

基于 470 MHz 小功率无线自组网系统终端的设计

唐 凯,马维华

(南京航空航天大学 计算机科学与技术学院,南京 210016)

摘要:针对470 MHz~510 MHz频段内越来越广泛的低功耗、低成本的无线集中采集系统应用。该文设计了一种基于ARM Cortex-M0微控制器,具有实现自组网,自动路由,节点自动跳频功能的无线终端模块。详细介绍了系统的主要结构,模块的硬件和软件设计,详细阐述了自组网和自动路由的原理和实现方法。设计中实现了自组网、自动路由、自动绑定地址等功能。应用证明,该系统可以应用在无线抄表、安防、智能家居、无线传感器网络等多种中短距离系统中,性价比高,稳定可靠。

关键词:Cortex-M0;Si4432;自组网;自动路由;无线集中采集系统

中图分类号:TP274 **文献标志码:**B

Design of the Low-power Wireless Ad Hoc Network System Terminal Based on 470 MHz

TANG Kai, MA Wei-hua

(Department of Computer Science, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: For more extensive use of low-power 470MHz~510MHz frequency, low-cost wireless centralized acquisition systems. This paper introduces a design based on ARM Cortex-M0 micro controller, with will be able to realize the Ad hoc network, automatic routing, node to be automatic frequency hopping function of the wireless terminal module. Introducing the main structure of the system, the design of hardware and software modules, and expounds the principle and realization method of Ad hoc network and automatic routing. The design realized the functions of networking, automatic routing, automatic binding address and other. Application shows that the system can be applied in wireless meter reading, security, intelligent household, wireless sensor networks and many kinds of medium distance systems, cost-effective, stable and reliable.

Key words: Cortex-M0; Si4432; Ad hoc; automatic routing; wireless concentrated collection system

随着无线传感器网络技术的不断发展,人们对短距离高性价比的无线收发模块提出了更高要求。工业医疗和科研 ISM(industrial scientific medical)频段是世界各国普遍认可的开放给工业、科学和医疗领域使用的免费频段。我国无线电管理委员会已将 470 MHz~510 MHz 规划给无线计量频段。同 Zigbee 系统(一种低速短距离传输的无线网络协议)

相比,由于使用了相对较低的频率,波长较 2.4 GHz 长,故具有更好的覆盖性和良好的绕射和透射能力。能够适应各种社区环境和天气变化,运行稳定可靠。本文设计了一种基于 Si4432 无线收发芯片和 Nuc100LD2BN 微控制器的可实现自动路由功能的无线射频收发系统。该系统在实际运用中与信息采集模块集成在一起,当微控制器 MCU(Microcon-

收稿日期:2012-07-13;修订日期:2012-08-03

作者简介:唐凯(1987—),男,硕士研究生,研究方向为嵌入式系统、自动化控制;马维华(1960—),男,硕士,教授,研究方向为嵌入式系统、自动化控制。

troller)通过串口接收到采集的信息后,首先 Si4432 收发器建立具有可靠连接的无线路由,然后将 MCU 收到的数据通过该路由传送给数据集中器,集中器将数据汇总后,进行存储、处理或转发,从而实现了较远距离、低功耗的可靠信息传输。

1 无线自组网系统的体系结构

无线自组网系统包括两大部分模块:一部分为协调器,负责协调建立网络,传输网络信标,建立路由,存储网络节点信息等;另一部分为无线终端,其作用主要是与数据采集系统进行数据交互。协调器安装在数据集中器上;无线终端可根据现场实际条件安装在计量表计或者数据采集器上。这样可实现集中器、采集器、计量表计的三层采集系统或集中器和计量表计的两层采集系统。数据集中器读取被测装置数据的操作全部通过协调器完成,在网络中,无线通信单元(协调器模块与终端模块)屏蔽了组网与维护网络的工作,集中器可随时查询在网的终端节点及其状况,通过协调器与终端节点读取采集的数据,而不必关心和干预网络的运行,网络所有维护工作均由模块自主完成。图 1 展示了无线小功率自组网系统在居民用电自动抄表系统中的应

