

无人值守区域智能监测系统的架构设计与实现

李 慧¹ 张 可¹ 徐 良²

(电子科技大学电子科学技术研究院 成都 611731)¹ (电子科技大学通信与信息工程学院 成都 611731)²

摘 要 针对无人值守区域、环境恶劣区域的目标检测问题,提出一种基于智能检测的检测系统。创新点体现为现有方法的一个创新应用。对系统架构、系统设计(包括帧结构,软件硬件设计)进行了详细的阐述,并进行了测试。研究表明,该系统能满足大部分网络场景的应用要求。

关键词 ZigBee, 无线传感网, 无人值守区域, 监测系统

中图分类号 TP393.17 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.7.020

Architecture Design and Implementation of Intelligent Monitoring System in Unattended Operation Regions

LI Hui¹ ZHANG Ke¹ XU Liang²

(Research Institute of Electronic Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)¹

(School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)²

Abstract In this paper, a new detection system based on intelligence detection was proposed due to target monitoring acquirements in unattended operation regions and abominable environment. It is an innovation application of existing methods. The system architecture and design (including frame structure, software and hardware design) were described in detail and related tests were carried out. Experimental results show that the system meets the application of most of the network scenarios.

Keywords ZigBee, Wireless sensor network, Unattended operation regions, Monitoring system

1 引言

ZigBee 是近年来广泛应用于商业和科技的无线通信技术。它基于 IEEE802.15.4 协议^[1]。独有的特性^[2]使得它比蓝牙和 Wi-Fi 等其他无线通信更适用于低数据传输率和低能耗的应用^[3],如建筑和家庭的自动控制系统、可穿戴的医疗传感监控系统、森林火灾监控系统、图书馆温度智能控制系统^[4-7]等。

ZigBee 的特性可概括如下:低成本,较低的报文吞吐率;支持大型网络节点的数量级(不多于 65k 个节点);提供可选择的安全等级(采用 AES-128);数据传输率为 250kbps (2.4GHz)和 20/40kbps (868/915MHz);在 2.4GHz 工业、科学、医学频带(ISM 频带)为 16 个信道,在 915MHz ISM 频道为 10 个信道,在欧洲使用的 868MHz 频道为 1 个信道;采用 CSMA-CA(载波监听多信道接入/避免冲突)协议的信道共享多点接入技术;提供无信标操作;支持点对点、星型、树型和网状的网络拓扑。

区域监控指部署一定数目的传感节点到感兴趣的区域(如战场、博物馆之类的重要公共设施等),利用无线传感网络(Wireless Sensor Network, WSN)强大的监控能力,监控穿越

该重要区域的目标(如敌人或恐怖分子等),若发现目标则立即汇报。目前监控系统多应用于农业、车联网^[8]中,鲜有针对无人值守的偏远地区,而作为无线个人网中的低数据传输率协议,ZigBee 以低功耗、高可靠性、低复杂度见长,更能满足传感网中采集节点的需求。

本文即是针对无人区域实时监控的需求设计了自带 GPS 定位模块及多类型传感器的节点,同时通过 ZigBee 与 GPRS 方式将指定监控区域出现的报警实时传输给监控人员的系统。

本文第 2 节阐述系统架构,第 3 节详细介绍系统的软件设计和硬件设计;第 4 节展示测试结果并对其作分析;最后总结全文。

2 系统架构

2.1 ZigBee 通信协议

ZigBee 无线通信协议配备 IEEE802.15.4 标准和射频发射器以实现网络所需任务。IEEE802.15.4 标准为无线通信提供了物理层(Physical layer, PHY)和媒体接入控制层(Medium Access Control layer, MAC)协议。ZigBee 工作在 IEEE802.15.4 标准之上,提供了网络层(Network layer, NWK)和应用层

到稿日期:2015-06-03 返修日期:2015-08-22 本文受中央高校基本科研业务费项目(ZYGX2014J099)资助。

李 慧(1989-),女,硕士生,主要研究方向为无线传感网络,E-mail:shirfy@yeah.net;张 可(1979-),男,博士,副研究员,CCF 高级会员,主要研究方向为传感器网络、物联网、大数据等,E-mail:kezhang@uestc.edu.cn;徐 良(1989-),男,博士生,主要研究方向为 5G 移动蜂窝网络,E-mail:xuliang523@gmail.com。

