

基于无线传感器网络的农田土壤温湿度监测系统的设计与开发

刘 卉¹, 汪懋华¹, 王跃宣², 马道坤¹, 李海霞¹

(1. 中国农业大学 精细农业研究中心, 北京 100083; 2. 清华大学 理论计算机科学研究所, 北京 100084)

摘 要: 根据农田环境的应用需求, 设计了农田土壤温湿度监测系统, 该系统由农田无线监测网络和远程数据中心两部分组成。采用以 JN5121 无线微处理器为核心的传感器节点开发策略, 构建基于 ZigBee 协议的无线监测网络; 采用 ARM9 微处理器 S3C2410, 基于嵌入式 Linux 开发的网关节点实现数据汇聚和 GPRS 通信方式的远程数据转发。远程数据中心的管理软件 FieldNet 采用了数据库管理模式, 并通过应用 ESRI 嵌入式 GIS 组件库 ArcEngine 进行监测数据的实时变化和空间变异分析。系统的设计开发为精细农业时空差异性与决策灌溉研究提供了有效工具。

关键词: 农业工程; 土壤温湿度监测系统; 无线传感器网络; ZigBee; 精细农业

中图分类号: S237; TN919.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-5497(2008)03-0604-05

Development of farmland soil moisture and temperature monitoring system based on wireless sensor network

Liu Hui¹, Wang Mao-hua¹, Wang Yue-xuan², Ma Dao-kun¹, Li Hai-xia¹

(1. Research Center for Precision Agriculture, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. Institute for Theoretical Computer Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Wireless sensor network technology can provide optimal and integrated solution to distributed data collection, delivery and analysis in farmland. An in-field soil moisture and temperature monitoring system was developed which meets the application requirement in farmland environment. This system consists of the soil monitoring wireless sensor network and remote data center. In the wireless sensor network, the sensor node is developed using JN5121 module, an IEEE 802.15.4/ZigBee wireless microcontroller. The sink nodes for aggregating and delivering network data is based on ARM9 processor platform in order to meet the requirements of high-performance. A GPRS module is integrated into the sink node for long distance communication. In the remote data center, the management software running on the host computer is developed for real-time data receiving and logging based on database management method. It also uses ArcEngine, an embedded GIS developer kit to realize on-line spatial analysis of in-field data. This monitoring system may provide an effective research tool for spatial analysis and for irrigation decision making in precision

收稿日期: 2007-09-21.

基金项目: “863”国家高技术研究发展计划项目(2006A A10Z216).

作者简介: 刘卉(1978-), 女, 博士研究生. 研究方向: “精细农业”智能信息支持技术. E-mail: liuhui_mail@cau.edu.cn

通讯联系人: 汪懋华(1932-), 男, 教授, 中国工程院院士. 研究方向: “精细农业”智能信息支持技术, 农业与生物系统

工程. E-mail: mhw@public.hta.net.cn

algriculture.

Key words: agriculture engineering; soil moisture and temperature monitoring system; wireless sensor network; ZigBee; precision agriculture

目前,国内外科研人员已经将无线传感器网络技术应用于不同农业环境监测领域^[1-3]。作者以农田应用为背景,以研究土壤水分及温度的连续时空变异,指导决策灌溉为目标,通过分析农田环境具体特点,设计开发了低成本、实用化,基于无线传感器网络技术的农田土壤温湿度监测示范系统。

1 系统总体设计

1.1 系统需求分析

监测系统开发前,综合分析了农田环境的应用特点,利用有利条件,规避不利因素。基于无线传感器网络的农田环境监测系统具有 5 个典型特点:①应用环境可知性;②充足的太阳能资源;③作物具有固定的生育周期;④应用环境动态变化;⑤农田基础设施少。

此外,农机的田间作业和各种天气条件也是系统设计过程中需要慎重考虑的因素。

1.2 系统结构设计

综合分析上述应用特点,借鉴国外研究经验,设计的农田土壤温湿度监测系统总体结构如图 1 所示。监测系统由无线传感器监测网络和远程数据中心两部分组成。无线传感器监测网络由分布在农田中多个智能传感器节点组成,实时采集土壤水分、土壤温度参数,基于 ZigBee 无线通信协议组建 Mesh 网络,所有节点数据最终路由到网关节点,由网关节点将全部数据通过 GPRS 无线