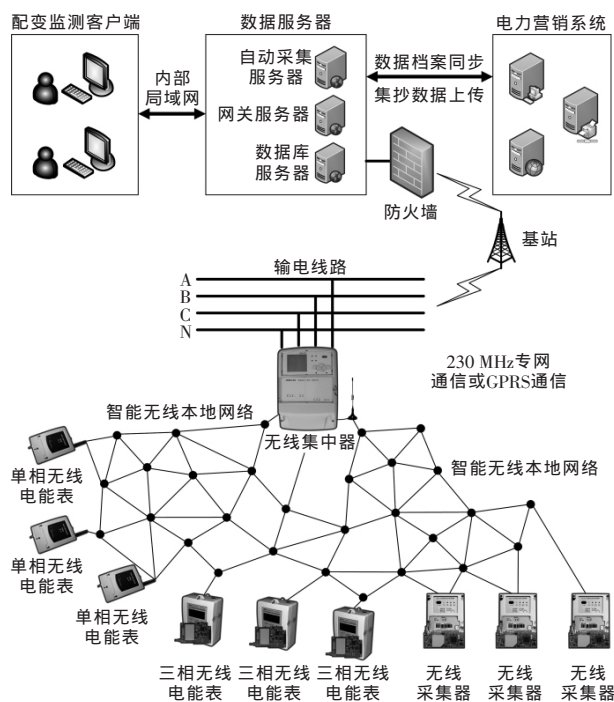


图 1 无线自组网自动抄表系统结构图

Fig 1 Wireless ad-Hoc network automatic meter reading system structure

用。通过无线远程通讯的方法,传送到电管部门的计算机管理系统,从而实现自动记录等一系列功能,克服人工抄表工作量大、费用高、数据不正确等缺点。

2 系统硬件设计

无线终端采用的是新唐科技公司的 Nuc100LD2BN 作为主控芯片。该芯片是以 ARM Cortex-M0 为内核的 32 位微控制器,具有 8K 的 SRAM,用来实现自组网、中继等基本内存开销;Nuc100 系统具有内嵌 64 K 的 Flash 存储器,主频最大可达 50 MHz;内部含有 2 路 I²C、1 路 SPI 以及 2 路 UART 等基本功能。无线收发芯片采用的是 Silicon Labs 公司的低功耗 Si4432,该芯片集成度高,封装小,性价比高。可以工作在 240 MHz~930 MHz 的宽频率范围,最高能达+20 dBm 的输出功率,可以实现较远的传输距离;其它的特点还有:自动唤醒定时器、低电池检测器、64 字节的收发 FIFO、自动数据包处理、报头检测等。可实现低功耗、廉价 MCU 的系统应用。系统硬件结构如图 2 所示。

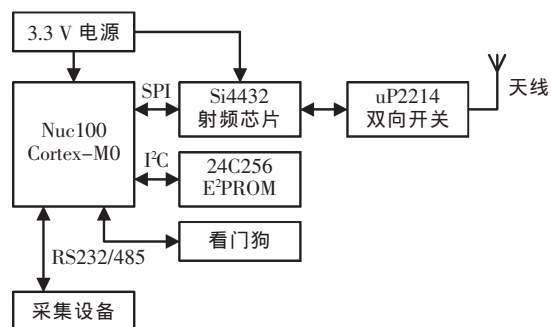


图 2 终端系统硬件结构

Fig.2 Hardware architecture of the terminal system

设计时使用外部 12 MHz 晶振作为主要时钟源,外部 32.768 kHz 晶振作为 RTC 日历时钟源使用;调试方式采用新唐公司出品的 Nu-Link ICE 调试工具,只需两根线即可完成烧写,节省了印制电路板的面积,便于开发^[1]。

MCU 通过标准 4 线 SPI 接口与射频芯片进行数据通信和初始化配置;而射频芯片的工作模式选择脚 SDN 与 MCU 的一个 GPIO 引脚相连,当 SDN 为高电平时, Si4432 进入掉电关闭状态,所有寄存器内容全部丢失,此时功耗处于最低状态;当 SDN 为低电平时, Si4432 可以正常工作。nIRQ 引脚为外部中断输出引脚,用于产生事件中断,当有任何数据收发、系统复位或者检测到同步字前导码等状态

