

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2014.04.018

# 针对建筑群监控的无线传感器网络设计

刘丹<sup>1,2</sup>, 龙永红<sup>1</sup>, 罗斌<sup>2</sup>, 黄晓峰<sup>1</sup>, 石伟<sup>1</sup>

(1. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007;  
2. 北京市农林科学院 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097)

**摘要:** 现代建筑群结构复杂、楼层多, 对其实现集中监控的无线传感器网络的网络容量需求大, 且在多障碍物的复杂环境下保障无线通信链路具有一定难度。通过分析对比现有主要无线通信技术的特点, 设计了一种融合 Zigbee 技术与 433 MHz 射频通讯技术的无线传感器网络模型, 其中 Zigbee 网络的实现采用 TI 公司的 Z-STACK 协议栈和 CC2530 Zigbee 模块, 433 MHz 射频通讯模块选用 RFM69H。试验结果表明, 该传感器网络能实现半径约 600 m 的区域内建筑群覆盖, 丢包率低于 5%, 能保障较好的网络服务质量 (Qos), 整个网络通信在 ISM 频段, 成本低, 具有一定应用前景。

**关键词:** 建筑群; 监控; 无线传感器网络; Zigbee; 433 MHz

中图分类号: TN98

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2014)04-0081-05

## Design of Wireless Sensor Network for Buildings Monitoring

Liu Dan<sup>1, 2</sup>, Long Yonghong<sup>1</sup>, Luo Bin<sup>2</sup>, Huang Xiaofeng<sup>1</sup>, Shi Wei<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;  
2. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

**Abstract:** The structure of modern buildings is complex and high-rise, and the wireless sensor network (WSN) for centralized monitoring of the buildings must have a large network capacity, and there is certain difficulty in wireless communication link security under the complex multi obstacles environment. Designed a wireless sensor network model integrating Zigbee technology and 433 MHz radio communication technology, in which Zigbee network using the Z-STACK protocol and CC2530 Zigbee module of TI company and the 433 MHz radio communication module using RFM69H. The test results show that this WSN can cover a building area of a radius of 600 m, the packet loss rate is less than 5% and promises a good network service quality (Qos). The network communication is at ISM band with low cost, and the WSN has a good application prospect.

**Keywords:** buildings; monitoring; WSN; Zigbee; 433 MHz

## 0 引言

随着经济的快速发展, 现代楼宇的建造不断趋

向于高层化、结构复杂化、集群化 (如各种大型商场、小区), 这给楼宇环境的集中监控带来了新的难点。使用有线传感器组成的监测网络布线量大、安

收稿日期: 2014-03-24

基金项目: 湖南省教育厅科研基金资助项目 (13C057)

作者简介: 刘丹 (1988-), 男, 湖南益阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为无线传感器网络, 数据采集系统应用, E-mail: 541411392@qq.com

装和维护费用高,并且在复杂建筑物中的某些地方无法布线,而无线传感器网络(wireless sensor networks, WSN)<sup>[1]</sup>很好地解决了这些问题。然而要构建一个现代建筑群环境的集中监控无线传感器网络,首先需要有较大的网络容量(一般超过 $10^3$ 个传感器节点),同时在建筑群中多障碍物的复杂环境下,需要保持通信链路较高的可靠性和一定的通讯距离。

目前,许多小型的无线传感器网络得到了成功部署和应用<sup>[2-3]</sup>,然而这些应用的网络规模都比较小、覆盖面不理想。文献[4]提出了一种基于 Zigbee 规范构建大规模无线传感器网络的“两层”组网策略,理论上可支持 $16 \times 65 \times 536$ 个节点,具有较大的网络容量,然而在实际应用中由于 Zigbee 网络性能等问题,其网络节点数大打折扣,覆盖区域有限,无法适应多楼宇建筑群集中监控。无线传感器网络在现代楼宇监控中的应用,已经有许多学者开展了研究并取得了一定的成果,但大多是针对某一特定的单一建筑,针对多楼宇的建筑群集中监控的大规模无线传感器网络还没有成熟的实现方案。

针对上述问题,深入分析现有主要无线通信技术,构建了一种针对建筑群环境集中监控的大规模无线传感器网络:根据 Zigbee 规范多信道(共16个信道)的特点并结合频率复用实现底层数据采集 Zigbee 网络大范围覆盖,以每个 Zigbee 网络的协调器为簇头在 433 MHz 频段组建高层数据传输网络,实现 Zigbee 个域网(personal area network, PAN)间的协作,构建对建筑群环境的集中监控网络。