通信传输方式转发到远程数据中心,监测网络中的所有节点均采用太阳能供电模式。远程数据中心负责数据的接收、存储和时空分析。

2 农田土壤温湿度监测网络的实现

2.1 传感器节点

传感器节点是一个微型的嵌入式系统,具有一定的处理能力和通信能力。

(1)硬件设计

传感器节点以 Jennic 公司的 JN5125 无线微处理器模块为核心,扩展了通信接口、总线接口、传感器接口和供电接口设计。JN5121 模块具有 16 MHz、32 位 CPU,支持 2.4 GHz IEEE 802.15.4 的无线通信组件,同时提供了 4 路 ADC 输入和 2 路 DAC 输入、异步串行口、SPI 接口等,为用户提供节点设计的集成化解决方案。图 2 为传感器节点控制板结构设计框图,采用了太阳能电

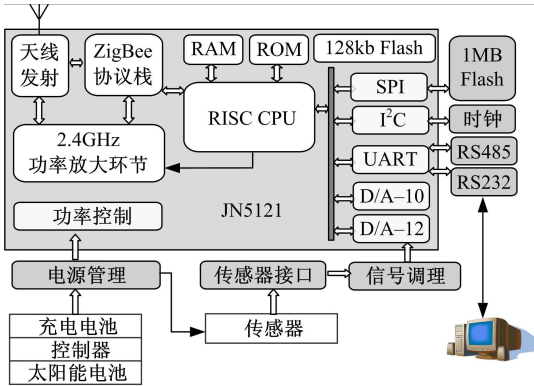


图 2 传感器节点结构框图

Fig. 2 Sensor Node Block Diagram

源组件供电,扩展支持 6 路传感器数据采集,通过串行端口与上位机通信实现程序下载。土壤水分传感器采用了作者所在单位自主研制开发的 FDS 系列水分传感器,运用频域方法测量含水土壤混合体的介电常数,获得土壤水分。土壤温度传感器采用了基于半导体 PN 极测量原理的 ST10,主要技术参数见表 1,将不同传感器分别连接到节点控制板的传感器接口,经信号调理后接入 JN5121 的 A/D 通道,通过标定曲线转换得到对应的测量参数值。图 3 为传感器节点实物照片。

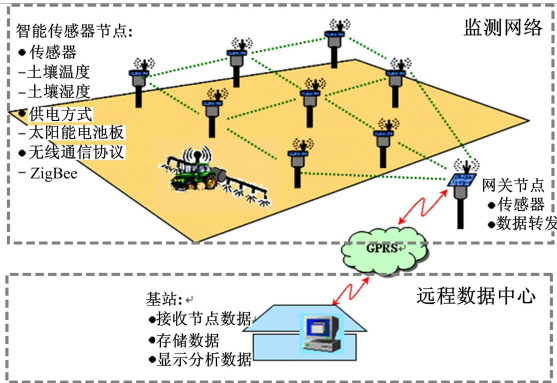


图 1 监测系统结构示意图
Fig. 1 System Architecture

表 1 传感器技术参数
Table 1 Specifications of sensors

传感器名称	技术参数
FDS 土壤	单位: $\%(\text{m}^3\text{m}^{-3})$
水分传感器	量程: $0\sim 100\%$ 测量精度: $\pm 3\%$ 输出信号: $0\sim 1.5\text{ VDC}$ 工作电压: $5\sim 12\text{ VDC}$ 工作电流: 35 mA 左右
ST10 土壤	单 位: $^{\circ}\text{C}$
温度传感器	量程: $-20\sim 50$ 测量精度: ± 0.5

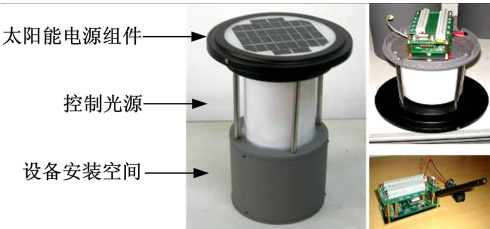


图 3 传感器节点
Fig. 3 Sensor node

(2)板载软件设计

无线传感器网络应用短距离无线通信技术, ZigBee 协议是由 ZigBee 联盟制定的用于短距离无线通信技术标准之一。协议的物理层(PHY)和媒体接入层(MAC)采用 IEEE 802.15.4 协议, 网络/安全层实现 PAN(个人域网)的组网连接、数据管理和网络安全, 应用层为实际应用提供框架模型。ZigBee 有 3 个工作频段, 其中 2.4 Hz 为全球通用免费的 ISM 频段。ZigBee 协议主要用于低能耗、低成本设备的低速互连^[4]。ZigBee 协议特点符合农田监测网络的应用要求。

