

陈丽,夏兴隆,卜树坡,等. 基于 LoRa 的低功耗水产养殖监测系统设计[J]. 江苏农业科学,2021,49(3):176-182.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.03.031

基于 LoRa 的低功耗水产养殖监测系统设计

陈丽¹,夏兴隆²,卜树坡¹,赵展¹,程磊¹,王莉莉³

(1. 苏州工业职业技术学院电子与通信工程系,江苏苏州 215000; 2. 苏州易泰勒电子科技有限公司,江苏苏州 215123;
3. 东南大学电子科学与工程学院,江苏南京 210096)

摘要:水产养殖环境的实时监测,可以提升水产养殖效率、实现科学养殖。考虑到户外监测节点多、分布距离远、供电不方便等特点,从低功耗电路设计、低功耗器件选择、低功耗算法等方面进行优化设计,使整个系统在电池供电条件下,满足长时间户外使用需求。同时,对一种低功耗广域网(LoRa)无线通信距离进行优化设计,满足大面积养殖场地的应用需求。采用受限应用协议(CoAP)、轻量级的机器到机器(LWM2M)协议将信号上传至 OneNET 平台。经过测试,该系统休眠功耗为 3 μA ,工作时的平均功耗为 22.68 μA ,无线传输距离半径不低于 364 m。

关键词:LoRa 技术;低功耗;远距离无线通信;水产养殖;云平台;CoAP

中图分类号:TN92;S126 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2021)03-0176-06

我国水环境污染严重,渔业水域环境质量不容乐观,水产养殖环境直接影响水产养殖成效,实时监测水产养殖生态环境可为科学水产养殖提供依据。与传统人工采集相比,传感器网络的搭建对于推进水产养殖智能化、科学化起到了积极作用。目前,已有不少研究者针对各类水环境参数设计了监测系统。部分采用基于 Modbus 协议的 485 通信方式,这种模式采用有线通信的方式,更适合在实验室环境下对水质进行分析^[1]。考虑到水产养殖场地在户外,存在范围广、不易布线、供电困难等特点,这种场景下更合适使用无线监测系统。姚达雯等采用紫蜂(ZigBee)技术与通用分组无线服务技术(GPRS)相结合的方式设计了适用于户外的水质监测系统,使用 ZigBee 进行节点信息采集、汇总,在汇聚节点处采用 GPRS 将数据上传,实现了多点低功耗实时远程监控^[2]。孙卓在这一方式的基础上,提出自适应高速数据采样与传输、网络拓扑优化的具体方法,提高了数据传输的速度^[3]。这种模式虽然可以满足一定场景下水质参数的监测,但是 GPRS 存在模块启动电流大的问题,将直接影响整个系统的功耗,而资费问题也将影响这一系统的推广。随

着通信技术的发展,窄带物联网(NB-IoT)技术不断成熟,资费、功耗等物联网应用最关注的问题也得到了改进。蔡向科等提出了一种基于 NB-IoT 和 ZigBee 的低功耗水产养殖水质监测系统,这一系统在功耗、节点生存周期等性能方面得到了显著的提升^[4]。在该系统中,主要通过设计采集周期自适应调节算法和发射功率自适应调节算法来降低节点功耗,但是采用该方法会造成一定的丢包率。另外,ZigBee 最常用的频段是 2.4 GHz^[5],传输距离短,不带低噪声放大器(LNA)和功率放大器(PA)的 ZigBee 模块在室外开阔场地,传输距离小于 110 m。增加 LNA 和 PA,可以增加传输距离,但是会明显增加功耗。对于诸如苏州市阳澄湖这类大面积养殖场地,需要设置很多传感器节点进行自组网来解决这一问题,大大增加了成本,显然不能满足应用需求。因此,探索一种低功耗、远距离、高可靠的无线通信方式,对于提升水产养殖环境监测水平有着至关重要的作用。

与无线保真技术(WiFi)、ZigBee 等基于 2.4 GHz 免执照频段的通信技术相比,基于频率较低的 Sub-GHz(频率低于 1 GHz)以下的频段开发组网技术,具有通信距离远,绕射能力强等特点,更适合大面积场景的信息传输。虽然这类技术频率低,存在传输速度慢的问题,但是在养殖环境监测过程中,传感器信息数据量较小,完全能满足该场景的应用需求。在众多基于 Sub-GHz 频段开发的通信技术中,长距离(LoRa)技术具有通信距离远、

