

基于物联网的大气环境 PM_{2.5} 实时监测系统

王建荣, 邱选兵, 李传亮, 魏计林, 徐 栓, 王晓锦, 罗炯天

(太原科技大学 应用科学学院, 太原 030024)

摘 要:大气环境中可吸入颗粒物(PM_{2.5})的实时监测是评价大气颗粒物的重要指标之一。基于物联网技术开发了 PM_{2.5} 浓度检测系统。采用光散射法的 PM_{2.5} 传感器获得大气环境中的 PM_{2.5} 浓度值。传感器通过 WiFi 无线网络与网络路由器(WiFi 热点)连接,网络路由器通过 3G/4G 移动网络与远程嵌入式 ARM-Linux 服务器连接。服务器基于 C/S(客户端/服务器)模式实现了计算机与移动设备实时数据的查询。实验结果表明,该系统具有巡检时间短(20 s)、自组织、多节点、灵敏度高等优点。

关键词:物联网;PM_{2.5};实时监控;嵌入式系统;WiFi 通信

中图分类号:TP277

文献标志码:A

大气是人类赖以生存的基本环境要素^[1],近年来,随着我国经济的高速发展,在以北京等为首的我国北方大中城市中,大气环境污染问题日趋突出,大气细颗粒物 PM_{2.5} 污染已凸显为重大的环境问题^[2-3],特别是雾霾天气持续大范围的出现已对民众身心健康造成了极大的影响,因此大气环境污染的治理已被纳入了国家计划,以消除人民群众的“心肺之患”^[4]。研究表明,大气可吸入颗粒物增加是导致人类死亡率上升的重要原因之一,因此准确实时监测 PM_{2.5} 迫在眉睫^[5]。

目前 PM_{2.5} 检测方法主要包括:称重法、 β 射线法、振荡天平法、 β 射线光浊度法和光散射法,其中称重法是传统测量方法,速度慢,需要人工干预。光散射法具有适用性广、所需的物理参数少、能测量颗粒粒径分布和速度快等优点^[6],已成为颗粒物检测仪的发展趋势。由于现场的 PM_{2.5} 节点多,不易布线,数据传输方式复杂,静态路由辅助移动感知终端进行数据传输成为分布式监控系统的首选^[7],因此本文在现有的移动通信网络基础上构建了基于物联网的 PM_{2.5} 实时检测系统。该系统采用集成光散射法的 PM_{2.5} 传感器采集现场 PM_{2.5} 浓度,通过 WiFi 将数据传输给配置成 WiFi 热点的网络路由器。网络路由器将收集到的 PM_{2.5} 网络节点数据通过移动网络传输给监控中心的嵌入式服务器。用户利用计算机或基于 Android 手机来终端查询服务器中的 PM_{2.5} 历史数据或实时数据。

1 监测系统总体方案

本系统包含检测节点(传感器)、网络路由器(WiFi 热点)、移动网络、服务器与客户端 5 部分组成,如图 1 所示。检测节点是由多个 PM_{2.5} 灰尘传感器作为测量节点,用于测量 PM_{2.5} 浓度;各个节点的数据通过 WiFi 传输至网络路由器(WiFi 热点),网络路由将各个节点的数据通过 EM770W 模块(3G 模块)将数据发送到移动通信网络中。位于监控中心的嵌入式服务器通过 EM770W 模块接收远程的数据,服务器是在 Linux 系统下采用 Qt 编写的。客户端分为计算机(PC)客户端和 Android 手机客户端。计算机客户端采用 Qt 软件编写,而 Android 客户端基于 Java 语言编写。

收稿日期:2015-01-10;修回日期:2015-05-03。

基金项目:国家自然科学基金项目(61178067);晋城市科技计划项目(201501004-22);山西省高校科技创新项目(2015166);太原科技大学博士启动基金(20132011)

第 1 作者简介:王建荣(1979—),男,山西临汾人,太原科技大学讲师,研究方向:量子力学、激光应用、嵌入式系统方面的研究。E-mail:wjr19992008@163.com。

