

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416661

# 基于自组网协议的箭载无线传感网络系统设计

邵 猛 王红亮

(中北大学省部共建动态测试技术国家重点实验室 太原 030051)

**摘要:** 在火箭舱段环境参数测量中,传统的有线测量方式会增加火箭舱段的整体重量,因此采用无线传感网络代替传统有线测量的方式,对减轻火箭舱段重量具有重大意义。针对以上问题,提出一种基于自组网协议的无线传感网络,基于无线收发芯片 CC1310 搭建无线传感网络,选用 915 MHz 频段作为数据传输信道,并设计了自组网协议,网络中的无线传感节点只需和收集器保持相同的静态地址,节点上电后可自动入网,收集器会为每个节点分配独特的动态地址,同时添加 CSMA/CA 机制防止信道数据冲突,成功应用于此无线传感网络,测试结果表明:在无线传感网络数据传输速率为 250 Kbps、信号采样频率为 100 SPS 的情况下,无线传感节点上电后可自动加入到收集器创建的網絡中,并成功按照收集器配置的时间间隔定时上传传感器数据,在 10 m 范围内无节点数据丢失,最大工作电流 19 mA,可满足运载火箭舱段内环境参数的测量需求。

**关键词:** 无线传感网络;自组网协议;CC1310;数据采集;运载火箭;CSMA/CA

**中图分类号:** TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

## The arrow-borne wireless sensor network system is based on auto-join protocol

Shao Meng Wang Hongliang

(State Key Laboratory of Dynamic Testing Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** In the measurement of environmental parameters of rocket cabin, the traditional wired measurement method will increase the overall weight of the rocket cabin. Therefore, it is of great significance to use wireless sensor network to replace the traditional wired measurement method to reduce the weight of the rocket cabin. Aiming at the above problems, a wireless sensor network based on AD hoc network protocol is proposed, which is based on wireless transceiver chip CC1310 to build a wireless sensor network, selects 915 MHz frequency band as the data transmission channel, and designs an AD hoc network protocol, the wireless sensor nodes in the network only need to keep the same static address as the collector. When the node is powered on, it can automatically join the network, and the collector will assign a unique dynamic address to each node, adds CSMA/CA mechanism to prevent channel data collision, and is successfully applied to this wireless sensor network. The test results show that: when the data transmission rate of the wireless sensor network is 250 Kbps and the signal sampling frequency is 100 SPS, the wireless sensor node can automatically join the network created by the collector after being powered on, and successfully upload the sensor data according to the time interval configured by the collector, and no node data loss within the range of 10 m. It can meet the measurement needs of environmental parameters in the capsule of the launch vehicle.

**Keywords:** wireless sensor network; automatically join the network; CC1310; data acquisition; launch vehicle; CSMA/CA

## 0 引 言

在检测运载火箭舱段内环境参数时,通常使用线缆连接环境传感器<sup>[1-2]</sup>,此方法将导致火箭舱段重量的增加,减重是大型运载火箭设计制造中极为重要的导向之一,在大

型运载火箭本体中,最重的物质是燃料,其次是壳体及电缆网。如将传感系统的电缆网全部换成箭载无线传感网络,节省的电缆将使火箭本体减重至少 30% 以上,对提高火箭的推力和载重具有重大的意义<sup>[3]</sup>。

马游春等<sup>[4]</sup>基于 CC1310 设计的舱内低功耗无线传感

网络,采用主节点主动轮询各个分节点的方式实现舱内环境数据的采集;叶思楠等<sup>[5]</sup>设计的多路采集的高速率无线网络,一个节点负责采集 8 路传感器数据,并通过点对点的方式将数据发送到收集器;段瑞枫等<sup>[6]</sup>设计的多通道高速率低功耗无线传感系统采用分时复用的方式,为每一个分节点分配固定的时间段进行数据传输,实现网络中各个节点数据的采集;日本 RLV 计划中选用 ZigBee 进行组网,采用星型组网方式,收集器主动轮询网络中的各个节点,网络带宽仅有 50 kbps;欧空局阿里安 5 号运载火箭<sup>[7]</sup>选用点对点的红外传输,即网络中仅存在一个收集器和一个传感节点,网络带宽为 100 kbps。以上无线传感网络皆是采用收集器主动轮询节点的方式实现数据的采集,此类方式的逻辑设计较为简单。但在组网时需为每个节点分配固定的静态地址,不利于网络节点的扩展;收集器按照顺序轮询每个节点,若是某一节点未上电,收集器仍会为此节点分配时间段,从而造成网络资源的浪费。