收稿日期:2020-04-22

基金项目:国家自然科学基金(编号:61505028);苏州农业技术应用基础研究项目(编号:SG2018037)。

作者简介:陈丽(1983—),女,江苏常州人,博士,讲师,主要从事物联网技术、显示技术、视觉感知相关研究。E-mail:00775@siit.edu.cn。

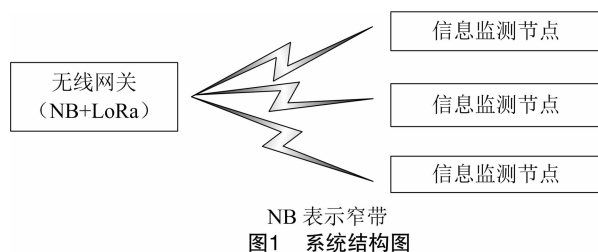
运行可靠、低功耗、低成本等特点,在郊区最大传输距离可达 15 km,在小数据量传输的应用场景中具有明显的优势^[6-8]。LoRa 技术在 LoRa 联盟的大力推广下,已有通用的通信协议,逐渐成为物联网应用的重要支撑技术。与 LoRa 相比,NB-IoT 也是最具潜力的无线通信技术,目前运营商们都在大力推广这一技术,由于 NB-IoT 技术基站数量多,且能直接将数据通过云平台中转,能很方便地实现远程监控,LoRa 不具备这一优势^[8],但是采用这种技术,需要支付额外的费用,当节点数量较多时,成本较高。

结合 LoRa 和 NB-IoT 的优势,本研究设计出一种适用于大面积水产养殖的环境监测系统,并从低功耗器件选型、能量回收、优化通信方案 3 个角度对系统进行低功耗设计,满足户外场景的应用需求。

1 系统总体设计

本系统主要包括水环境信息监测节点、基站、云平台,整体架构如图 1 所示。其中,信息监测节点包括水环境信息采集、信息传输功能。考虑到 LoRa 技术通信距离及低功耗的需求,本研究主要采用星

型网络架构,这种架构不需要复杂的路由协议,更利于实现低功耗。每个信息监测节点通过溶氧传感器、pH 值传感器等采集养殖区域的水环境信息,通过 LoRa 模块将信息发送至基站。基站通过 LoRa 模块接收各节点发来的数据,基站搭载 NB(窄带)模块,将收集的监测信息上传至云平台,使用者可以通过云平台进行远程实施监控。



2 低功耗节点硬件设计

信息监测节点可以实现信息采集、无线通信。系统由 STM8 型单片机、LoRa 通信模块、传感器模块、电源模块等组成。其中,水质传感器又包括 pH 值传感器、溶氧传感器。其硬件系统结构如图 2 所示。

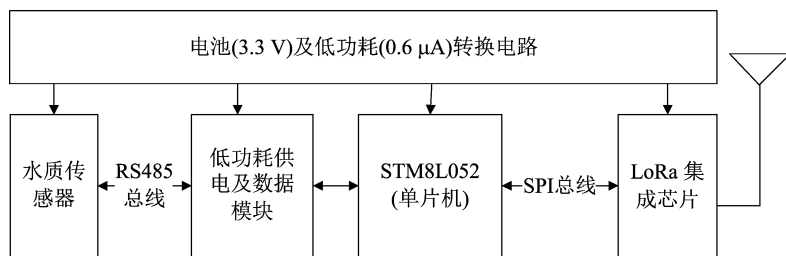


图2 信息监测节点结构

整个系统的核心器件为单片机,相比无线基站处理的大信息量数据,单个节点任务的处理难度较低、数据量较小,对单片机的要求并不高,因此选择了性价比高、稳定可靠的 STM8 系列单片机。单片机通过 RS485 串行接口与传感器模块进行通信,同时增加低功耗供电及数据模块,当休眠时,用于切断工作电源以降低功耗。通信模块与单片机连接,可进行双向通信。通信模块选择支持 LoRa 的 SX1278 模块,该模块可实现远距离无线通信,且抗干扰能力强,该模块通过串行外设接口(SPI)总线与单片机进行通信。整个节点系统中,不同模块的工作电压不同,大部分均在 3.3 V 下工作,各类水质传感器在 12 V 下工作,需要进行升压处理。

与基站相比,本研究的低功耗硬件系统节点的

数量多,位置分散,且无法实现外部供电,对低功耗要求更高。本研究中,低功耗节点的硬件设计主要从以下几方面实现。

2.1 超低功耗电子器件应用

为了满足超低功耗的节点需求,对于节点中最核心的单片机模块、电源转换模块、无线通信模块均选取低功耗电子器件。

单片机模块选取意法半导体(ST)公司的 STM8L052 型超低功耗单片机,该单片机待机功耗小于 $0.8 \mu\text{A}$,非常适合超低功耗的节点组网控制。