通信作者:邱选兵,E-mail:qiuxuanbing@163.com。

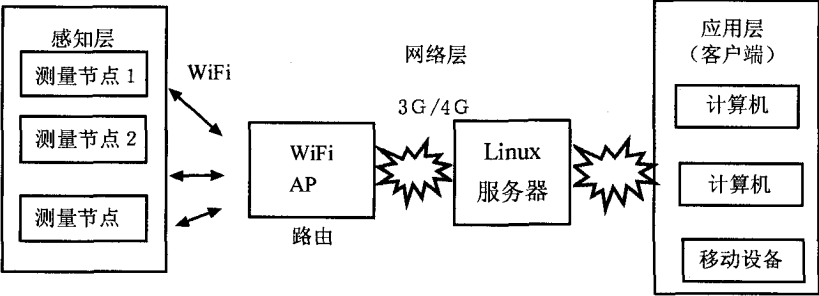


图1 PM2.5检测系统框图

2 监测系统硬件设计

2.1 传感器节点

传感器节点是由 PM2.5 传感器、TM4C123G 模块、CC3000 模块以及电源部分组成. PM2.5 传感器负责将经过散射后的光信号转换为电信号,利用内置运算放大器将微弱电信号转换为 0~5V 输出的电压. TM4C123G 单片机内置模数转换器(A/D)将传感器输出的模拟量转换为数字量,根据传感器特性参数进行 PM2.5 浓度计算,存储器后通过 CC3000 将数据传输至网络路由器中,如图 2 所示.

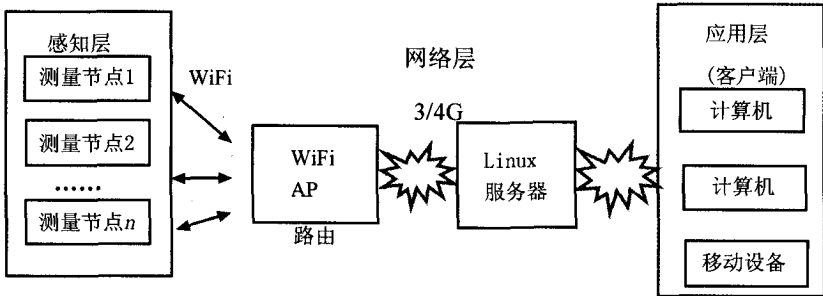


图2 传感器节点原理框图

2.1.1 PM2.5 传感器

当一束平行入射光通过一定体积含有悬浮颗粒的介质时,由于颗粒物的散射效应会导致出射光强产生一定程度衰减,其衰减程度以浊度或消光表示,与颗粒的大小和数量(浓度)有关. 出射光强与入射光强之间的关系可表示为

$$I = I_0 \exp(-\tau L), \tag{1}$$

其中, I_0 是入射光强度, I 是出射光强度, τ 是浊度(单位体积内颗粒的总消光截面), L 样品池长度. 上式称为 Lambert-Beer 定律. 对简单情况而言,设大气中可吸入颗粒物是 N 个直径为 D 的球形颗粒,由于颗粒物的散射和吸收效应,则总浊度

$$\tau = NK_{\text{ext}}\sigma = (\pi/4)D^2K_{\text{ext}}N, \tag{2}$$

其中, N 是颗粒数目, K 消光系数(K 是入射光波长 λ , 折射率 m , 直径 D 的函数), σ 为颗粒迎面光面积. 将(2)式代入(1)式后取对数得 $\ln(I/I_0) = -(\pi/4)LD^2N_iK_{\text{ext}}(\lambda, m, D)$. 从上式可知,当入射光与光程不变时,出射光强度随着颗粒物浓度变化而变化,因而根据出射光强度即可反演出颗粒物的浓度.

用日本夏普公司的灰尘传感器 GP2Y1050AU0F,其测量原理正是基于上述散射法实现的(见图 3). 检测的粒子直径典型值为 $2.5 \mu\text{m}$,当空气中颗粒物处于检测范围内时,颗粒物与激光发生散射作用,被光电探测器转换为电流信号,经放大后转换成电压输出. 检测灵敏度为 $3.5 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ V/kg}$,量程为 $0 \sim 400 \mu\text{g/m}^3$. 其内部集成了 CPU,有电压(模拟)和串口(数字)2 种输出方式. 本项目采用模拟输出,连接 TM4C123 的 A/D 输入引脚 PE3.