针对以上问题,设计了一种基于自组网协议的箭载无线传感网络系统,采用星型组网方式,选用 CC1310 作为无线数据收发芯片,于 915 MHz 频段进行无线数据传输,与分时复用的组网方式不同的是,当收集器组建网络后,相同静态地址的无线传感节点采用背靠背的通信方式加入网络,随后收集器为新加入网络的无线传感节点分配动态地址,并配置节点数据上传时间间隔、ADC 采样率、节点动态地址等相关参数。同时在无线数据传输中加入了 CSMA/CA 机制,防止同一信道内出现数据冲突<sup>[8-9]</sup>。最后通过搭建无线传感网络并运行自组网协议,验证整体系统的实际可行性。

## 1 无线传感网络整体设计

当无线传感网络应用于运载火箭舱段内时,由于受到空间的影响,无线传感网络由一个收集器及多个节点组成,收集器的主要功能为搭建无线传感网络,当检测到新加入网络的节点后,通过背靠背的方式配置节点的相关参数,并将采集到的数据通过 RS422 协议传输到下一级系统。节点主要由传感器及变换器组成,传感器负责实时测量舱段内的环境参数,当达到收集器配置的数据上传时间间隔时,变换器会将采集到的数据上传到收集器端,从而实现舱段内环境参数的采集。无线传感网络整体设计框图如图 1 所示。

### 1.1 收集器系统设计

收集器主要由 CC1310 芯片、电源转换控制模块、电平转换模块组成。运载火箭舱段内通常采用 +28 V 电压供电,选用 DC-DC 电源芯片将 +28 V 电源分别转换为 +3.3 V 和 +5 V 供系统使用,CC1310 芯片内部分别集成有主控模块、射频模块及数据处理模块,其中主控模块选用 M4 作为内核,负责芯片内部总体逻辑控制,射频模块以 M0 内核作为控制单元<sup>[10-12]</sup>,负责实现数字信号和射频信号之间的相