(Application layer, APL)业务^[9],如图1所示。

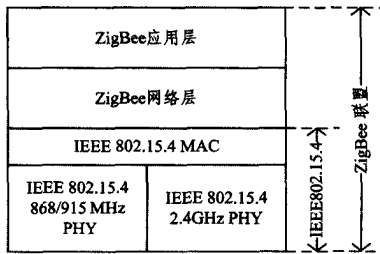


图1 ZigBee协议

上电后,被任命为协调器的设备主动进行能量扫描,选取信号最强、质量最好的信道进行无线通信。其他加入网络的设备则发送信帧请求给协调器。在所提出的系统中,带有红外热释电、震动传感器和GPS定位模块的节点为网络中的端设备,即检测节点;带有GPS模块和GPRS通信模块的节点被定义为协调器。

2.2 应用架构设计

系统由数个中继器及大量检测器构成,由协调器收集其通信范围内的端设备的检测结果信息并将其传入系统终端。

设备触发开关开始初始化后进入系统工作状态。通过自组网方式,协调器与周边的检测器通过成簇算法组成星形网络,协调器之间构成对等的网状网络。主机端开始工作后,可以实时显示所在系统监测区域的地图信息,标示各个传感器节点位置以及状态参数。

协调器工作流程如图2所示。协调器上电后进行能量扫描,选择无线信道并确定网络ID,接着进入无线监听模式。如若收到信号,则判断信息类型:若为新节点申请入网的消息,则通过请求并告知网络ID,分配节点地址等;若收到的为节点报警信息,则通过GPRS方式转发信息至移动终端;若收到的信息来自移动终端,则根据信息内容为重定位或回收蜂鸣报警,广播相应命令至下级所有检测节点。

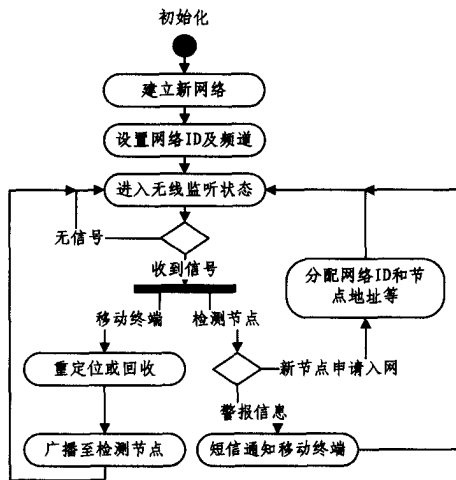


图2 协调器工作流程

系统的时序如图3所示。若有人员目标进入监测区域,则检测节点所携带的传感器(如红外传感器会触发),对目标进行定位,判决是否有人闯入监测区域,并将数据通过 Zig-Bee 通信协议传输到中继器节点,中继器通过通信模块将数据传输到主机进行分析与展示;若未被激发,则保持监测状态。若使用一段时间后需要回收节点或更换电池,则主机发布回收命令,协调器接收命令后广播给所有检测节点,检测节