电源转换芯片采用超低功耗升压直流转换芯片 SGM66099,该芯片能够把 1.1 ~ 3.3 V 的输入电压转换为 3.3 V 的恒定输出电压,并且工作功耗仅为 $0.6 \mu\text{A}$,是一种超低功耗的升压电池管理芯片。

无线通信 LoRa 通信模块采用高度集成化封装芯片 S78F, 该芯片将 Semtech 公司的 1 278 芯片、匹配网络、LNA 低噪放芯片、晶振集成在一块芯片内, 与传统的无线模块搭配周边电路的模式相比, 大大降低了 LoRa 模块的工作电流, 提高了无线性能及无线采集节点的可靠性。

2.2 低功耗电路

低功耗电路包括电源开关电路、电源转换电路和数据采集电路 3 个部分。通过电源开关电路的通断控制后续电路供电, 定时打开数据采集电路进行数据采集以实现低功耗。

2.2.1 电源开关电路 电源开关电路由 3V 电池供电, 输出电压是由 POWER-ON 开关信号控制的 3 V 电压。通过图 3 的电源开关电路实现电池电能的输出。当开关信号为高电平时, N 型金属氧化物半导体管(N-MOS)Q3 打开, 控制 P 型金属氧化物半导体管(P-MOS)Q2 导通, 输出 3V 电压; 当开关信号为低电平时, 2 个 MOS 管均关闭, 不消耗电池电量。

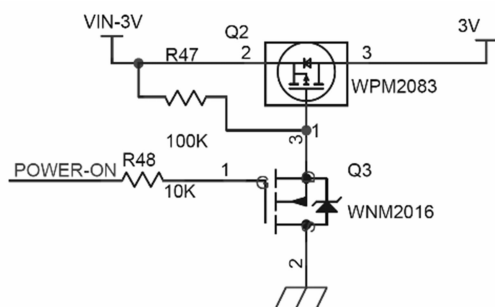


图3 电源开关电路

2.2.2 电源转换电路 整个硬件电路中, 不同器件需要不同的工作电压。8 路 RS485 芯片和光耦芯片的工作电压为 5 V、传感器工作电压为 12 V, 其余芯片工作电压均为 3 V。因此, 需要设计电源转换电路, 将电源开关电路的 3 V 输出分别升至 5 V 和 12 V。

图 4 给出电源转换电路, 通过 DC-DC 变压器, 将电源开关电路的输出电压升至 12 V。经过 LDO 芯片将 12 V 电压转至 5 V 电压进行输出。

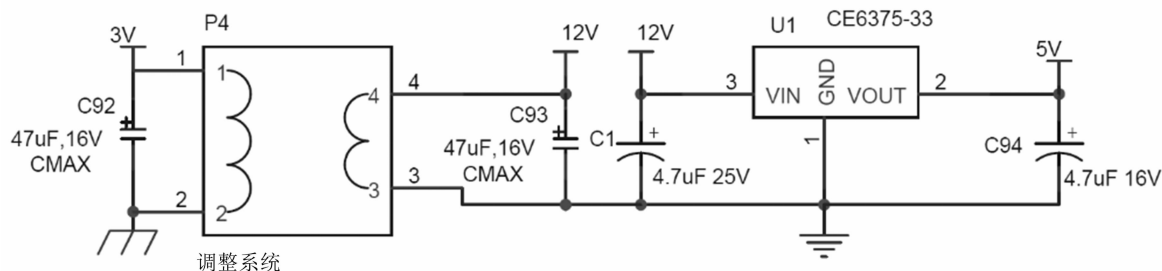


图4 电源转换电路

2.2.3 数据采集电路 数据采集电路由 485 芯片、光隔离模块组成, 如图 5 所示。J1 接传感器, 通过 485 芯片进行信号转换, 经过光隔离模块送至单片机。当不需要采集时, 单片机通过电源开关电路将电路关断, 而控制信号 RXD、TXD、DIR 均输出高电平, 使信号线没有漏电流存在, 实现零功耗待机; 当需要采集信号的时候, 打开电源进行数据采集。

2.3 超低功耗的脉冲式采集方法

通过降低采集、通信时间的占比, 实现低功耗工作及组网。

通过本研究策略, LoRa 无线组网的电流小于 15 mA, 时间小于 40 ms, 连接频率为 10 min/次, 平均电流可以通过公式(1)进行计算。

$$\bar{I}_{\text{LoRa}} = \frac{15 \text{ mA} \times 40 \text{ ms}}{10 \times 60 \text{ s}} = 1 \mu\text{A} \quad (1)$$