时^[2],该引脚都会通知 MCU 有中断产生。本系统选择的是双刀双掷天线 μ PG2164,该芯片将接收和发送功能集成在一起, Si4432 的 GPIO0 连接到 μ PG2164 的 Vcon2; GPIO1 连接到 Vcon1。可以将 μ PG2164 的天线输出脚 ANT1 和 ANT2 通过串联两

颗小电容改善信号质量,通过印制板上的天线或者外接天线实现发送和接收的半双工通信。在配置射频电路工作频段时,可以选择国家无线电管理委员会免申请的 433 MHz, 470 MHz~510 MHz 计量频段。Si4432 部分硬件电路图如图 3 所示^[3]。

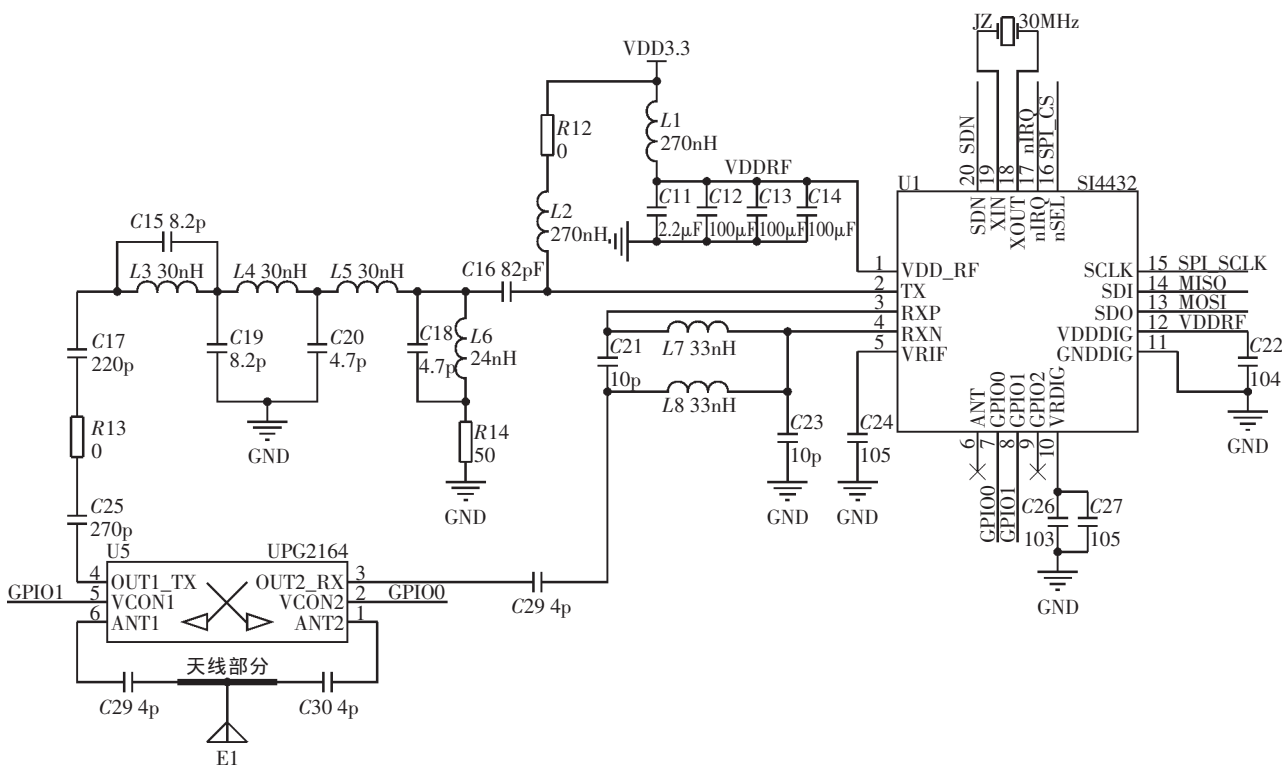


图 3 射频部分电路图

Fig.3 RF circuit diagram

3 系统软件设计

小功率无线自组网系统的实现原理是建立了一套多层通信协议,通过不同的物理层封装,实现对不同频率不同频道信道的支持。可以实现中继转发、自组网和应用层地址探测与绑定的功能。