点收到消息后进行蜂鸣报警,以便于附近的工作人员根据蜂鸣声快速辨认位置从而找到节点。

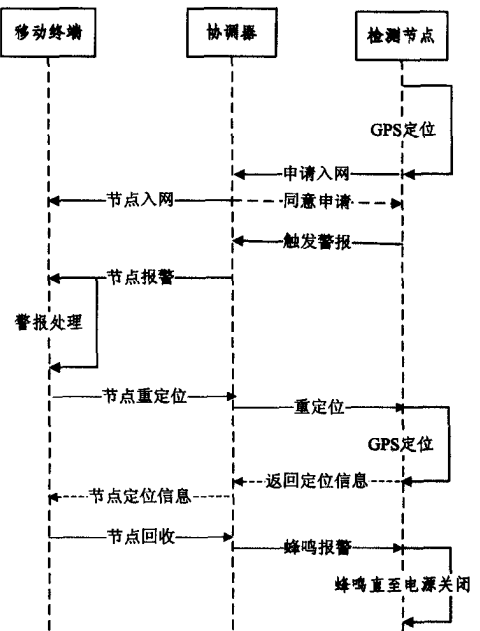


图3 系统时序

3 系统设计

3.1 通信帧设计

无人值守监测系统的运行过程涉及检测节点与协调器之间的通信、协调器与移动终端之间的通信。

协调器上电后组建新网络,新加入的检测节点进行GPS自定位,递交入网申请并获得同意后,为了节省电池电量,停止GPS模块供电(直到收到协调器重定位命令才会重新打开),接着将定位坐标及当前周围监控状态编辑成帧并发送至协调器,帧格式设计如图4所示。

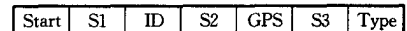


图4 端设备发送帧格式

协调器收到帧后将其转发至系统终端。终端以相同的协议解析帧内容。不同的帧域代表不同的内容,具体的帧信息解释见表1。

表1 帧域内容

帧域	具体内容
Start	帧头,以“%”代表帧开始,占1字节
S1	分隔符,以“!”紧接帧头后,占1字节
ID	端设备ID,人工设置,用于区分不同的检测节点,占3字节
S2	分隔符,以“#”紧接端设备ID后,占1字节
GPS	GPS定位信息,占30字节
S3	分隔符,以“\$”紧接GPS定位信息后,占1字节
Type	报警类型,占1字节,N代表无警报(第一次组网及重定位时使用);I代表红外报警;V代表振动报警

帧中不同的分隔符用于终端读取信息时截断内容。不同的检测节点以ID作为区分,ID后30字节为该节点GPS信息。本文使用ATK-NEO-6M模块,原GPS定位信息的基本格式如下:\$GPGGA,(1),(2),(3),(4),(5),(6),(7),(8),(9),(10),M,(11),(12)*hh(CR)(LF)。hh指校验和,CR和LF代表回车及换行。其中(1)为UTC时间,格式为hhmmss.ss;(2)为纬度,格式为ddmm.mmmmm(度分格式);

(3)为纬度半球 N 或 S(北纬或南纬);(4)为经度,格式为 dddmm.mmmmm(度分格式);(5)为经度半球 E 或 W(东经或西经);(6)为 GPS 状态,0 表示未定位,1 表示非差分定位,2 表示差分定位;(7)为正在使用的用于定位的卫星数量(00~12);(8)为 HDOP 水平精确度因子(0.5~99.9);(9)为海拔高度(-9999.9m~9999.9m);(10)为大地水准面高度(-9999.9m~9999.9m);(11)为差分时间;(12)为差分参考基站标号(0000-1023,首位 0 也将传送,若为非差分定位,则此项为空)。对于获取的基本格式定位信息,去掉不关心内容,将所需定位信息按指定格式放入 GPS 定位信息字节。

当需要对检测节点进行回收,或因某些原因节点进行了移动而需要重定位时,移动终端发出相应指令,协调器将其广播至所有节点,发送的帧格式如图 5 所示。

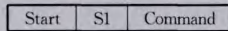


图 5 协调器广播帧格式

其中类似于图 4 中的帧域,图 5 中的帧域内容见表 2。

表 2 帧域内容

帧域	具体内容
Start	帧头,以“%”代表帧开始,占 1 字节
S1	分隔符,以“!”紧接帧头后,占 1 字节
Command	L 代表节点重定位,C 代表回收节点;占 1 字节

检测节点收到命令后以相同方式解读帧内容,若解读内容为 L,则重新对 GPS 模块进行供电并再次定位,同时再次发送图 4 信息;若解读内容为 C,则进行蜂鸣报警以帮助周围回收人员快速找到回收节点。

3.2 软件设计

本文采用 ZigBee 协议栈^[10] Z-Stack 完成软件开发。Z-Stack 符合 ZigBee 2006 规范,用户在使用过程中不用关心协议的具体实现细节,只需要通过调用 Z-Stack 的接口即可完成进一步的设计。