水质传感器消耗的电流小于 280 mA, 工作时间小于 40 ms, 采集频率为 10 min/次, 平均电流可以

通过公式(2)进行计算。

$$\bar{I}_{\text{Sensor}} = \frac{280 \text{ mA} \times 40 \text{ ms}}{10 \times 60 \text{ s}} = 18.67 \mu\text{A} \quad (2)$$

节点的待机总电流小于 3 μA 。通过计算, 节点的平均电流为 22.68 μA 。1 μA 年耗能为 8.76 mAh, 因此理论计算得到该系统年功耗为 198.68 mAh。按照 2 000 mAh 的 5 号电池容量计算, 理论上节点可以使用 10 年。考虑到电池本身的寿命, 整个系统采用电池供电方案的使用寿命大于 5 年。

3 基站硬件设计

一般基站数量少, 同时选择可以方便接入外部电源的位置进行安装。因此, 即使基站工作电流较大, 通常也不需要低功耗的特殊设计。如图所示, 整个系统核心器件为单片机, 考虑到网关需要处理来自各节点的信息, 处理难度大、过程复杂、数据量大, 因

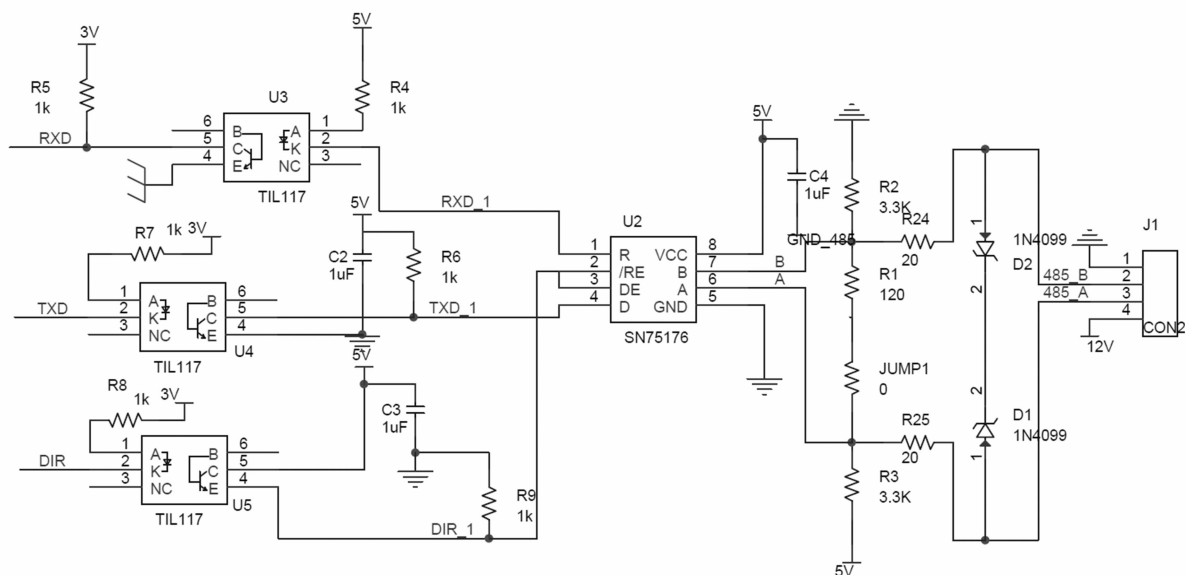


图5 数据采集电路

此选择搭载了 ARM 内核的 STM32L 微控制器,该系列产品处理能力较强、稳定可靠,适用于水产养殖环境监测系统。系统搭载与节点相同的 LoRa 模块,用于实现与节点间的通信,该模块与单片机间通过 SPI 总线进行通信。同时,系统搭载了移远的 BC28 NB-IoT 模块,通过窄带蜂窝网络将采集到的数据上传至云平台。