2.1.2 传感器节点控制器

控制器采用 TI 公司 Cortex-M4 内核单片机 Tiva C TM4C123G. WiFi 无线通信选用 TI 公司满足 WiFi 802.11b/g 协议的低功耗智能型网络芯片, 单片机与其通过高速 5 线 SPI (Serial Peripheral Interface) 相连. 单片机 TM4C123G 通过内部 A/D 转换器实时地将电压信号转换成 PM2.5 浓度(采样率设置为 100 Hz, 1 s 内求平均), 然后通过 WiFi 将数据发送给网络路由器.

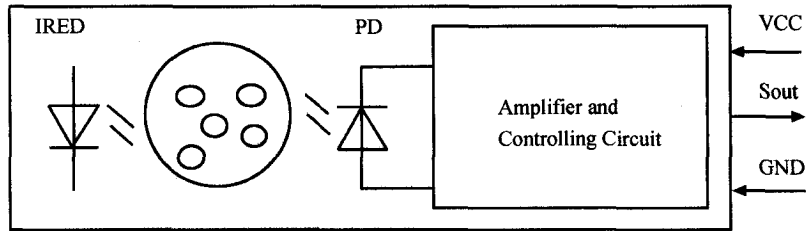


图3 PM2.5传感器内部原理框图

2.2 网络路由器

网络路由器是传感器与服务器的中转站, 完成网络传感器节点的管理、地址的分配、数据的接收, 同时还接收到的数据通过移动通信网络传送给远程的嵌入式服务器. 网络路由器由英贝特公司的 BeagleBone Black (BB-Black) 模块、Wilink8 Cape 模块和公司的 3G 模块 EM770W 模块 3 部分组成, 如图 4 所示.

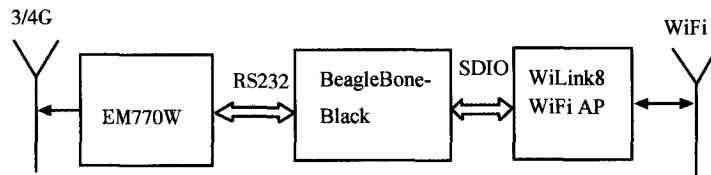


图4 网络路由器功能结构图

BB-Black 模块是深圳市英蓓特科技有限公司推出的一款基于 AM3358 处理器的开发套件, 处理器集成了 1 GHz 的 ARM Cortex™-A8 内核. 扩展接口有以太网口, USB 主从设备, TF 卡接口, 串口, A/D, I2C, SPI 等^[7]. 论文中 WiFi 热点控制芯片选择 TI 的 WiLink8, 与 BB-Black 模块通过 SDIO 接口实现控制、数据的传输等任务. BB-Black 模块与 EM770W 模块通过 RS232 相连. BB-Black 模块串口 1 用于系统调试输出, 串口 3 实现与 EM770W 数据通信.

2.3 服务器与客户端

服务器与客户端的实现原理图如图 5 所示. 服务器采用基于 Linux 操作系统管理, 主要的任务包括: 与 EM770W 模块的通信、数据库的管理、客户端的请求和处理. 服务器通过串口访问移动模块 EM770W, 将远程的数据解析、编码并存储到嵌入式 Sqlite 数据库中. 客户端的计算机和移动设备通过万维网或局域网访问和查询 PM2.5 的时空参数, 服务器采用 C/S 模式来响应数据请求.

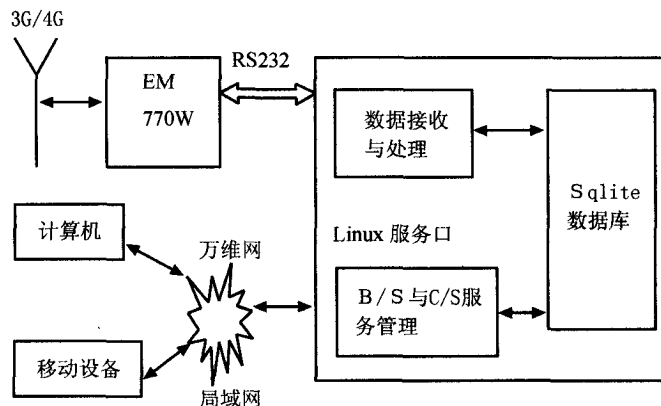


图5 服务器端结构功能框图

3 系统软件设计

在物联网应用中,其关键技术为软件的设计与实现.在本系统中,主要涉及了感知层即传感器节点、网络路由器、网络服务器以及客户端等4个部分的软件设计与实现.传感器节点实现数据的采集、与 WiFi 热点的数据交换任务.软件包括基于 Keil/MDK 环境下的 A/D 数据采集、WiFi 网络的配置、连接、数据交换和断开;网络路由器主要为嵌入式 Linux 操作系统的移植、基于 Wilink8 WiFi 热点的驱动、配置和数据通信、3G 无线通信;服务器包括 Linux 环境下的 3G 数据通信、C/S 服务器程序;客户端包括计算机的客户端和 Android 平台的客户端软件.