ZigBee 协议栈由一组子层构成,每层为其上一层提供一组特定的服务:一个数据实体提供数据传输服务,一个管理实体提供全部其他服务。每个服务实体通过一个服务接入点(SAP)为其上层提供服务接口,并且每个 SAP 提供了一系列的基本服务指令来实现相应的功能。

ZigBee 联盟提供了网络层和应用层,其中应用层框架包括了应用支持子层(APS)、ZigBee 设备对象(ZDO)和由制造商制定的应用对象。与常见的无线通信标准相比,ZigBee 协议所需体系紧凑而简单,在实际运用中对系统要求很低:硬件部分至少需要 8 位处理器;软件需要 32kB 的 ROM,最小软件需要 4kB 的 ROM;网络主节点需要更多的 RAM 以容纳网络内所有节点的设备信息、数据包转发表、设备关联表和密钥存储等。

3.3 硬件设计

TI 公司提供的单芯片方案主要是将 RF 和 MCU 集成在一块芯片上,此种方案空间占用小、开发简单方便,主要有 CC2431,CC2430,CC2530 等。

本文硬件设计采用以 CC2530 为核心的芯片作为 MCU,ATK-NEO-6M 作为 GPS 模块,ATK-SIM900A 作为 GPRS 模块,附带红外热释电及振动传感器,并设计外围电路。

CC2530 是一颗真正的片上系统(System-On-Chip, SOC)^[11],用于 WSN 的 ZigBee 解决方案。它继承了 CC2430 低成本、低功耗的特性,结合了一个高性能的增强型 8051 控制器、128k 闪存存储器、8kB ARM 和许多其他强大的功能。

基于 CC2530 的外围电路设计原理图如图 6 所示。

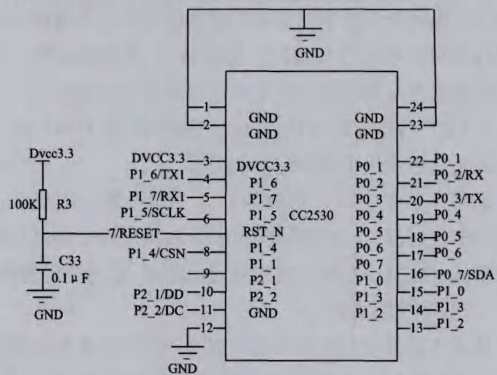


图 6 CC2530 外围电路设计原理图

其中,系统使用 P0_4,P1_2,P1_3 口连接红外热释电传感器,P0_7 口连接振动传感器,P0_5 用于连接 GPS 定位模块。

在红外探测器前方的菲涅尔透镜和放大电路相配合,设计侦测 13m 范围内的人的行动。人体辐射的红外线中心波长为 9 μ m~10 μ m,而探测元件的波长灵敏度在 0.2 μ m~20 μ m 范围内几乎稳定不变。红外热释电传感器主要用于检测指定范围内人的行动。

振动传感器主要完成入侵人员检测、探测等功能,可以用于对目标的初次判决,也可作防移动检测节点之用。

GPS 模块核心采用 NEO-6M 模组,具有 50 个通道,测量输出频率最高可达 5Hz,外型小巧(25.5mm * 31mm),模块通过 5 个 2.54mm 间距的排针与外部连接。

ATK-SIM900A 模块板载工业级双频 GSM/GPRS 模块 SIM900A,工作频段为双频:900/1800MHz,可以低功耗实现语音、SMS(短信,不支持彩信)、数据和传真信息的传输,模块支持 RS232 串口和 LVTTTL 串口,支持 5V~24V 的超宽工作范围。

设计并实现的测试硬件如图 7 所示。

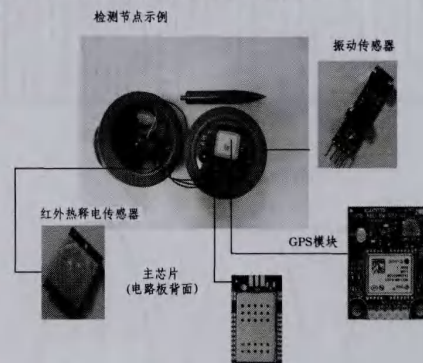


图 7 硬件实现

4 测试方案与结果

WSN 的测试分类主要包括一致性测试、功能性测试、性

能测试和系统测试等内容。结合本文的监测系统架构,将针对用户的测试需求总结为以下内容。

(1)标准的符合性测试:实现由不同的设备厂商提供的网络传感器设备之间的互联互通而进行的相关符合性测试;