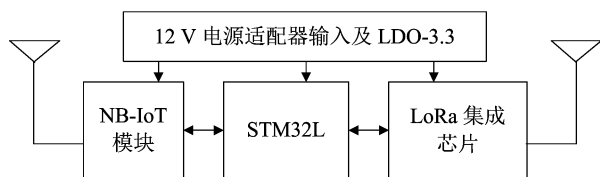


图6 无线基站系统结构

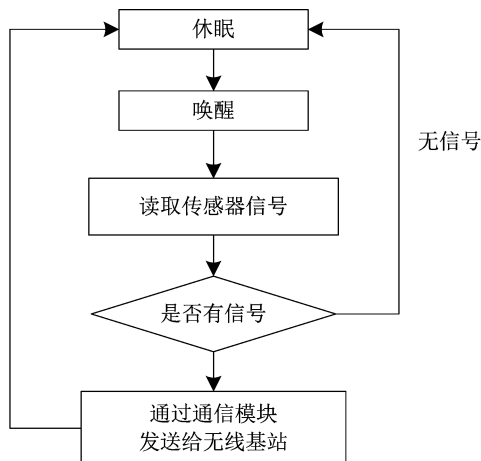


图7 信息监测节点软件流程

4 系统软件设计

4.1 信息监测节点

节点负责采集信息并将采集到的信息汇总到网关。节点工作流程如图 7 所示。

节点大部分时间处于休眠状态,节点定时唤醒,单片机进入工作状态并读取传感器信号,判断是否有无线信号,如果有无线信号则将信息通过通信模块发送给无线基站。整个流程结束后,系统再次进入休眠状态。如果没有无线信号,直接进入休眠状态。

4.2 基站软件设计

基站负责收集节点的信息并将信息上传至云平台。基站工作流程如图 8 所示。

开始工作后,STM32 微控制器判断从第 1 个节点开始,向节点发送数据采集指令;发送后,等待节点响应,并读取节点采集的信息,并将信号发送至云平台。

判断变量 N 是否小于节点数,当数量小于节点数则加 1,继续轮询下一个节点采集到的信息;当 N 到达节点数后,将 N 重置 1。

所有流程结束后,延时一定时间,重新开始轮询节点采集到的信息。

5 数据上传至云平台

本研究采用 NB-IoT 硬件模块,并通过该模块将信息上传至 OneNET 平台,数据上传采用 CoAP + LWM2M 协议。其中,CoAP 作为传输层协议规定数

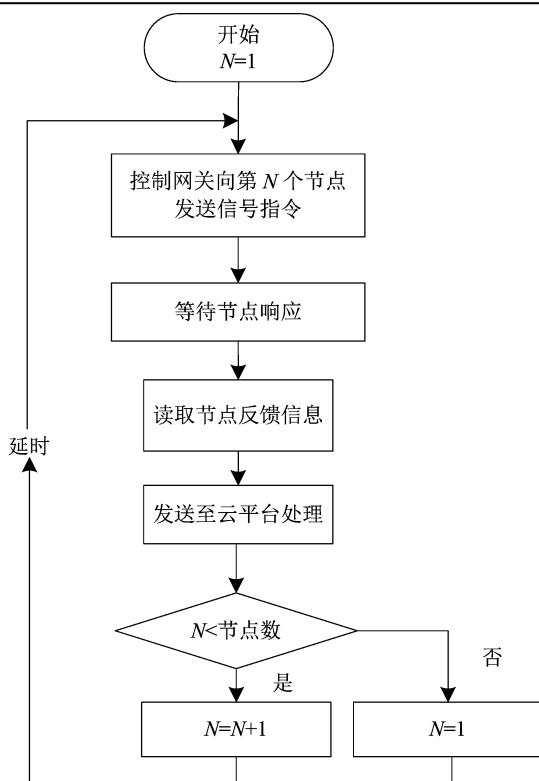


图8 无线基站软件流程

据上传的报文格式。

整个报文包括版本号、报文类型、TKL 标志符长度、响应码和报文编号。

CoAP 协议定义了 4 种不同形式的报文: CON 报文、NON 报文、ACK 报文和 RST 报文,不同形式的报文表示不同的服务质量。考虑到统一由网关进行数据上传,选择 CON 报文,通过重发的方式以降低丢包率。

这种协议可以采用 Token 动态鉴权信息进行鉴权。Token 由 version、res、et、method、sign 这几个参数构成,分别表示版本号、访问资源、过期时间、签名方法、签名结果。计算后得到如下 Token 值:

version = 2018 - 10 - 31 & res = products/
123123 & et = 1537255523 & method = sha1 & sign =
ZjA1NzZlMmMxYzIOTg3MjBzNjYTI2MjA4Yw =