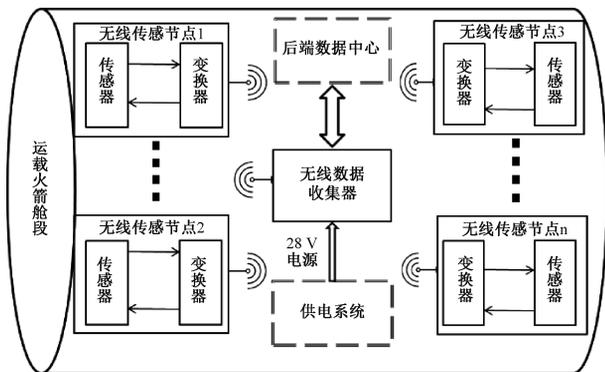


图 1 无线传感网络整体设计框图

Fig. 1 Block diagram of the overall design of the wireless sensor network

互转换,电平转换模块主要完成信号电平之间的转换,将 UART 信号转换为 RS422 并发送到下一级系统。收集器系统组成框图如图 2 所示。

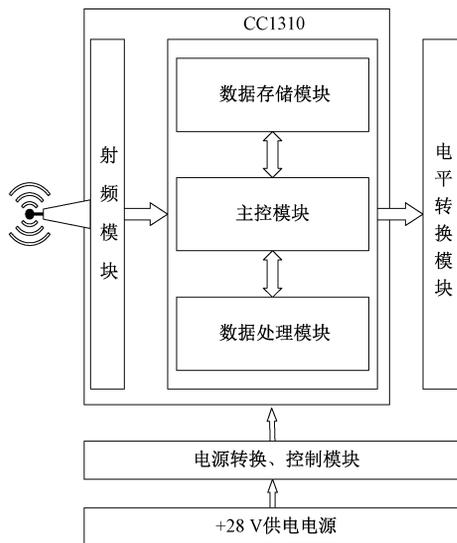


图 2 收集器系统框图

Fig. 2 Block diagram of the collector system

### 1.2 无线传感节点系统设计

无线传感节点选用二次锂电池为系统供电,通过升降压模块将锂电池电压转换为 +3.3 V 供射频芯片及信号调理模块使用,传感器负责采集舱段内的环境参数,并将物理量转换为电信号输入到信号调理模块中,随后使用 CC1310 自带的 12 位 ADC 采集调理后的传感器信号,当完成传感器信号采集后,会将采集到的数据缓存到预定义的内存中,当达到收集器配置的数据上传时间时,将采集到的传感器数据通过射频模块发送到收集器端,从而完成环境参数的采集。无线传感节点系统设计框图如图 3 所示。

## 2 自组网无线传感网络逻辑

自组网无线传感网络基于 TI-RTOS 操作系统进行设

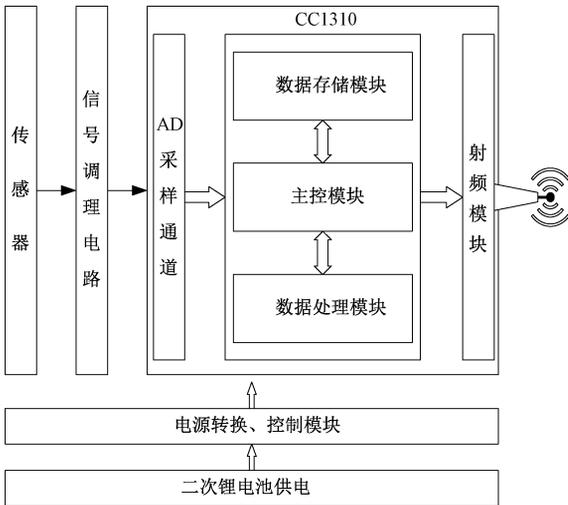


图 3 无线传感节点系统框图

Fig. 3 Block diagram of the wireless sensor node system

计,实现无线传感网络中节点的自动入网及配置;在自组网协议中添加了 CSMA/CA 仲裁机制,避免了网络信道冲突导致数据包传输出现错误;同时为了应对对节点断网的情况,在协议中添加了孤节点状态时节点的控制逻辑,在降低系统功耗的同时还可保证节点下一次的正常入网。使用 CC1310 芯片自带的 API 函数实现射频信号发送与接收的底层逻辑设计,并基于此平台完成自组网协议验证。

## 2.1 收集器自组网逻辑

收集器负责创建无线传感网络,当检测到新加入网络的无线传感节点后,会配置节点无线传输的相关参数,最后定时接收节点发送的传感器数据<sup>[13]</sup>。收集器自组网逻辑如图 4 所示。

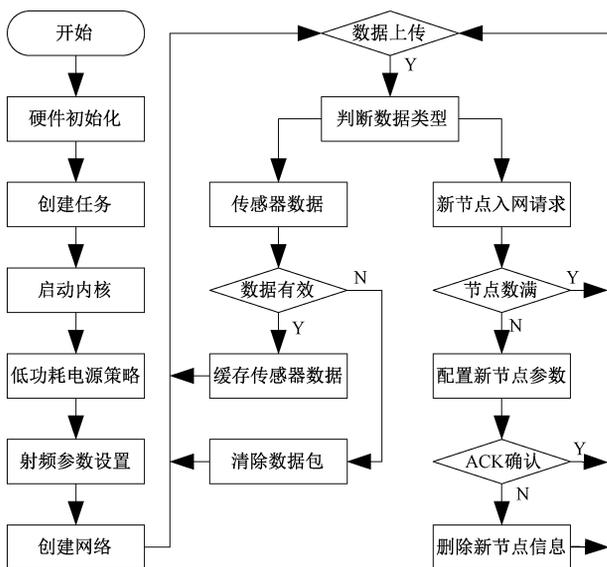


图 4 收集器自组网逻辑框图

Fig. 4 Logical block diagram of the collector auto-join protocol

当收集器上电后,首先进行硬件初始化,配置 GPIO 口的相关寄存器,设置 UART 的波特率为 460 800,随后创建基于 TI-RTOS 的任务堆栈及任务函数,在相关设置完成后,调用 BIOS\_start() 函数开启内核。