为支持 JN5121 模块系列开发, Jennic 公司提供了专门的软件开发平台以及 IEEE 802.15.4 和 ZigBee 网络堆栈。设计中采用了网状网拓扑结构, 网关节点内嵌的 JN5121 模块作为 ZigBee 协议监测网络的协调器(Coordinator), 负责配置网络参数、启动网络并维持网络正常工作; 在传感器节点中, 为了满足网络覆盖, 同时尽可能降低节点能耗和节约成本, 将少量传感器节点充当路由器, 完成传感器数据采集和路由其他设备数据到协调器的功能, 而大部分传感器节点作为终端设备, 只采集传感器数据并发送给附近的路由器或协调器。在程序设计中, 用户只需根据设计目标,

调用 ZigBee 协议栈的 API 应用编程接口函数实现网络管理层的设备初始化、配置网络、启动加入网络、路由功能, 其中消息传播和路由发现是自动完成的, 用户无法干预。另外还需定义应用配置文件。图 4 为协调器和路由器初始化及通信的简化程序设计流程图。另外为满足应用需求, 在设计过程中还涉及到时间同步、节点休眠与唤醒等算法的实现。

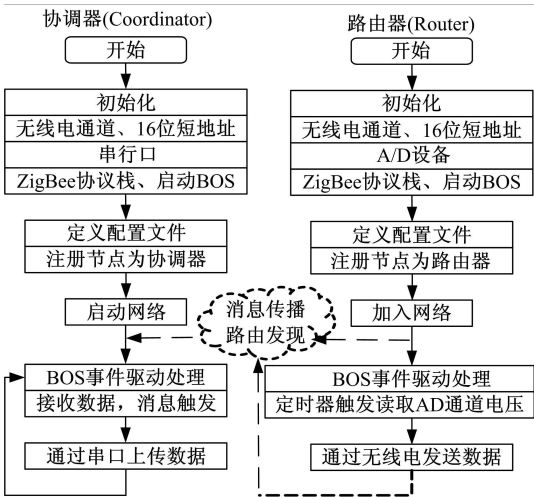


图 4 程序流程图
Fig. 4 Program flowchart

2.2 网关节点

与传感器节点相比, 网关节点要求较强的处理能力和运行速度, 因此设计中选择了具有丰富片上资源的 ARM9 微处理器 S3C2410 为核心, 根据功能需求, 扩展硬件通讯接口, 网关节点的结构框图如图 5 所示, 并针对功能设计, 采用嵌入式 Linux 操作系统完成定制开发。嵌入式 Linux 操作系统支持有内存保护、多任务、多进程, 并且具有源代码开放、支持大部分芯片、操作系统可裁剪、性能稳定、功能强大、易于移植和开发等优点^[5]。

(1)无线传感器网络数据汇聚。通过异步串

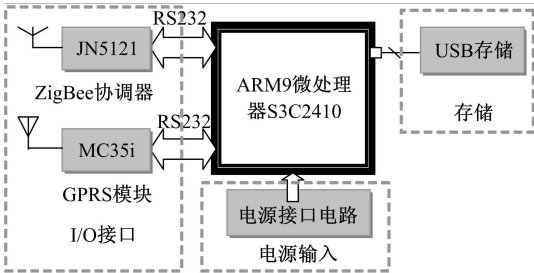


图 5 网关节点结构框图
Fig. 5 Gateway Board Block Diagram

行端口连接作为 ZigBee 网络协调器的 JN5121 无线通信模块,网络协调器功能由 JN5121 板载程序自行完成,嵌入式 Linux 只需完成串口数据通信功能。

(2)GPRS 远程数据转发。通过另一个异步串行端口连接 GPRS 通讯模块 Siemens MC35i。实现 GPRS 远程数据通信需要自下而上完成驱动层、协议层和应用层设计。在配置嵌入式 Linux 内核时选中支持串口设备实现对 MC35i 模块的驱动;嵌入式 Linux 内核支持 PPP (Point to Point Protocol)协议和 TCP/IP 协议,在编译 Linux 内核时选中支持这些选项;应用层在网络连接建立后,具体实现向远程数据中心转发数据的功能⁹。