(2)远程测试:在环境条件比较恶劣、无人区域、军事监控区域以及森林等条件下部署的传感器网络具有当前任务的不确定性和可能面临各种情况威胁的特点,远程测试即是为了确定传感器网络能否完成所需的应用而进行的测试;

(3)用户特殊需求测试:测试传感器网络在具体行业应用中是否满足用户提出的特定功能需求。

采用4个节点(1个协调器和3个端设备),围绕 ZigBee 通信功能进行测试;结合系统应用环境,重点设计并进行基本功能测试、信道选择测试、室内外通信测试、室内障碍物测试。

(1)基本功能测试

基本功能测试主要用来验证被测的网络设备是否能够正常执行其预期的各项功能,主要包括数据采集、传输、存储、控制管理及面向上层用户等功能。本文中的应用需要实现供电后自组网、自定位以及实时检测指定区域警报状况并转发报警等功能,支持重定位与节点回收。

实验选择在户外空旷场地上对 ZigBee 的 11 信道进行测试。数据包大小为 40 字节,单节点触发频率不超过 10 次/min,系统整体触发报警次数不超过 20 次/min。

实验结果表明,每个检测节点配备的红外热释电传感器可测出 13m 范围内人的行动并报警,系统的报警延时来自 GPRS 传输时延,平均时延低于 10s(当协调器与移动终端配备相同运营商的 sim 卡时延迟最小),系统能够很好地应用于无人区监控场景。

(2)信道选择测试

由于 ZigBee 和 Wi-Fi 等设备使用的都是 ISM 频道,选择信道时可能有重合或覆盖^[12,13],且由于 ZigBee 为低功耗、低功率设备,易受周边信号干扰,为了避免信道干扰,进行信道选择测试。Wi-Fi 与 ZigBee 的 RF 频谱如图 8 所示。

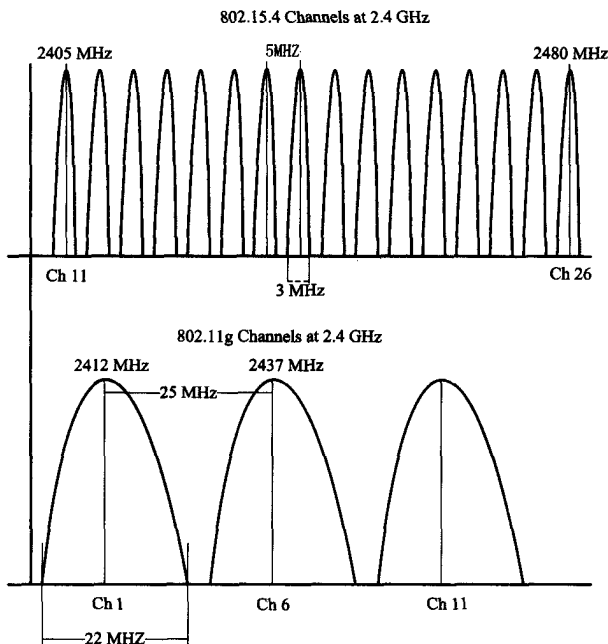


图8 ZigBee 和 Wi-Fi 频谱图

选择存在较多信号干扰的实验室作为实验环境,对 ZigBee 的 11 信道至 26 信道分别进行测试。测试环境如图 9 所示。

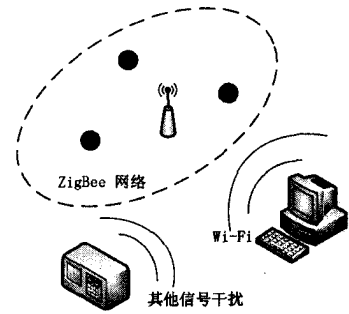


图9 Wi-Fi 环境测试

观察在大约 1000 个包情况下的 PER (Packet Error Rate),数据包大小为 12 字节。实验结果如表 3 所列。

表3 ZigBee 信道的 PER 测试结果

信道	包/PER	信道	包/PER
11	1218/0.00%	19	1030/0.42%
12	1072/0.39%	20	1060/0.18%
13	1066/10.36%	21	1055/0.37%
14	1143/20.49%	22	1095/0.95%
15	1102/5.31%	23	1040/2.64%
16	1160/0.19%	24	1047/0.08%
17	1150/2.02%	25	1025/2.34%
18	1105/0.00%	26	1193/4.24%