## 1 无线通信技术规范选择及分析

为了构建一个具有较大覆盖面积的大规模无线传感器网络,必须选择可行的技术平台。图1为现有可应用于无线传感器网络的典型无线技术规范,它们包括:802.11 a/b/g, Bluetooth, Zigbee 等。

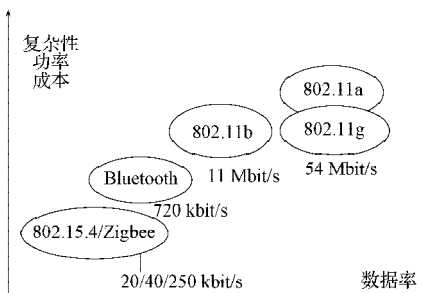


图1 几种典型的无线通信技术比较

Fig. 1 Comparison of several typical wireless communication technologies

经过深入分析对比,仅有基于 802.15.4 的 Zigbee 规范支持 mesh 拓扑结构,可以保证较大的网络规模;另外它的能量开销也较小;有保证可靠传输的机制(完全握手机制);有保证安全通信的能力(支持 AES-128 加密算法);低功耗、低复杂度和低成本的特点,也使得 Zigbee 规范非常适合 WSN 方面的应用,并且 Zigbee 技术通讯在 2.4 GHz 的 ISM 频段,无需申请频段使用执照。

Zigbee 中定义了 3 种节点类型:协调器、路由器和终端设备。其中协调器(Zigbee coordinator, ZC)负责网络的组建和管理;路由器(Zigbee router, ZR)负责提供路由路径;端设备(Zigbee end device, ZED)主要实现数据的采集。Zigbee 规范可以支持星型、树型和网状网络拓扑结构,采用 64 位 IEEE 地址和 16 位短地址空间,理论上可以最多支持 $65 \times 536$ 个网络节点。然而,由于网络性能等方面的需求,在实际组网中存在一些约束,很难达到这么高的网络容量。

另外,由于 Zigbee 技术是通信在 2.4 GHz 频段,根据波长的计算公式: $\lambda=c/f$ (其中 $\lambda$ 为波长, $c$ 为光速, $f$ 为频率),2.4 GHz 无线电波的波长约为 0.125 m,根据波的衍射特性,当波长大于或相当于障碍物的尺寸时,波才能明显地绕到障碍物的后面,因而当遇到尺寸大于 0.125 m 的障碍物时 2.4 GHz 频段的无线信号传播受到严重影响,而同样处于 ISM 频段的 433 MHz 射频通讯则在穿越障碍物能力上要强于 Zigbee 技术,约为其 5.5 倍;同时,根据无线电信号空间自由空间传输损耗公式<sup>[5]</sup>为

$$L_{bf}=32.5+20\lg F+20\lg D,$$

式中: $L_{bf}$ 为自由空间损耗, dB;  $D$ 为距离, km;  $F$ 为频率, MHz。在传播相同的距离时,433 MHz 无线电波的衰减要小于 2.4 GHz。根据实际的测试结果,在同等条件下(收发天线增益大小相同、发射功率大小相同,未加功放)在有一层混凝土墙阻碍时, Zigbee 模块收发距离仅在 5 m 左右,而 433 MHz 射频模块能达到 700 m 左右。

根据以上分析, Zigbee 技术规范易于组建较大规模的无线传感器网络,且网络拓扑结构灵活,但是其在 2.4 GHz 的无线信号穿越障碍物能力差、通讯距离短;而 433 MHz 射频通讯具有相对较强的障碍物能力和较好的通讯距离,却不易于直接用来组建大型无线通信网络。

## 2 融合多频段通信的无线传感器网络构建

根据前面的分析知道,虽然 Zigbee 通信技术适

合WSN方面的应用,但是单一的Zigbee网络无法满足大规模传感器网络容量的要求,而其2.4 GHz的通信频段在障碍物多的楼宇复杂环境中不利于实现大面积的网络覆盖。为解决以上问题,结合Zigbee技术规范 and 433 MHz射频通信的特点,设计了一种通讯在2个频段的传感器网络组网策略和模型。

### 2.1 基于Zigbee规范的2.4 GHz频段组网策略设计

Zigbee网络的组建采用符合Zigbee通信规范的TI公司的Z-STACK协议栈,其在物理层是采用直接序列扩频(direct-sequence spread-spectrum, DSSS)技术,将2.4 GHz频段划分成了16个不同的信道,各个信道编号依次为11~26。不同信道间不能进行通信,这样,就可以在每个信道上部署1个域网(PAN),即使它们都是符合Zigbee规范的同构Zigbee网络,也不会对彼此的通信造成干扰,因而在同一个区域就可以存在多个PAN。可以在同一栋楼宇内采用多个通信在不同信道的Zigbee网络实现楼宇的覆盖,这样避免了在一个网络中拥有过多的网络节点,从而大大提高网络性能,如全网组建时间、数据时延、误码率降低等。