该值为动态值,根据过期时间设置结果决定有效时长,以提高安全性能。

Option 中给出报文选项,通过报文选项可设定 CoAP 主机、CoAP URI、CoAP 请求参数和负载媒体类型。

6 性能测试与分析

本研究旨在设计低功耗的水产养殖监测系统,

功耗测试是重要的评估指标之一。同时,考虑到远程监测的需求,无线通信距离直接影响节点、网关的铺设数量。因此,系统设计完成后,对以下指标进行测试。

6.1 功耗测试

功耗测试主要集中在 2 个功耗较大的器件:通信模块和水质传感器模块。

经过测试,给出无线通信时 LoRa 模块的工作电流脉冲如图 9 所示,将采样电阻 (10 Ω) 串联到 LoRa 模块的电源输入正极,采样电压、脉冲分别为 40、150 mV,计算得到的电流脉冲分别为 4、15 mA,时间分别为 3、37 ms,脉冲周期为 10 min,由式 (3) 计算得到平均电流约为 0.95 μA,略小于理论计算值。

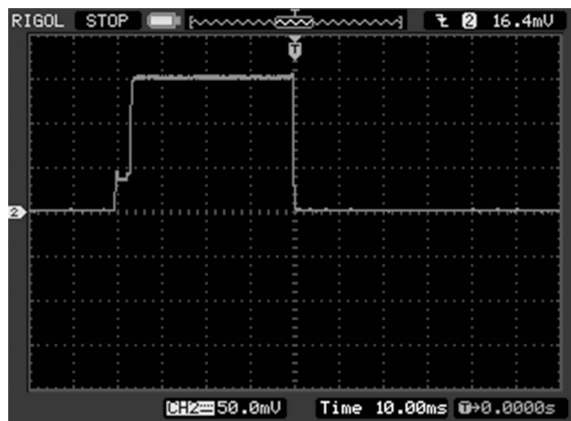


图9 LoRa 模块工作电流

$$\bar{I}_{\text{LoRa}} = \frac{15 \text{ mA} \times 37 \text{ ms} + 4 \text{ mA} \times 3 \text{ ms}}{10 \times 60 \text{ s}} = 0.95 \mu\text{A}.$$

(3)

水质传感器电流采样电阻为 0.2 Ω,采样脉冲电压为 56 mV,计算得到的脉冲电流为 280 mA。传感器工作时间小于 40 ms,功耗也略小于理论计算值。

6.2 无线传输距离

LoRa 技术的开发最初主要定位于低传输信息量的应用场景,开发目标为一次发送信息量不超过几个字节^[9]。该技术采用线性调频扩频技术^[10],既可保持像频移键控调制相同的低功耗特性,又明显增加了通信距离,提高了网络效率并消除了干扰。该技术的主要参数包括带宽、扩频因子和码率。这些指标直接影响通信效率,它们与比特率、信号在空气中的持续时间的关系可由式 (4)、(5) 表示^[9]。

$$R_b = SF \times \frac{BW}{2^{SF}} \times CR. \quad (4)$$

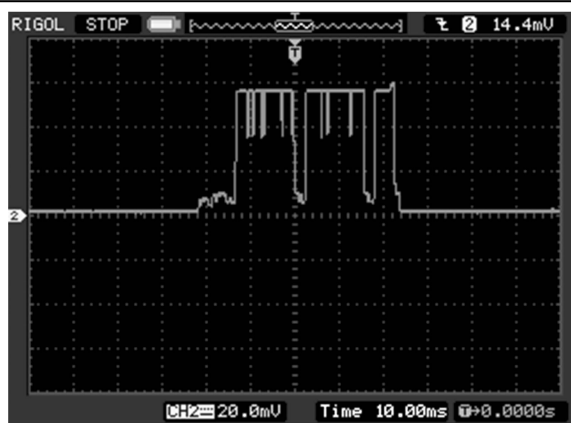


图10 水质传感器模块工作电流

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (5)$$

式中: R_b 为比特率; SF 为扩频因子; BW 为带宽; CR 为码率; T_s 为信号在空气中的持续时间。

通常,可以通过设置扩频因子^[11],调节比特率和信号在空气中的持续时间。当扩频因子大于2时,扩频因子越大,比特率越小,传输速度越慢。信号在空气中持续的时间随着扩频因子的增加呈指数上升趋势。扩频因子越大,传输距离越远,理论传输距离可达到几十公里;在距离要求相对较低的情况下,也可以通过减小扩频因子,来提高信息传输速度。当 $BW = 250 \text{ kHz}$ 、 $CR = 4/5$ 时,信号持续时间、波特率与扩频因子的关系如图 11 所示。