3.1 节点软件设计

传感器节点主要完成数据的采集和传输,由 TM4C123G 单片机完成,如图 6 所示.单片机初始化后进入主循环,处理网络请求和数据传输.初始化部分:首先初始化 IO 端口,包括 LED 显示灯、按键;再设置 SPI 通信模式(主模式)和速度(1 MB/s);之后,初始化 WiFi 芯片 CC3000,并设置好中断;然后,初始化调试串口、系统时钟以及 A/D 采样的定时器;最后,初始化内部的 A/D.

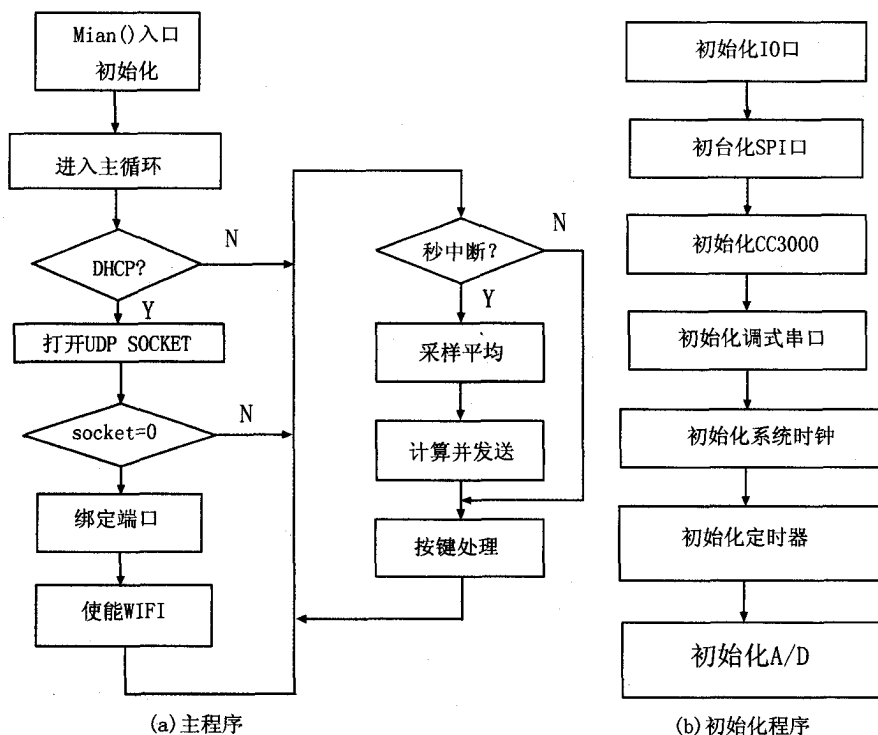


图6 传感器节点软件流程图

当初始化完后,CPU 进行主循环,处理 CC3000 的网络请求命令、数据传输和命令解析,如图 6(a)所示.由于 CC3000 的网络命令主要采用回调函数(中断)方式处理,因此当网络有命令或数据响应时,会设置响应的标志,供主循环查询和处理,如网络的 DHCP(Dynamic Host Configuration Protocol)请求成功状态,如果成功则打开 UDP(User Datagram Protocol)模式的套接字,以便进行 UDP 模式的数据传输,并绑定本地通信端口,使能数据传输.在秒中断的处理中,主要完成数据的 UDP 发送,同时将数据从调试串口发送出去.