另外,频率复用理论指出:频率复用就是重复使用频率,使同一频率覆盖不同的区域(一个基站或该基站的一部分(扇形天线)所覆盖的区域),这些使用同一频率的区域彼此需要相隔一定的距离(称为同频复用距离),以满足将同频干扰抑制到允许的指标以内。前面提到了一般的Zigbee模块的通信距离在有一层混凝土墙阻碍时收发距离仅5 m左右,因此根据频率复用理论,可以在建筑群内每间隔一定的距离重复使用同一个某信道的Zigbee PAN而互不影响,这样可以大大增加网络的容量和频段的利用效率。

然而上述的各个PAN间不能完成直接的通信,为了构建一个集中的无线传感器监控网络,可以引进一个数据集中器/网关(gateway)设备,实现PAN间的协作,将区域内的所有PAN整合在一起。

### 2.2 融合多频段无线通信的组网模型

根据前面的分析以及组网策略,本文设计了一种通讯在两频段的组网模型,如图2所示。图3是对应的网络拓扑结构。

该模型首先是采用通信在2.4GHz的Zigbee技术规范完成大规模数据采集网络的搭建,它由多个Zigbee数据采集网络组成;各个Zigbee网络的协调器作为网关的子节点在433 MHz频段完成数据汇集层的网络实现,从而组建成一个适合建筑群环境集中监控的大规模无线传感器网络。理论上,每个

Zigbee网络的节点数可以达到65 536个,因而本文设计的网络模型容量理论上可以达到65 536的若干倍。

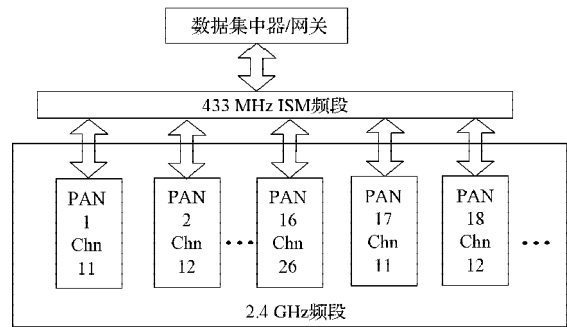


图2 融合多频段通信的网络模型

Fig. 2 Fusion of multi band communication network model

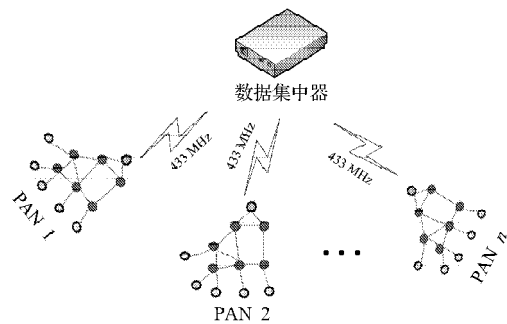


图3 网络拓扑结构

Fig. 3 The topology of the network

## 3 网络的实现

在Zigbee网络的设计中,Zigbee芯片选用TI公司的CC2530,该芯片是专门IEEE802.15.4协议和Zigbee应用的单片机芯片解决方案,整合了全集成的增强型8051微控制器,8 kB的RAM和5通道DMA,32 kHz睡眠定时器等功能和外设。它可以直接用来采集一些基本传感器数据(如CO、温湿度、烟雾传感器等),还可以驱动射频模块而不需增加专门的微控制器,降低了硬件复杂度和设计成本。Zigbee组网的软件设计在TI公司的符合Zigbee规范的协议栈Z-STACK基础上进行,该协议栈支持星型、树状、网状拓扑结构,可以通过软件设置相关的网络参数,如在本设计中通过定义NWK\_MODE\_MESH组建网状网络;为防止意外掉电丢失网络信息,可以使能NV\_RESTORE等。

为实现433 MHz频段的网络层,需要给每个Zigbee网络的协调器配置一个射频通信模块和一个带有微控制器、射频模块的数据集中器/网关设备。通过选型对比,射频通信模块选用深圳惠怡华普电子的RFM69H无线射频收发模块。该模块最大发射功率为20 dBm,最大接收灵敏度可达-120 dBm,支