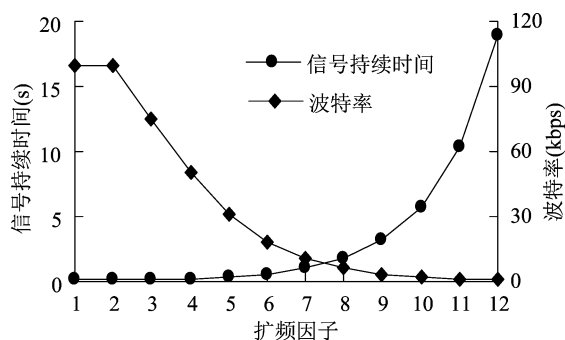


图11 不同扩频因子对应的信号持续时间和波特率

无线接收信号强度 (RSSI) 值、丢包率是通信性能的主要评价指标。本研究对这 2 项指标进行测试,同时考虑环境对测试结果的影响。根据上述分析,将 LoRa 的扩频因子定为 8,信号发射功率设为 LoRa SX1278 芯片的最大发射功率 20 dBm。在测试过程中,依次穿过楼宇、灌木丛等障碍物。

不同测试距离下的测试结果如图 12 所示,RSSI 值与信号传输距离(d)的关系呈对数关系下降。具体关系如公式(6)所示,其中 r^2 为 0.969 2,拟合效果较好。

$$RSSI = -13.800 0 \ln d + 1.054 5; r^2 = 0.969 2. \quad (6)$$

当距离小于等于 364 m 时,丢包率均为 0。当距离超过 382 m 时,丢包率随着距离增加而增加,也就意味着距离对丢包率的影响明显增加。

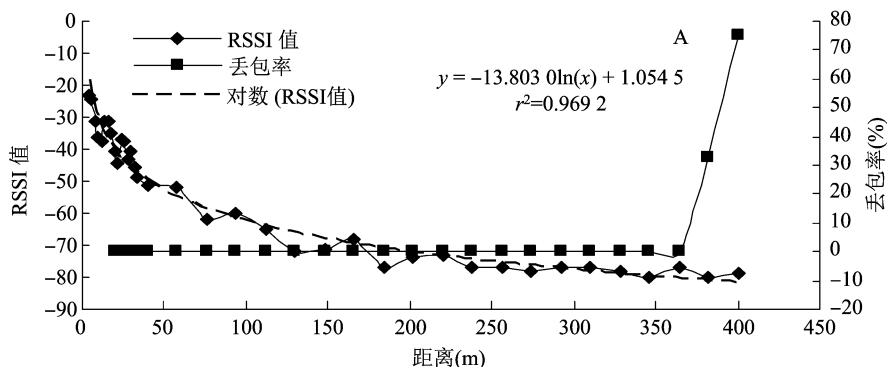


图12 不同距离下的通信效果

7 结论

本研究基于 LoRa 通信技术,设计了应用于养殖环境场景的信息采集系统。在综合考虑功耗、通信距离等因素的情况下,对系统进行了低功耗优化设计。通过选择一系列低功耗器件、设计低功耗电路、优化通信过程等方式,实现低功耗及远距离信息采集。该系统休眠功耗为 $3 \mu\text{A}$,工作时的平均功耗为 $22.68 \mu\text{A}$,采用电池供电,可实现 5 年以上的

续航工作。在扩频因子为 8,信号发射功率为 20 dBm 的情况下,RSSI 值随着通信距离增加,呈对数下降。通信距离不超过 364 m 时,通信效果较好,可推测对于通信范围可以覆盖半径 364 m,占地面积为 41.6 万 m^2 的养殖区,安装一个基站,就能满足大部分养殖场地的需求。

参考文献:

[1] 祁建广,李宝营,李仁庆. 超低功耗水质 pH 检测仪设计[J]. 仪

李志国, 罗会龙, 刘兆宇, 等. 双压缩机密闭式热泵烤烟系统性能研究[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(3): 182–186.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.03.032

双压缩机密闭式热泵烤烟系统性能研究

李志国, 罗会龙, 刘兆宇, 孙茹男, 惠 宽

(昆明理工大学建筑工程学院, 云南昆明 650500)

摘要:为研究空气源热泵烟叶烘烤的系统特征, 并为工程实际应用提供有意义的参考, 本研究测试了 1 种具加热及除湿功能的密闭式热泵烤烟系统双压缩机的运行特征, 并基于 Solkane 软件对系统进行了热力性能分析。分析结果表明, 整个烟叶烘烤过程, 热泵加热子系统和除湿子系统的平均性能系数分别为 2.99 和 3.08, 综合系统平均性能系数为 3.68, 综合系统瞬时性能系数最大值为 4.19; 整个过程的除湿能耗比为 2.41 kg/(kW·h)。此外, 对比该系统与生物质颗粒烤房的烘烤成本发现, 烘烤得到 1 kg 干烟叶, 该系统较生物质颗粒烤房节约成本 54.70%。