3.2 网络路由器的软件设计

网络路由器是基于 BB-Black 模块设计的,在该模块中采用官方网站的最新镜像文件“Angstrom-Cloud9-IDE-GNOME-eglibc-ipk-v2012.12-beaglebone-2013.06.20.img”,其 Linux 的内核版本为 linux kernel 为 3.8.13^[8].从 TI 的“wiki”上下载 Wilink8 的驱动^[8],按照说明文档编译生成可执行文件,并将 Wilink8 配置成了 WiFi 的 AP(Access Point)模式,通过它给各个测量节点分配 IP 地址.传感器节点将测得数据通过网络(路由器 IP 地址是固定的)发送给 BB-Black 模块.在 BB-Black 中采用 Python 语言编写网络程序实时接收节点数据,当接收的数据到达一定数量后,对数据求平均并打包处理,然后通过串口发送 AT 命令控

制 EM770W(3G 模块)将数据上传给远端服务器。

3.3 服务器的软件设计

服务器主要包括 EM770W 网络模块和 Linux 操作系统下的数据库管理(图 7)。服务器端的软件采用 Qt 语言编写,当 EM770W 网络模块有消息到达,软件右半部分的串口接收区会显示接收到的信息,提取信息并存入 Sqlite 数据库,存入的信息会在软件左半部分实时地显示出来。基于 C/S 模式的服务器在启动后会实时监听接收端口,当接收到客户端(用户查询终端)的连接请求时,该服务器会启动一个线程对客户端的查询请求进行处理。在每个线程程序里,线程会解析客户端需要查询的具体要求,如查询地点、查询日期和时间,并据此信息对数据库里的数据进行筛选,把符合要求的数据找出,并通过网络发送给该客户。

3.4 客户端设计

客户端软件设计包括了 PC 软件和手机软件。对于 PC 机和 Android 手机,分别采用 Qt 语言和 Java 语言编写了客户端查询软件。图 8 为 PC 查询终端软件界面。在图 8 中,当查询软件启动后,需要手动输入填写服务器的 IP 地址和端口号(也可以保留上次查询过的参数信息),可以对所要查询的地点、日期、PM 值进行筛选,点击“查询 PM 值”按钮后,软件发送连接服务器请求,其连接成功的信息会显示在左上角,同时程序自动获取查询的具体要求并通过网络发送给服务器。当服务器把客户端需要的数据发送过来后,所有的数据会显示在查询软件的左半部分。

与 PC 客户端查询相同,Android 手机客户端查询同样设置服务器的 IP 地址、端口号,客户可以对所要查询的地址进行选择。登录界面需要输入用户名、密码、IP 地址,可以选择记住密码这个选择框,再次登录时不需再输入。点击“登录”这个按钮后,发送连接服务器请求,其连接成功的信息会显示在手机屏幕上。这时显示的有指数、列表、小贴士 3 个选项。点击指数界面的“更新”按钮时,系统会自动更新 PM2.5 数据。

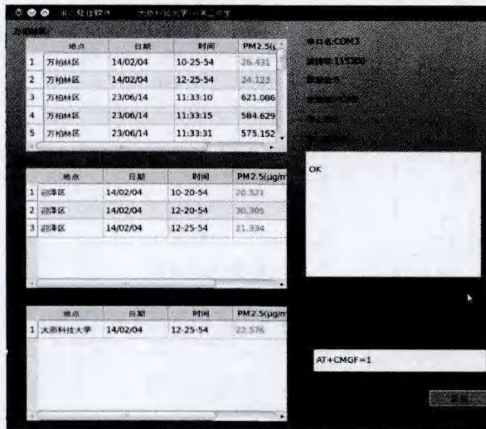


图7 服务器软件界面

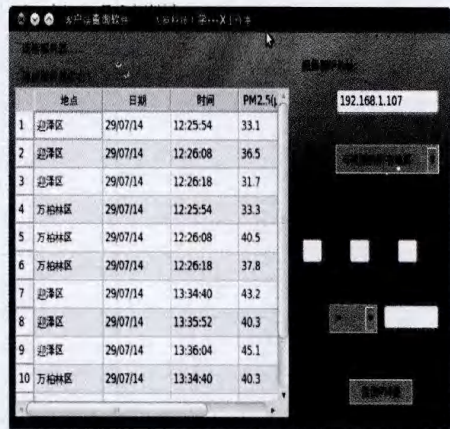


图8 计算机模式的客户端

4 测试结果与讨论

4.1 测试平台

本文测试实验平台主要由传感器节点、网络路由器、笔记本搭建的服务器以及客户端构成。研制了 2 个 PM2.5 传感器节点,分别利用 5 V 的 Li 电池供电。传感器节点通过路由器中的 AP 热点连接到网络中,BB-Black模块完成传感器节点数据的汇集并上传给服务器;服务器接收移动网络的数据并存储在 Sqlite 数据库中,客户端通过请求命令获得待查询的数据。系统测试参数见表 1。为了方便测试,本文设置 2 个传感器节点,一个模拟迎泽区的监测点,另一个模拟万柏林区监测点。