持315/433/868/915 MHz 4个频段,接口简单,MCU可通过SPI接口进行编程配置,通过实际测量,RFM69H的室外通信的可视距离能稳定地达到700 m以上,可绕过一般的混凝土墙14堵;数据集中器/网关实现433 MHz频段组网,完成对各个采集网络的数据处理,需要有较高性能的微控制器,本文采用ARM公司的STM32系列32 bit闪存微控制器,它具有Cortex-M3内核,工作频率最高可达85 MHz。STM32系列微控制器丰富的增强I/O端口和连接到2条APB总线的外设方便数据集中器。另外,要完成各个PAN在

433 MHz频段的数据汇集层网络的组建,必须有自己的通信协议。本文所设计的数据帧格式如表1所示。数据帧由同步码、头码、源地址、目标地址、控制码、功能码、数据长度、数据、和校验组成,各个协调器加入数据集中器组建的网络时需要进行对码操作,对码成功后各个Zigbee网络的协调器就可以周期性地向数据集中器汇报其所在网络中的各个采集节点信息,包括各个传感器节点的位置信息和采集的数据信息。

表1 433 MHz频段的数据帧格式

Table 1 Data frame format of 433 MHz band

	前导码	头码	源地址码	目标地址	控制码	功能码	数据长度	数据 1	...	数据 n	结束码
字节数	2	2	3	1	1	1	1	1	...	1	1
数据	2D,D4	AA,55									

## 4 实验测试与分析

以深圳飞比公司的Zigbee开发套件为基础,对其进行改造后,完成了对本文设计的网络模型验证。

具体测试过程如下。如图4,在湖南工业大学电气与计算机楼中的两层分别布置通讯在第11信道和第12信道的Zigbee网络一和Zigbee网络二;在间隔约20米的隔壁土木机械楼的两层同样布置了通讯,在第11信道和第12信道的Zigbee网络一和Zigbee网络二;数据集中器摆放在电气计算机楼的一楼门卫室;其中4个Zigbee网络的协调器均接有RFM69H射频模块,每个Zigbee网络均有6个网络节点。数据集中器可以周期性地收到各个Zigbee数据采集网络的数据,为方便观察,数据集中器收到数据后通过串口发送到计算机上显示。实验测试收到的数据情况如图5所示。

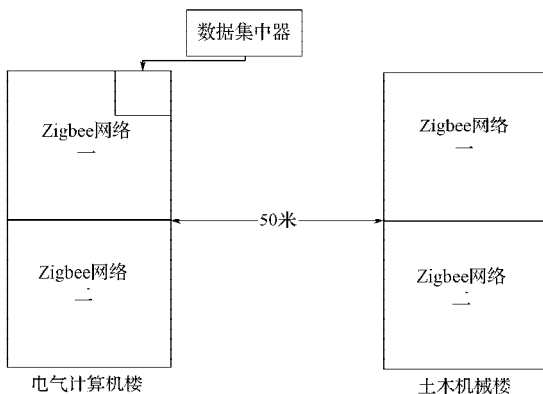


图4 实验网络布局示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the experimental network layout

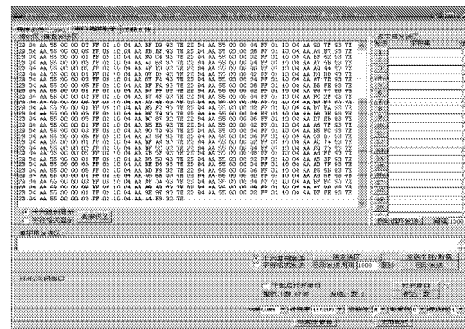


图5 串口助手显示传感器数据采集情况

Fig. 5 Assistant serial display of sensor data acquisition

根据图5中显示的接收数据表明,数据集中器会周期性收到数据,选取第一帧数据(2D D4 55 00 03 FF 01 10 04 AA BF D9 93 7E)分析其结构:其中2D D4为同步码,AA 55为头码 00 00 03是指传感器节点的地址,FF为数据集中器地址,01 10分代表控制码和功能码,04为指采集数据长度是4个字节,AA BF A9 93为节点采集的数据内容,7E为数据帧结束码。从以上分析知道传感器网络按照既定的通信协议进行了通信,表明分布于两栋楼内的网络节点均会定期地通过协调器向数据集中器汇报采集数据,证明了该无线传感器网络方案的可行性。另外,当把位于土木机械楼的2个Zigbee网络布置到约600 m外的公共教学楼时,发现数据集中器的数据收集正常,丢包率能保持在小于等于5%的水平,然而当把网络布置到稍远的位置时,发现集中器数据收集出现严重的丢包现象(高于70%)。因此表明,该无线传感器网络能稳定地实现区域半径约600 m范围的覆盖。

