Reijers N, Halkes G, et al. Link Layer Measurements in Sensor Networks[C].Mobile Ad-hoc and Sensor Systems,2004 IEEE International Conference on,2004:224-234.
- [31] 谭中华.无线传感器网络 AOA 定位算法与三维移动路径规划方法研究[D].温州:温州大学,2016:10-17.
- [32] Du J Z, Diouris J F, Wang Y D. A RSSI-based parameter tracking strategy for constrained position localization[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing,2017,2017(1):168-172.
- [33] Molisch A F, Balakrishnan K, Cassioli D, et al. IEEE 802.15.4a channel model-final report[J]. Converging Technology Work & Learning Australian Government Printing Service,2004,15(12):911-913.
- [34] Chen Y, Liu Z, Ding Y, et al. On sampling signal strength for localization using a directional antenna [J]. IEEE International Symposium on A World of Wireless Mobile & Multimedia Networks,2011:1-6.
- [35] Minghui Z, Huiqing Z. Research on Model of Indoor Distance Measurement Based on Receiving Signal Strength[C]. Computer Designed Applications(ICCDA), 2010 International Conference on. IEEE, 2010(5):54-58.
- [36] Hightower J, Want R, Borriello G. Spot ON: An Indoor 3D Location Sensing Technology Based on RF Signal Strength[D]. University of Washington, Department of Computer Science and Engineering, Seattle, WA, 2000:12-34.
- [37] 倪晓军,高雁,李凌锋.基于 RSSI 的混合滤波算法[J].计算机科学,2019,46(8):133-137.

- [38] 詹杰.无线传感器网络 RSSI 测距方法与精度分析[J].电讯技术,2010,50(4):83-86.
- [39] Jin Rencheng, Peng Bo, Meng Lisao, et al. Research on localization method based on RSSI ranging-error compensation[C]. 5th International Conference on Wireless Communications, Networkong and Mobile Computing, 2009:1-3.
- [40] Zhao Jijun, Li Hua, Sun Xiang, Research on the signal random attenuation coefficient based on RSSI in WSN localization technology[C]. 5th International Conference on Wireless Communications, Networkong and Mobile Computing, 2009:1-4.
- [41] 张宝山,童紫原,唐守锋,童敏明,徐朝亮.基于 RSSI 的室内定位技术综述[J].计算机时代,2018(07):1-4.
- [42] 沈军,黄春华,罗护,郭积宁.基于 RSSI 优化的模型参数实时估计定位算法[J].计算机工程与设计,2012,33(02):464-467.
- [43] 唐周益丹,姜宁康.基于 LoRa 的长距离室内定位的研究[J].计算机应用与软件,2018,35(04):148-154.
- [44] 方震,赵湛,郭鹏,张玉国.基于 RSSI 测距分析[J].传感技术学报,2007,20(11):2526-2530.
- [45] 郑浩.LoRa 技术在低功耗广域网络中的实现和应用[J].信息通信技术,2017,11(01):19-26.
- [46] 雷婧.基于 LoRaWAN 的无线抄表方法的研究与改进[D].兰州:兰州大学,2019:36—45.
- [47] 苏建欢.延长碱性干电池使用寿命的实验研究[J].广西轻工业,2008(11):24-25.
- [48] 黄仁,郅辉,任军华.非时隙 CSMA/CA 性能分析与研究[J].计算机工程与应用,2009,45(07):108-110.
- [49] 姜绍君,王颖.CSMA/CA 算法的退避失败概率的分析[J].计算机应用与软件,2015,32(10):135-137.
- [50] 韩彦博.衰落信道下的能量检测算法性能研究[D].兰州:兰州交通大学,2018:23-45.
- [51] 陈浪.基于 LoRa 的供电桩数据采集系统的设计[D].杭州:浙江工业大学,2017:39-43.
- [52] 刘青林,艾红.基于 ZigBee 的无线传感器网络监测系统的设计[J].北京信息科技大学学报,2014,29(03):59-63.

附录

作者在读研期间发表的学术论文及参加的科研项目

参加的科研项目：

- [1] 久诚智能家庭漏水检测系统研发，横向课题
- [2] 洁利达智能地暖控制系统研发，横向课题

授权的专利：

- [1] 薛佳帆，陈科明，蔡孟君．实时漏水检测的无线智能水阀装置[P]．中国专利，授权公告号：CN107702866B，2019-09-06．

发表的论文：

- [1] 薛佳帆，戴良，陈霖凯，吕伟锋．金属栅功函数变异对纳米MOSFET模拟/射频性能影响的统计分析[J]．计算机辅助设计与图形学学报（EI），2018，30(11)：2159-2163．