(3)传感器网络数据本地存储。采用了 USB 接口存储方式,具有容量大、可扩展、热插拔的优点。

(4)电源输入。供电部分仍采用太阳能电源,由于网关节点能耗较大,选择了功率为 8 W 的太阳能电源组件,同时还需要进行硬件设计优化,以降低能耗。

3 远程数据中心的实现

远程数据中心为一台具有固定公网 IP 地址的计算机,在其上运行的基站数据管理软件是设计的核心。

3.1 开发环境

基站数据管理软件选择了 Microsoft Visual C++ 6.0 作为开发工具,采用数据库操作方式实现节点数据存储和读取。同时为了实现对分布在农田中的监测节点所采集的定点数据进行时空分析,集成地理信息系统功能,采用了 ESRI 公司的 ArcGIS Engine 嵌入式组件库。

ArcEngine 由 ArcObjects 核心包封装组成,可在各种编程接口中调用,并且无需安装 ArcGIS 桌面平台。与低端的地图控件相比,ArcEngine 除了提供基本的制图、数据编辑和 GIS 功能外,还支持空间分析和 3D 分析等高级操作功能^[7]。

3.2 功能模块

基站数据管理软件主要实现数据的接收、存储和时空分析,根据功能需求,划分成如下模块:

(1)数据接收模块。网关节点与基站之间采用 C/S 客户端服务器工作模式,基于 Socket 编程技术,监听本地 IP 地址的绑定端口,在确认客户

端即网关节点的连接请求后,接收数据,并根据自定义数据包协议完成数据解析。

(2)数据库存储模块。根据数据的采集时间,采用时段划分的数据存储管理方式,将解析数据存储到数据库对应表格的对应属性字段中。

(3)监测量时间变化分析模块。从数据库中读取监测量数据,以时间为横轴,绘制监测量随时间变化的曲线,分析监测量连续变化的特性。

(4)监测量空间变异分析模块。课题创新点之一是将 GIS 管理分析功能融入到无线传感器网络应用设计中。与灾害预警应用不同,农田无线传感器网络监测旨在通过节点位置上的环境变量采样估计其他非节点位置上的数据,生成环境变量的空间分布图。目前在每个节点中嵌入 GPS 模块,成本过高且无必要,因此系统借鉴土壤栅格采样策略,根据预先的部署设计将节点安装在网格中,利用 GPS 测量节点的精确位置,并将节点名称和位置信息输入到基站数据管理软件中,生成传感器节点图层。用设定时间间隔所接收到的最新节点数据实时更新节点图层中土壤湿度、土壤温度等监测量字段数据,通过 ArcEngine 的空间分析模块实现空间插值,获得任意时段的监测量空间分布。RasterAnalysis 类包含在 GeoAnalyst 类库中,是栅格分析的集合,其中 RasterInterpolationOp 对象的 IInterpolation 接口支持距离反比、克里金法(Kriging)、样条函数(Splining)及趋势面(Trend surface)等栅格插值算法。

图 6 为管理软件 FieldNet 的实时监测分析界面。

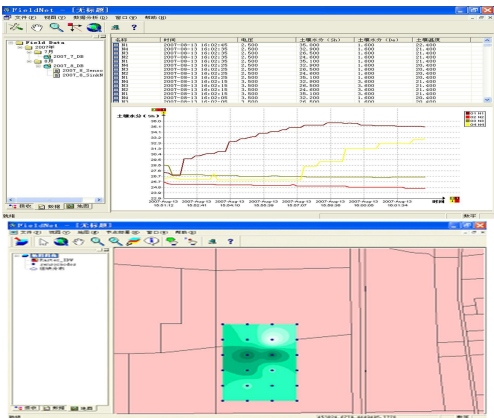


图 6 管理软件实时监测分析界面

Fig.6 Display of the management software for real-time monitoring and analysis

4 无线通信模块距离传输试验

无线信号传输过程中存在路径损耗^[8],为了合理部署传感器节点,进行 JN5121 模块距离传输试验。发送端与接收端天线高度是影响信号传输的因素之一,图 7 为裸地环境下传输距离随天线高度变化的曲线。另外随着作物的生长,农田环境动态变化,植被覆盖也是重要的影响因素,例如在小麦株高为 60 cm 的麦田中,天线高度为 150 cm,低功率模块的有效传输距离为 50 m,高功率模块也仅为 150 m。因此在无线传感器网络部署时,应注意以下问题:

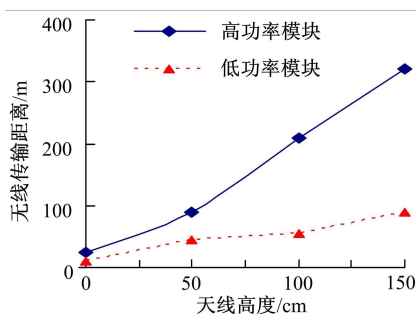


图 7 无线传输距离随天线高度变化的曲线

Fig. 7 Radio range over antenna height

(1)对于同一块农田,低功率模块通信覆盖范围小,提高节点部署密度,必然增加投入成本,但有利用保证环境监测变量的采样密度;高功率模块可以较好地保证网络连通性,降低成本,但可能导致采集数据失去空间相关性,因此节点部署需综合分析通信和采样两个因素。

(2)针对农田具体覆盖作物,设计适宜的节点天线放置高度,有利于减少信号传输的路径损耗。

(3)网络拓扑结构设计中,每个作为终端设备的传感器节点在有效通信范围内至少能够与两个以上的作为路由器的传感器节点通信,以保证一条链路出现故障时不会影响到整个网络。

5 结 论

(1)分析农田环境的应用需求,基于无线传感器网络技术设计了由土壤温湿度监测网络和远程数据中心两部分组成的农田监测系统。提出了广域采集、实时传输、在线分析的新型农田信息化管理集成化解决方案。

(2)采用以 JN5121 无线微处理器模块为核心的传感器节点软硬件开发策略,构建了基于 ZigBee 协议的无线监测网络,开发周期短;以

ARM9 微处理器为核心,基于嵌入式 Linux 开发网关节点,处理能力强,扩展性好,在网关节点设计中,采用 C/S 客户端服务器工作模式,通过 GPRS 通信方式实现数据低成本、远距离转发。

(3)基于数据库管理和嵌入式 GIS 组件库 ArcEngine 开发远程数据管理软件,实现对土壤温湿度监测量的存储、时间变化和空间变异分析,为研究农田时空变异性与决策灌溉提供有效工具。

参考文献:

- [1] Kim Y, Evans R G, Iversen W M, Pierce F J. Instrumentation and control for wireless sensor network for automated irrigation[C] // 2006 ASABE Annual International Meeting, Portland, 2006. ASABE Paper No 061105.
- [2] Raul Morais Valente A, Serdio C. A wireless sensor network for smart irrigation and environmental monitoring[C] // EFITA/WCCA Vila Real Portugal 2005; 845-850.
- [3] 乔晓军,张馨,王成,等.无线传感器网络在农业中的应用[J].农业工程学报,2005,21(2):232-234.
Qiao Xiao-jun, Zhang Xin, Wang Cheng, et al. Application of the wireless sensor networks in agriculture[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(2): 232-234.
- [4] 蒋挺,赵成林.紫蜂技术及其应用[M].北京:北京邮电大学出版社,2006:8-23.
- [5] 探矽工作室.嵌入式系统开发圣经[M].北京:中国铁道出版社,2003:395-424.
- [6] 李秀红,黄天成,孙忠富,等.基于 GPRS/SMS 的嵌入式环境监测系统[J].吉林大学学报:工学版,2007,37(6):1409-1414.
Li Xiu-hong, Huang Tian-shu, Sun Zhong-fu, et al. Embedded environment monitoring system based on GPRS and SMS[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2007, 37(6): 1409-1414.
- [7] 朱仕杰,南卓铜.基于 ArcEngine 的 GIS 软件框架建设[J].遥感技术与应用,2006,21(4):385-390.
Zhu Shi-jie, Nan Zhuo-tong. Building GIS framework with ArcEngine[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2006, 21(4): 385-390.
- [8] Theodore S Rappaport. 无线通信原理与应用(2版)[M].周文安等译.北京:电子工业出版社,2006:72-114.