## 5 结语

基于 Zigbee 技术规范和 433 MHz 射频通信, 构建了一种通信在 2 个频段的无线传感器网络模型, 该传感器网络模型结合了 Zigbee 技术组网灵活、网络容量大和 433 MHz 射频通信穿越障碍物能力较强的特点, 试验结果表明该传感器网络能实现半径约 600 m 的区域内建筑群覆盖, 丢包率低于 5%, 能保障较好的网络服务质量 (QoS), 适合现代生活小区、大型企业或商场建筑群环境的集中监控, 且整个网络通信在 ISM 频段, 成本低, 具有一定应用前景。但是该网络模型仍然需要进行进一步地改进研究, 如 433 MHz 频段通信协议的完善、网络内节点定位问题的研究等。

### 参考文献:

- [1] 张少军. 无线传感器网络技术及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 3-15.  
Zhang Shaojun. Wireless Sensor Network Technology and

Application[M]. Beijing: Chinese Power Press, 2010: 3-15.

- [2] 司海飞, 杨终, 王珺. 无线传感器网络研究现状与应用[J]. 电机工程, 2011, 28(1): 16-28.  
Si Haifei, Yang Zhong, Wang Jun. Review on Research Status and Application of Wireless Sensor Networks[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2011, 28(1): 16-28.
- [3] Martinez K, Hart J K, Ong R. Environmental Sensor Networks[J]. IEEE Computer, 2004, 37(8): 50-56.
- [4] 成小良, 邓志东. 基于 Zigbee 规范构建大规模无线传感器网络[J]. 通信学报, 2008, 29(11): 158-164.  
Cheng Xiaoliang, Deng Zhidong. Construction of Large Scale Wireless Sensor Network Using ZigBee Specification [J]. Journal of Communication, 2008, 29(11): 158-164.
- [5] Rappaport T S. 无线通信原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 48-70.  
Rappaport T S. Wireless Communication Principle and Application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012: 48-70.

(责任编辑: 申剑)

(上接第 60 页)

- Multispectral Three-Dimensional Quantitative Photoacoustic Tomography[J]. Iop Publishing, 2013, 15(5): 055302.
- [2] 徐晓辉, 李晖. 生物医学光声成像[J]. 物理, 2008, 37(2): 111-119.  
Xu Xiaohui, Li Hui. Photoacoustic Imaging in Biomedicine [J]. Physics, 2008, 37(2): 111-119.
- [3] Wang X, Xie X, Ku G, et al. Non-Invasive Imaging of Hemoglobin Concentration and Oxygenation in the Rat Brain Using High-Resolution Photoacoustic Tomography[J]. Journal of Biomedical Optics, 2006, 11(2): 024015.
- [4] Yang X M, Maurudis A, Gamelin J, et al. Photoacoustic Tomography of Small Animal Brain with a Curved Array Transducer[J]. Journal of Biomedical Optics, 2009, 14(5): 054007.
- [5] Li Changhui, Aguirre A, Gamelin J, et al. Real-Time Photoacoustic Tomography of Cortical Hemodynamics in Small Animals[J]. Journal of Biomedical Optics, 2010, 15(1): 010509.

- [6] Xing Wenxin, Wang Lidai, Konstantin Maslov, et al. Integrated Optical and Acoustic-Resolution Photoacoustic Microscopy Based on an Optical Fiber Bundle[J]. Optics Letters, 2013, 38(1): 52-54.
- [7] Bell A G. On the Production and Reproduction of Sound by Light[J]. American Journal of Sciences, 1880, 20: 305-324.
- [8] 杨迪武. 快速多元光声成像系统及重建算法研究[D]. 广州: 华南师范大学, 2008.  
Yang Diwu. Research on Fast Multi-Element Photoacoustic Imaging Systems and Reconstruction Algorithms[D]. Guangzhou: South China Normal University, 2008.
- [9] 罗海霞, 刘斌, 龙永红, 等. 同态滤波在光照补偿中的应用[J]. 湖南工业大学学报, 2008, 22(5): 23-27.  
Luo Haixia, Liu Bin, Long Yonghong, et al. Application of Homomorphic Filtering in Illumination Compensation [J]. Journal of Hunan University of Technology, 2008, 22(5): 23-27.

(责任编辑: 申剑)