3.1 系统组网过程

对协调器来说终端设备分为两种:信标设备与非信标设备。凡是能收到协调器发送信标的终端称为信标设备,收不到信标的终端称为非信标终端。在信标设备中,上行和下行都没有中继的设备称为直通终端;上行或下行有中继的终端称为非直通终端,如图 4 所示。

协调器有一个唯一的网络 ID,上位机可以通过该 ID 下发终端节点的档案,只需发送需要采集信息的目的地址,即可完成数据收集工作,整个系统对于上位机来说是透明的。协调器模块在上电初始

化时,会扫描一个无占用的干净频道,在该频道上建立网络,发送信标,接受终端节点入网。终端节点能自动扫描信道列表,并尝试加入网络。终端设备上报所携带的附属设备的地址,在连接申请时发送给协调器,协调器根据档案确定是否允许终端节点入网,被拒绝的终端则需要切换到下一个信道上尝试。如果所有信道都无法按照有信标方式上线的话,各终端依次在各个信道上按无信标方式上线。

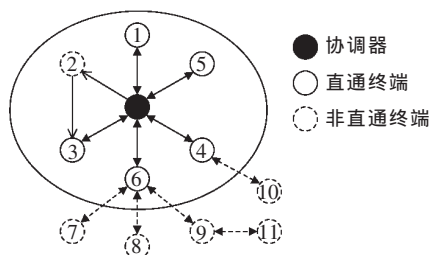


图 4 协调器与终端关系图

Fig.4 Relationship of coordinator and terminal

每两个信标间的时隙分为两个阶段：竞争访问期 CAP (content access period) 和无竞争周期 CFP (contention-free period)。CAP 是供终端争抢发送的时槽, 在 CAP 时段, 没有上线的终端设备, 可以发送附着申请、连接申请等; 上线的终端可以用于发送保证时槽 GTS (guaranteed time slots) 申请、附着确认等。协调器可以设定信标帧的起止时槽和长度, 终端可以按上报级别的实时性、周期性的调整 CAP 时间片的长度, 最短可以放入 1 个 CAP 请求帧作为发送请求帧。CFP 实际是信标中让目标设备占用信道的次序, 即分配给某个终端固定使用的时槽。CFP 可以用来分配 GTS, 用来与直通设备发送响应数据, 如果有终端设备分配了 GTS, 则它不可以在 CAP 中发送数据。一个 GTS 只可以发送一帧数据。CFP 时槽有两种类型: 一种是完全授权给终端, 让终端可以在该时间段内自由发送数据; 二是终端在该时序的一段时间内如果没有发送数据, 则该时隙被收回^[4]。

终端上线过程包括附着阶段和连接阶段。终端主动发送数据, 时序控制分为两个部分, 信标设备采用协调器的信标作为时序控制, 非信标设备采用非信标的碰撞逻辑。直通终端采用信标方式连接上线; 非直通终端由信标终端代理请求入网。终端首先进行信道扫描, 如果能收到信标, 则在该信道上采用有信标方式上线, 否则切换到下一个信道上继续尝试。直通终端通过 CSMA-CA 算法确定是采用有 CAP 还是无 CAP 的上线方式。如果不能收到信标, 则按照无 CAP 的碰撞方式首先发送附着申请, 如果附着成功, 则通过已入网终端申请中继入网, 否则继续尝试; 如果终端能够收到信标, 则按有信标的 CSMA-CA 方式发送附着申请, 根据回码判断是何种确认方式, 若为连接确认, 则上线成功, 若为附着确认, 则终端在 CAP 时隙向协调器发送连接请求, 根据协调器回码判断是否上线成功, 否则继续尝试。具体流程如图 5 所示。