关键词:密闭式热泵; 烟叶烘烤; 性能系数

中图分类号: TS43

文献标志码: A

文章编号: 1002-1302(2021)03-0182-05

烟叶烘烤是一个大量耗能的过程^[1-2], 若使用燃煤做主要燃料, 烤干 1 kg 烟叶通常需要 1.5 ~ 2.5 kg 标准煤^[3]。但煤炭的燃烧排放是大气污染的主要污染源之一^[4], 且燃煤具有燃烧不稳定, 热能利用率低等多种问题。发展与利用清洁能源进行烟叶烘烤将是今后烟叶密集烘烤的发展趋势^[5]。赵新帅等将生物质颗粒燃料替代煤炭在烟叶烘烤中做了一定应用研究, 但生物质颗粒燃烧依然会排放环境污染物^[6-7]。1950 年热泵干燥技术以其节

能优势在美国获取专利后便在工业领域获得了迅速发展应用^[8-10]。宫长荣等 2003 年开展热泵烟叶烘烤研究, 研究结果表明, 热泵自控烘烤设备利用热泵加热和冷凝除湿, 充分利用热能, 提高了热能利用率, 提高了烤后烟叶质量, 具有显著的环境效益和社会效益^[11]。贺智谋等研究表明, 空气源热泵烤房烤后烟叶外观质量优于传统密集烤房, 且上等烟率也有所提高^[12-13]。孙晓军等根据热泵原理进行了热泵型烟叶烤房的设计探究及实例运行, 研究结果表明, 热泵烤房可有效提高烟叶烘烤质量, 明显降低烘烤成本^[14]。彭宇等使用热泵并利用太阳能作为辅助热源, 探究了热泵型太阳能密集烤房的节能效果, 热泵型太阳能密集烤房比热泵烤房节省能耗成本 32.86%^[15]。Bryan 等使用热泵作为供热除湿设备对烟叶进行烘烤除湿, 发现使用热泵之后的烤房较普通对照烤房烤后烟叶质量得到提高, 烘

收稿日期: 2020-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 51766005); 云南省烟草专卖局科技项目(2019S30000241019)。

作者简介: 李志国(1995—), 男, 云南宣威人, 硕士, 主要从事热泵烘烤及建筑节能研究。E-mail: 1610338683@qq.com。

通信作者: 罗会龙, 博士, 教授, 主要从事太阳能利用及暖通空调研究。E-mail: huilongkm@126.com。

表技术与传感器, 2017(3): 118–120, 126.

[2] 姚达雯, 周国平, 王鑫鑫, 等. 基于 WSNs-SMS 的低功耗水质检测系统设计[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(11): 109–112.

[3] 孙 卓. 基于 WSN 和 ZigBee 的水质监测系统设计[J]. 电子设计工程, 2017, 25(24): 96–100.

[4] 蔡向科, 高振斌, 范书瑞. 一种低功耗水产养殖水质监测系统设计方案[J]. 渔业现代化, 2018, 45(4): 47–50.

[5] 谢宁俊, 侍孝一, 杨 洁, 等. 基于 nRF24L01 模块的中继协作通信系统设计与实现[J]. 现代电子技术, 2015, 38(21): 67–71.

[6] 龚天平. LoRa 技术实现远距离、低功耗无线数据传输[J]. 电子世界, 2016(10): 115.

[7] Mohamed A, Axel S. Free space range measurements with Semtech LoRa™ technology[C]// 2nd international symposium on wireless

systems within the conferences on intelligent data acquisition and advanced computing systems. Offenburg: IEEE, 2014: 19–23.

[8] 徐冬冬. LoRa 与 NB-IoT 技术开启物联网新格局[J]. 科学技术创新, 2017(24): 116–117.

[9] Augustin A, Yi J Z, Clausen T, et al. A study of LoRa: long range & low power networks for the internet of things[J]. Sensors, 2016, 16(9): 1466.

[10] 赵 静, 苏光添. LoRa 无线网络技术分析[J]. 移动通信, 2016, 40(21): 50–57.

[11] Petajajarvi J, Mikhaylov K, Pettissalo M, et al. Performance of a low-power wide-area network based on LoRa technology: Doppler robustness, scalability, and coverage[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2017, 13(3): 1–16.