为了增加无线传感节点的续航性,在任务函数中调用低功耗电源策略,减少芯片在空闲阶段的耗电量;随后配置射频参数,此芯片可在 Sub-G 频段进行无线通信,同时考虑到后期高速数据传输的需求,便将信道配置为 915 MHz,组网方式为星型网络,收集器的静态地址为 0xAA、0xBB,在完成相关参数配置后,收集器成功创建网络,开始等待接收数据<sup>[14]</sup>。

当收集器接收到数据后,会首先判断接收到的数据包类型;若数据包类型为传感器数据,数据处理模块会对数据包解包,通过 CRC 校验判断是否为有效数据。若数据有效,则将数据缓存到缓存模块,随后通过 UART 接口将数据发送到数据转换模块,转换为 RS422 发送到下一级系统,若无效,则清除数据包并回到数据接收阶段;若数据包类型为新节点入网请求时,收集器会首先判断网络中的节点数量是否达到最大数量,网络中最大节点数量由数据包大小及带宽决定,当网络中节点数满时则丢弃此节点并重新回到数据接收阶段,若网络中节点数未满足,便为新加入网络的节点配置相关参数,随后等待新节点的回应,若回应超时,则删除此节点的全部信息,并继续等待接收数据,若在一定时间内接收到此节点的回应,则将此节点的信息保存,开始等待接收下一次数据。

## 2.2 无线传感节点自组网逻辑

无线传感节点负责寻找相同静态地址的网络,在加入网络后上传传感器采集到的环境参数。无线传感节点自组网逻辑如图 5 所示<sup>[15]</sup>。

和收集器相同,在上电后无线传感节点会进行一系列初始化,随后启动系统内核,执行低功耗电源策略,最后配置节点相关射频参数。

在完成以上操作后,节点寻找与自身静态地址及频段相同的无线传感网络,若发现与自身匹配的网络时,节点将通过背靠背的方式向创建网络的收集器发送入网请求,收集器会根据网络中已加入的节点判断新节点是否可入网,随后向节点回应。若收集器通知不可入网,新节点会进入孤节点状态,在此状态中节点将睡眠 4 s,随后再次寻找可加入的网络。当节点顺利入网后,会根据接收到的数据包配置数据上传时间间隔、ADC 采样率、动态地址等相关参数。

节点会根据配置的数据上传时间定时上传采集到的 ADC 数据,为了保证数据采集的连续性,调用 CC1310 内部集成的 Sensor Controller 实时采集 ADC 数据,当寄存器满时向 CPU 发送一次外部中断,随后将数据组帧到待发送数据包中,在满足发送条件时,若信道处于空闲状态便将组帧好的数据包发送到收集器。在系统实际工作中存在收集器

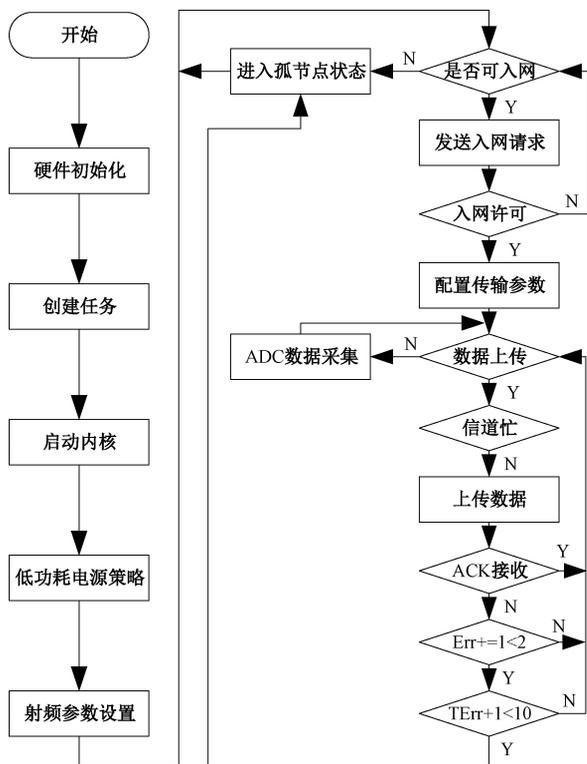


图 5 无线传感节点自组网逻辑框图

Fig. 5 Logic block diagram of wireless sensor node auto-join protocol

掉电或节点断网的情况,为应对上述问题,设计了孤节点状态,当节点发送数据累计出现问题 10 次后,节点将进入孤节点状态,休眠一段时间后开启一次并寻找可加入的网络,减少节点在断网时造成的电源消耗,延长节点续航时间。