由表中数据可见,实验室 Wi-Fi(或者其他科研设备)多半使用中心频率为 2412MHz、带宽为 22MHz 的信道。由于 Wi-Fi 发射功率更大,ZigBee 设备通信质量易受影响^[14]。由表中 ZigBee 的 11-15 信道的数据也可知道,当 ZigBee 信道与 Wi-Fi 使用的信道接近时,PER 急剧上升,通信质量下降。同时传输数据包的大小也影响 PER,为减小碰撞率,实际应用中的通信包也应尽量使用简洁的数据表达,避免冗长冗余包。若网络需要较好的通信效果,可转换至较为空闲、少干扰的信道。

为减小信道干扰,以下的室内外通信测试和障碍物测试均选择 ZigBee 的 11 信道。

(3)室内外通信测试

由于 ZigBee 通信质量与周边环境有关,为了描述环境对通信的影响,设置了室内外通信测试。测试场景如图 10 所示。

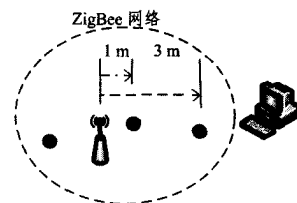


图10 室内外测试场景

每个端设备以 400ms 为间隔不断给协调器发送数据,数据包大小为 12kB。协调器和端设备间距最近 1m,最远 3m。

室内测试场景选择实验室,室外测试场景选择广场。室内外通信分组错误率如图 11 所示。

实验结果显示,室外通信质量较室内通信质量更优良。

图 11 中上方带菱形连线代表室内通信 PER, 下方带方块连线代表室外通信 PER, 可见在无大型障碍物阻挡且无信道干扰的情况下, ZigBee 的通信可靠性非常可观。其中室内平均 PER 仅为 0.38%, 而室外 PER 更是低至 0.07%。

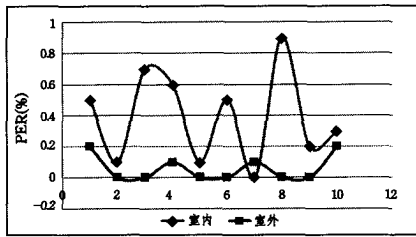


图 11 室内室外 PER 分析

(4) 室内障碍物测试

考虑到本文设计的应用场景为偏远无人的地区, 在森林等地区有大树、岩石等阻挡物, 设计室内障碍物测试。分别测试 ZigBee 设备在室内相隔 1 堵墙和 3 堵墙(墙与墙之间相隔 5m)的通信情况, 协调器与墙、墙与终端节点之间距离均在 1m 以内。测试场景为实验室, 实验布置图如图 12 所示。

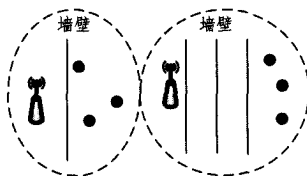


图 12 室内障碍物测试场景

统计约 1000 个数据包在通信过程中产生的 PER, 如图 13 所示。

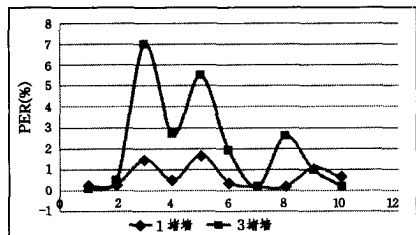


图 13 室内障碍物 PER 分析

由图 13 中数据可知, ZigBee 网络通信的 PER 非常低, 即使在协调器和端设备相隔数道墙的情况下, 平均 PER 依然低于 3% (其中相隔 1 道墙时平均 PER 约为 0.67%, 相隔 3 道墙时 PER 上升为 2.2%), 由此可得基于 CC2530 的 ZigBee 网络具有良好的通信质量和可靠性。