3.2 协议设计

软件协议栈分为 4 层: PHY 物理层、MAC 接入层、NWK 网络层和 APP 应用层。

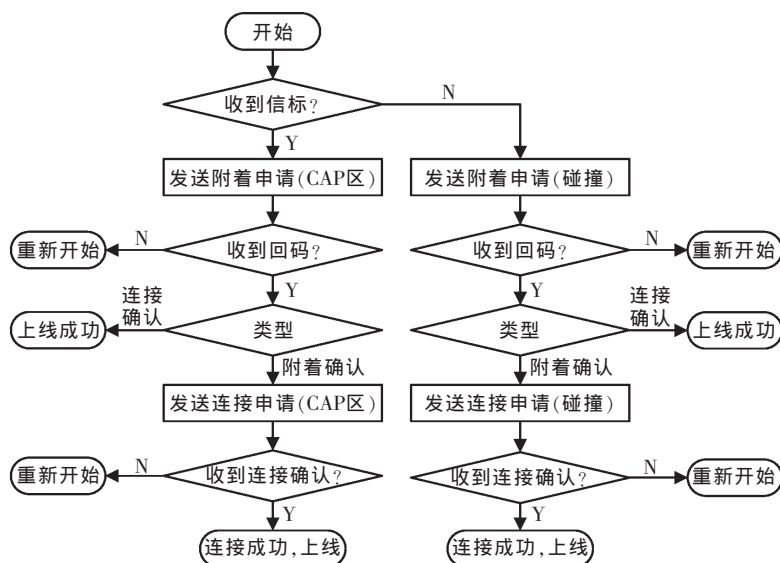


图 5 终端上线流程图

Fig.5 Flow chart of terminal on-line processing

PHY 层主要是封装终端的硬件, 包含两层。一层是 HAL 硬件描述层: 主要是与体系结构相关的底层驱动程序, 包括处理系统启动、硬件初始化和中断异常等, 为上层提供统一的调用接口; 另一层主要是将数据发送到数据缓冲区中。如果发送缓冲区中有数据, 则进入发送状态, 发送开始和结束都有消息通知 MAC 层, 发送结束后, 则一直处于接收状态, 收到数据则通知 MAC 层接收到的数据和接收场强。

MAC 层提供点对点通信, 完成向网络层发送请求, 记录接收场强和统计点对点通信成功率等功能。MAC 层发送处理过程为: 首先获取物理层状态, 如果处于空闲则进行同步判决; 如果是直接发送的报文, 则修改 MAC 层帧序号, 调用 PHY 层发送数据; 如果是碰撞发送, 则先进行 CSMA-CA 碰撞避免, 等到信道可以发送时, 修改 MAC 层帧序号, 调用 PHY 层发送数据。MAC 层接收处理过程为: 首先根据帧类型, 记录接收时间, 如果是信标帧, 则记录信标接收时间以及设置 CAP 开始与结束时间, 然后 MAC 层会判断接收数据的地址类型; 如果是长地址则直接进行网络层接收处理; 如果是短地址和无源地址, 则先记录接收场强, 再调用网络层接收处理。

NWK 层主要是选择信道加入网络, 维护与协调器之间的连接, 为应用层提供带路由的数据传输以及为其他终端提供中继等服务。最佳路由是由协调器通过各个终端的场强信息与通信成功率计算出来的: 协调器每次召测场强时都会计算并刷新最佳路

由,写到协调器的存储器中。如果当前路由被锁定,则无需重新计算。如果系统信道空闲时,协调器会尝试连接各个路由,在一定成功率下,如果有三次连续连接成功,则该路由可作为最佳路由之一;同时各个可能的最佳路由中,成功率越高越好,而且中继深度越小越好,通信成功率与中继深度成下降的指数关系,系统设定的最大中继深度为15层。那么中继深度最小且成功率最高的路由将作为最佳路由并写入协调器和终端的存储器中。