### 3 实验测试

#### 3.1 系统功能测试

为了验证自组网协议及无线传感网络的功能,使用 4 个无线传感节点及 1 个收集器搭建测试平台,在测试中对无线传感网络的相关参数进行配置。首先配置射频信号传输频段为 915 MHz,数据传输速率为 250 kbps,无线传感节点在配置完成后每 1 s 上传一次传感器数据,ADC 采样频率为 100 SPS。

首先对自组网协议功能进行测试,实验中使用四个无线传感节点和一个收集器,当收集器上电并成功创建网络后,依次上电无线传感节点,并通过串口将节点入网信息打印到电脑端,从而观察节点是否可以顺利入网并完成相关参数的配置。测试结果如图 6 所示。

由串口打印出的调试结果可以看出,当收集器成功创建网络后,若节点满足入网条件,则会发送入网请求,在成功入网后收集器会为新入网的节点分配动态地址,ADC 采样频率、传感器数据上传时间间隔,系统中节点以 1 s 为间隔定时上传传感器数据。

网络创建成功,允许节点入网  
 新节点动态地址为: 0x1  
 新节点动态地址 :1  
 ADC采样频率 :100  
 传感器数据上传时间间隔:1000  
 新节点动态地址为: 0x2  
 新节点动态地址 :2  
 ADC采样频率 :100  
 传感器数据上传时间间隔:1000  
 新节点动态地址为: 0x3  
 新节点动态地址 :3  
 ADC采样频率 :100  
 传感器数据上传时间间隔:1000  
 新节点动态地址为: 0x4  
 新节点动态地址 :4  
 ADC采样频率 :100  
 传感器数据上传时间间隔:1000

图 6 自组网协议节点联网测试

Fig. 6 Auto-join protocol node networking test

#### 3.2 传感器数据采集及传输质量测试

为验证传感器信号采集的准确性及信号的传输质量,首先将节点放置在 10 m 范围内的不同位置,使用 4 个无线传感节点分别采集信号发生器产生的频率为 1 Hz 的 4 种波形信号,随后通过无线传感网络发送到收集器,收集器通过串口将数据上传到电脑端并保存并处理,通过观察波形的完整性判断数据采集及传输质量。信号发生器产生波形如图 7 所示,收集器接收到的波形如图 8 所示。



图 7 信号发生器产生波形

Fig. 7 The signal generator produces the waveform

通过观察上述结果不难发现,无线传感节点的 ADC 通道可准确采集电压信号,并通过无线传感网络将数据发送到收集器端,在 10 m 范围内可以保证无线数据的稳定传输。

#### 3.3 无线传感节点各阶段功耗测试

为测试无线传感节点在实际工作中的功耗,选用 KEYSIGHT 公司型号为 N6705C 的直流电源分析仪测试实际工作中的电流大小,测试结果如图 9 所示。由图 9 可知,节点未上电时处于孤节点状态,此时节点会定时检测通道中是否存在网络,电流大小为 9 mA,空闲状态时的电流

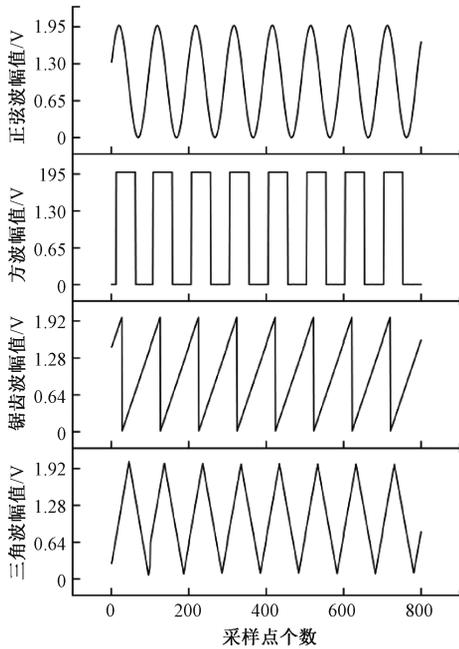


图 8 收集器接收数据波形

Fig. 8 The collector receives the data waveform

大小为 7 mA,在 6 s 以后节点加入网络,发送数据时平均电流大小为 19 mA,接收电流大小为 8.6 mA,通过以上数据可得当节点选用容量大小为 3 400 mAh 的二次锂电池进行供电时,节点在待机状态下可正常工作 20 天,在与收集器进行通信时可正常工作 15 天左右,可以满足实际使用时长需求。