实验结果表明, 所搭建的无人值守区域监测系统, 在无大型障碍物的情况下室外通信质量优良, 在有障碍物阻挡的情况下其通信可靠性也满足大多情景的通信需求 (PER 低于 3%); 室外的通信效果优于室内, 且应根据周围其他使用 ISM 频道的设备的使用情况来选择信道, 提高通信质量; 通过对测试过程的研究和分析发现, 测试环境的构建与选择较为复杂, 测试结果与周围无线环境使用状况和测试的时间等诸多因素均有关。

结束语 本文通过对 ZigBee 协议的研究, 提出了应用于无人值守区域的新的体系架构, 并进行了详细设计、硬件实现

和实际测试, 为智能监控技术向实时性、高可靠性方向发展提供了一定的参考。

参考文献

- [1] ZigBee Alliance Std. ZigBee Specification (ZigBee Document 053 474r06 Version 1.0) [R/OL]. http://www.eet-China.com/ARTICLES/2006AUG/PDF/ZigBee_01.pdf
- [2] Wheeler A. Commercial applications of wireless sensor networks using ZigBee [J]. *Communications Magazine, IEEE*, 2007, 45 (4): 70-77
- [3] Baker N. ZigBee and Bluetooth strengths and weaknesses for industrial applications [J]. *Computing & Control Engineering Journal*, 2005, 16(2): 20-25
- [4] Khusvinder G, Yang Shuang-hua. A ZigBee-based home automation system [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2009, 55(2): 422-430
- [5] Malhi K, Mukhopadhyay S C, et al. A ZigBee-based wearable physiological parameters monitoring system [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(3): 423-430
- [6] Song Zhe-cun, Chen Ning, Li Di-fei. Application of Zigbee Wireless Sensor Technology in Forest Conflagration Surveillance [J]. *Process Automation Instrumentation*, 2011, 32 (4): 50-52 (in Chinese)
宋哲存, 陈宁, 李迪飞. ZigBee 无线传感技术在森林火灾监测中的应用 [J]. *自动化仪表*, 2011, 32(4): 50-52
- [7] Chang Kai, Xue Dong-liang, Sun Qiang, et al. Research and Design of Temperature and Humidity Intelligent Control System in Library [J]. *Computer Science*, 2014, 41 (11): 436-439 (in Chinese)
昌凯, 薛栋梁, 孙强, 等. 图书馆温湿度智能控制系统研究与设计 [J]. *计算机科学*, 2014, 41(11): 436-439
- [8] Fan Qing-gang, Ye Xue-mei, Cai Yan-ning. Performance Evaluation of Zigbee Routing Protocol in VANET Monitoring System [J]. *Computer Science*, 2014, 41(6): 326-328 (in Chinese)
范青刚, 叶雪梅, 蔡艳宁. ZigBee 路由协议在车载自组网监控系统中的性能研究 [J]. *计算机科学*, 2014, 41(6): 326-328
- [9] Cuomo F, Abbagnale A, Cipollone E. Cross-layer network formation for energy-efficient IEEE 802.15.4/ZigBee Wireless Sensor Networks [J]. *Ad Hoc Networks*, 2013, 11(2): 672-686
- [10] Texas Instrument. Z-Stack Developer's Guide (Document Number: SWRA176) [OL]. <http://www.ti.com.cn>
- [11] Texas Instrument. CC2530 Datasheet [OL] <http://www.ti.com.cn>
- [12] IEEE Computer Society. IEEE Standards for Local and Metropolitan Area Networks: Overview and Architecture [S/OL]. <http://www.ieee802.org/1/files/public/docs2013/802-rev-D1T-CMP.pdf>
- [13] Shuaib K, Boulmalf M. Co-existence of ZigBee and WLAN, a performance study [C] // *International Conference on Wireless and Optical Communications Networks*. 2006: 1-6
- [14] Vinay S, Rahul S, Singh T M. An Analytical Study of Interference Problem between ZigBee and WI-FI [C] // *International Conference on Communication Systems and Network Technologies*. 2013: 257-261