APP层介于NWK层和附属设备之间,实现系统应用的特定功能,转发网络层与附属设备之间的应用层报文服务,以及探测附属设备的应用层地址。任何一个设备具有3个地址,MAC地址(长地址),NWK地址(短地址),APP地址(应用层地址)。MAC地址,每个设备唯一。MAC地址按照统一的算法生成,若MAC地址校验错误的节点,不允许上线^[9]。NWK地址,加入网络时,由协调器分配,网络内唯一。终端向协调器申请短地址,协调器为终端设备分配短地址。应用层地址绑定过程为:终端节点会自动探测附属设备的应用层地址,携带其中一个地址向协调器发送连接申请。协调器收到连接请求后,首先进行长地址校验,再根据应用层地址与系统档案对比,决定是否允许终端节点入网。协调器模块在终端入网后,把终端上的APP层地址一起召测回来,绑定到同一个网络层地址上。这样就建立了长地址、短地址、APP层地址之间的绑定。系统工作状态流程图如图6所示。

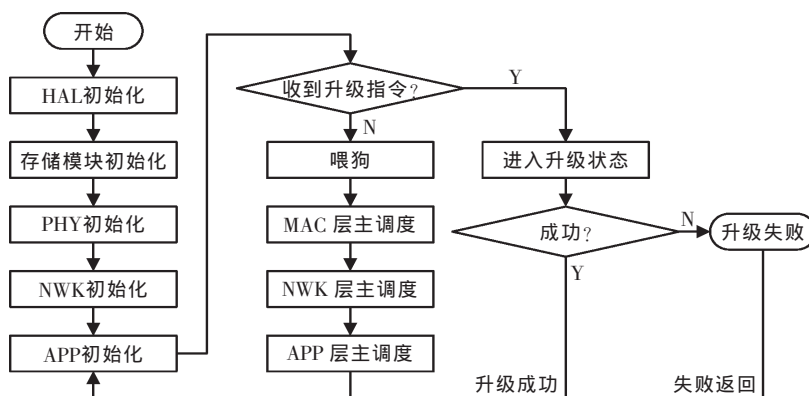


图6 终端系统工作流程

Fig.6 Terminal system workflow

4 结语

经过小批量测试以及现场使用情况,本系统终端可以为用户提供一个高可靠、实时快速的实时系统,具有广泛环境适应性,可以组成一个低成本新一代无线集中抄表系统。产品指标实现了中继深度不超过15级,单次通信延时不超过20s,最大支持1000个终端节点,组网时间不超过15min的采集系统。系统提供了便捷、经济、实用的解决方案,并能提供现在及将来一系列的增值功能和服务。

参考文献:

- [1] Nuvoton Technology Corporation. NUC100/120 Technical Reference Manual[R], 2012.
- [2] Silicon Laboratories. Si4430/31/32 ISM TRANSCEIVER[R], 2009.
- [3] 舒杰,曹建.基于MSP430F149与Si4432的无线传感器网络的实现方法[J].微型机与应用,2011,30(12):93-98.
- [4] 王晓峰,张旻.230MHz无线专网扩容及自组网技术研究[J].电力需求侧管理,2009,11(5):34-37.
- [5] 郑相全.无线自组网技术实用教程[M].北京:清华大学出版社,2004.

(上接第25页)下一阶段将考虑对基于距离的定位算法RSSI进行改进,提高定位精度,为救援工作提供科学的方案。

参考文献:

- [1] 张东,李长录,徐洋,等.基于ZigBee技术的煤矿安全监测系统设计[J].煤矿安全,2010(7):77-80.
- [2] 滕志军,屈银龙,王中宝,等.基于ZigBee的高压带电体温度在线监测系统[J].电工电能新技术,2011,30(3):80-83.
- [3] 段荣平,武君胜.基于带状通道的无线传感器网络定位算法[J].西北工业大学学报,2008,26(6):723-726.

- [4] 李文仲,段朝玉.ZigBee2006无线网络与无线定位实战[M].北京:北京航空航天大学出版社,2008:41-46.
- [5] 吕鑫,王忠.ZigBee无线数据传输模块的设计与实现[J].安徽师范大学学报,2010,33(4):332-335.
- [6] 苗连强,胡会萍.基于ZigBee技术的温室环境远程监测系统[J].仪表技术与传感器,2010(10):108-110.
- [7] 王延年,穆文静.基于ZigBee的无线信号采集传输系统的研究[J].西安工程大学学报,2010,24(4):510-515.
- [8] 庞海娟,赵建平.基于ZigBee技术的矿井人员管理系统设计[J].通信技术,2010,43(8):187-189.