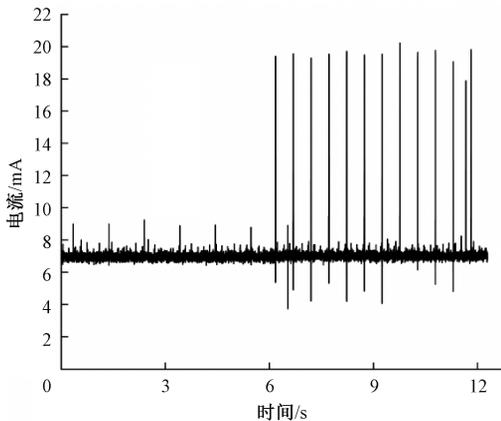


图 9 各阶段功耗测试

Fig. 9 Power consumption test at each stage

### 3.4 本系统与其他系统相关优势对比

为验证本系统的优势及先进性,做如表 1 所示的相关对比。

通过表 1 对比不难发现,本系统相较于其他无线传感最大的不同点在于数据的获取方式,本系统采用无线传感节点定时上传数据的方式实现传感器数据的获取,相较于

表 1 本系统与其他系统相关优势对比  
Table 1 This system is compared with other systems related advantages

	数据获取方式	带宽/bps	组网方式
本文	节点定时上传	250 K	星型
文献[4]	收集器轮询	50 K	星型
文献[5]	收集器轮询	377 K	点对点
RLV	收集器轮询	50 K	星型
阿里安	收集器轮询	100 K	点对点

收集器轮询的方式,极大的提高了网络的利用效率和节点扩展的灵活性,同时网络带宽为 250 Kbps,仅小于文献[5]所设计的点对点无线传感网络。

## 4 结 论

本文针对运载火箭舱段内环境参数采集设计了基于自组网协议的箭载无线传感网络系统。在硬件方面选用收发一体的 CC1310 芯片搭建无线传感网络系统,在软件方面,基于 TI-RTOS 操作系统设计了自组网协议,收集器上电后会自主创建无线传感网络,节点只需和收集器保持相同的静态地址便可加入网络,节点加入网络后会主动上传传感器数据,极大的增加了网络的灵活性和带宽利用率,同时,在自组网协议中加入 CSMA/CA 机制保证数据传输的稳定性。试验结果表明,该系统设计合理,数据传输稳定,自组网协议可实现节点的自主组网、节点参数配置、传感器数据上传等功能,满足实际工程需求,同时此自组网协议还可应用于大多数低速无线传感网络,具有巨大的应用价值。但系统还需改进,未来还需要对多节点、高速率及多通道无线传感网络做进一步研究。

## 参考文献

- [1] 王国辉,张金刚,耿胜男,等.运载火箭新一代测量系统发展设想与关键技术分析[J].宇航总体技术,2020,4(1):1-7.  
WANG G H, ZHANG J G, GENG SH N, et al. Development assumption and key technology analysis of new generation measurement system of launch vehicle [J]. Aerospace General Technology, 2020, 4(1):1-7.
- [2] 罗煜缤,陈浩,张金刚,等.面向航天运载器的通用化无线传感网络设计方法[J].宇航总体技术,2024,8(3):57-61.  
LUO Y B, CHEN H, ZHANG J G, et al. Design method of universal wireless sensor network for space vehicle [J]. Aerospace General Technology, 2024, 8(3):57-61.
- [3] 我国首次实现运载火箭测量系统传感系统无线传输[J].传感器世界,2018,24(6):42.