4.2 测试结果与讨论

测试结果为实验室内对不同测量地点的测量数据进行模拟,并对比当天的“中国环境监测总站的全国城市空气质量实时发布平台”发布的数据。其中空气质量状况是根据 GB 3095—2012 进行划分等级的。图 8 为采用 PC 查询的实时 PM2.5 浓度部分数据的界面截图,软件可以查询到 2 个模拟区域的浓度值,查询的时

间为 2014-07-29. Android 平台的手机查询软件根据当前的监测值给出了 PM2.5 空气指数和空气质量状况小提示,查询的时间为 2014-08-12. 从测试来看,本系统可以实时获取网络中的任何节点 PM2.5 浓度值,实现了传感器节点、网络路由器、服务器、客户端的基本功能.

表 1 系统测试参数

网络路由器 巡检时间	20 s	传感器节点数	1~250	传感器与网络路由器 数据传输方式	UDP	客服端与服务器 工作模式	Client/ Server
网络路由器 工作电压	5 V	传感器 工作电压	5 V	传感器与网络路由器 通信网络模式	WiFi	服务器操作系统	Linux
网络路由器 工作电流	2 A	传感器 工作电流	80 mA	路由器与服务器通信 网络模式	移动 网络	客户端	PC, An- droid 手机

5 结 语

基于光散射 PM2.5 传感器,WiFi,物联网,嵌入式等技术,构造了一种多节点 PM2.5 大气环境参数监测系统. 分布式多节点传感器通过 WiFi 实现数据的传输. 当增加网络节点时,不需要人工干预. 利用现有的移动网络,通信可靠,布点方便,便于监测点的选择. 计算机和移动设备终端可以在线查询大气中的 PM2.5 浓度参数. 实验测试表明:该系统自组织、节点多、运行稳定、实时性强,且成本低、功耗小,易于扩展.

参 考 文 献

[1] 唐忠辉. 大气污染与环境维权[J]. 环境教育,2009(8):23-25.

[2] Wang, J, Hu Z, Chen Y, et al. Contamination characteristics and possible sources of PM10 and PM2.5 in different functional areas of Shanghai, China[J]. Atmospheric Environment, 2013,68(2):221-229.

[3] 符明淳,王宗仁,郭利兵,等. 平顶山市环境空气容量与污染物排放量的关系研究[J]. 河南师范大学学报(自然科学版),2007,35(4):113-116.

[4] 顾瑞珍. 解读国务院常务会议加强雾霾等大气污染治理[N/OL]. (2014-02-12)[2014-11-20]. http://news.xinhuanet.com/2014-02/12/c_126123677.htm.

[5] 梁 艳,张增福,陈文亮,等. 基于 β 射线法的新型 PM2.5 自动监测系统研究[J]. 传感技术学报,2014,27(10):1418-1422.

[6] 张 敏. 光散射法测量超细颗粒粒度的研究[D]. 天津:天津大学 2005.

[7] 刘 萍,海本斋. 物联网中一种面向聚集点的机会路由算法[J]. 河南师范大学学报(自然科学版),2014,42(5):143-147.

Real-time Monitoring System of PM2.5 in Atmospheric Environment Based on Internet of Things

WANG Jianrong, QIU Xuanbing, LI Chuanliang, WEI Jilin, XU Shuan, WANG Xiaojin

(School of Applied Science; Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The real-time monitor of the inhalable particulate matter (PM2.5) is one of the significant indexes in atmospheric environment. The PM2.5 particle concentration monitoring system is developed based on the internet of things. The PM2.5 concentration is acquired by using the PM2.5 sensor which is on the basis of the light scatter. The sensor node is connected to the network router (WiFi Hotspot) by using the wireless technique of the WiFi meanwhile the network router is linked to the remote embedded ARM-Linux server using 3G/4G mobile net. The real-time data query of the personal computer and mobile device is achieved with the help of the Client/Server framework. The experimental results showed that the system has the advantages of short inspection time, multi-node, high sensibility, and so on.

Keywords: internet of things; PM2.5; real-time monitor; embedded system; WiFi communication