- Wireless transmission of sensor system of carrier rocket measurement system for the first time in China [J]. *Sensor World*, 2018, 24(6): 42.
- [4] 马游春, 李晋芳, 李超杰, 等. 舱内低功耗无线传感网络系统设计[J]. *电子测量技术*, 2022, 45(11): 109-113.  
MA Y CH, LI J F, LI CH J, et al. In low power wireless sensor networks system design [J]. *Journal of Electronic Measurement Technology*, 2022, 45(11): 109-113.
- [5] 叶思楠, 马游春, 李晋芳. 多路采集的高速率无线网络系统设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2023(2): 54-58, 64.  
YE S N, MA Y CH, LI J F. Design of high rate wireless network system for multi-channel acquisition [J]. *Instrument Technology and Sensor*, 2023(2): 54-58, 64.
- [6] 段瑞枫, 吕燕洁, 杜文基, 等. 基于CC1310芯片的多通道高速率低功耗无线传感系统[J]. *北京航空航天大学学报*, 2022, 48(11): 2177-2185.  
DUAN R F, LYU Y J, DU W J, et al. Multi-channel high-rate and low-power wireless sensor system based on CC1310 chip [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2022, 48(11): 2177-2185.
- [7] BELSARE K, SINGH M, GANDAM A, et al. Wireless sensor network-based machine learning framework for smart cities in intelligent waste management [J]. *Heliyon*, 2024, 10(16): 36271.
- [8] 马健. 一种应用于WSN节点的双频段射频能量获取与能量管理电路[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2023.  
MA J. A dual-band RF energy harvesting and energy management circuit for WSN nodes [D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2023.
- [9] 吴秋尘, 胡春静, 吴皓, 等. 基于CSMA/CA的无人机自组网容量分析[J]. *通信技术*, 2022, 55(8): 1014-1019.  
WU Q CH, HU CH J, WU H, et al. Capacity analysis of UAV auto-join protocol network based on CSMA/CA [J]. *Communications Technology*, 2022, 55(8): 1014-1019.
- [10] 朱晓明, 刘蓓, 白翔, 等. CSMA/CA网络协议的无线区块链安全性研究[J]. *重庆邮电大学学报(自然科学版)*, 2022, 34(1): 6-15.  
ZHU X M, LIU B, BAI X, et al. Research on wireless blockchain security of CSMA/CA network protocol [J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2022, 34(1): 6-15.
- [11] TIAN X P, WU S, ZHANG X Y, et al. RSSI-WSDE: Wireless sensing of dynamic events based on RSSI [J]. *Sensors*, 2024, 24(15): 4952.
- [12] 李世辉, 张永璞, 史河宁, 等. 基于无线传感网络的化工行业实验室信息管理系统设计[J]. *化工设计通讯*, 2024, 50(4): 156-158.  
LI SH H, ZHANG Y P, SHI H N. Design of chemical industry laboratory information management system based on wireless sensor network [J]. *Chemical Design Communication*, 2024, 50(4): 156-158.
- [13] 张青超, 贺庆, 郝思聪, 等. 低功耗无线烟雾报警器的设计[J]. *消防科学与技术*, 2021, 40(4): 527-530.  
ZHANG Q CH, HE Q, HAO S C, et al. Design of low power wireless smoke alarm [J]. *Fire Science and Technology*, 2021, 40(4): 527-530.
- [14] 黄小兵, 聂兰顺. 无线自组网节点极低基础功耗方案的设计[J]. *智能计算机与应用*, 2018, 8(6): 225-229.  
HUANG X B, NIE L SH. Design of very low basic power consumption scheme for wireless auto-join protocol network node [J]. *Intelligent Computer and Application*, 2018, 8(6): 225-229.
- [15] 王薪宇, 邱满刚. 多协议远距离低功耗IoT网关硬件设计[J]. *电子产品世界*, 2018, 25(5): 71-75.  
WANG X Y, QIU M G. Hardware design of multi-protocol long distance low power IoT gateway [J]. *Electronics World*, 2018, 25(5): 71-75.

### 作者简介

邵猛, 硕士研究生, 主要研究方向为传感网络及射频微波技术。

E-mail: S202206060@st.nuc.edu.cn

王红亮(通信作者), 教授, 博士生导师, 主要研究方向为测试系统集成、微纳器件与系统、超声换能器及系统、声表面波器件等。

E-mail: wanghongliang@nuc.edu.cn