

基于铱星通信技术的土壤墒情远程监测网络研究^{*}

刘卫平^{1,2} 高志涛^{1,2} 刘圣波^{1,2} 陶鑫³ 赵燕东^{1,2}

(1. 北京林业大学工学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学城乡生态环境北京实验室, 北京 100083;

3. 中机美诺科技股份有限公司, 北京 100083)

摘要: 为了实现野外偏远、无 GPRS 信号地区土壤墒情、温度及降雨量的远程无线实时监测,设计了一套由土壤墒情及相关影响信息实时采集系统、铱星通信以及互联网技术构成的“物联网”架构式土壤墒情实时监测系统,围绕铱星 SBD(Short burst data)终端模块 9602 开发了具有独立知识产权的数据采集系统。该系统实现了智能化、网络化的土壤墒情实时监测,以及历史数据的查询、下载,根据设定阈值进行短信报警、传感器和通信故障报警等功能。该系统自 2011 年 8 月在山东省、北京市等地运行以来,可以安全、稳定、可靠地获取监测土壤含水率、温度及降雨量信息。通过试验可知铱星通信在空旷地带成功率为 97.2%,单个节点通信费用为每月 200 元(12 000 字节),达到了对土壤墒情、温度和降雨量变化规律进行长期监测的目的。

关键词: 土壤墒情 实时监测 铱星通信 SBD

中图分类号: S24; TN927⁺.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)11-0316-07

Remote Monitoring Network for Soil Moisture Based on Iridium Communication Technology

Liu Weiping^{1,2} Gao Zhitao^{1,2} Liu Shengbo^{1,2} Tao Xin³ Zhao Yandong^{1,2}

(1. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3. MENOBLE Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: In order to monitor the real-time soil moisture, temperature and rainfall in remote area where GPRS communication is not accessible, a real-time soil moisture monitoring system was designed by using Iridium communications, real-time information acquisition and Internet technology. The “Internet of Things” architecture was founded and the self-developed Iridium transparent transmission module as well as real-time data acquisition module were designed based on the terminal module 9602 in short burst data (SBD) transceiver. It implemented intelligent, network-based real-time soil moisture monitoring, as well as historical data querying, downloading and text message alarming according to the preset threshold values. Functions such as sensors and communication failure alarm made it possible for safe, steady, reliable communications. Since August 2011, the system came into operation in Shandong Province, Beijing City and other places. System could be safe, stable and reliable to obtain the soil moisture content, temperature and rainfall. The running result indicated that the data transmission system had the advantages of high reliability, low communication fees and wide coverage. The data receiving rate could reach to 97.2%, and the communication fee was ¥200 Yuan per month, which achieved the aim of long-term monitoring of soil moisture, temperature and rainfall.

Key words: Soil moisture Real-time monitoring Iridium communication Short burst data

收稿日期: 2014-11-12 修回日期: 2015-02-03

^{*} 北京市共建项目专项资助项目和国家自然科学基金资助项目(31371537)

作者简介: 刘卫平, 博士生, 主要从事生态智能检测与控制研究, E-mail: HFPL916@126.com

通讯作者: 赵燕东, 教授, 博士生导师, 主要从事生态智能检测与控制研究, E-mail: yandongzh@bjfu.edu.cn

引言

适量的土壤墒情是保证作物、植被健康生长的必要条件,同时也是抗旱、防涝、节约水资源的一个重要指标。目前,国内外土壤墒情监测方法可以分为 3 类^[1]:第 1 类为移动式测量土壤墒情^[2-3]。即工作人员手持便携式土壤水分采集仪对不同采样点进行土壤墒情的测量,移动式测墒灵活方便、节省经费、适合小区域的土壤墒情测量,缺点是人工依赖性大,不能对某一区域进行长期连续的监测。第 2 类为遥感测量土壤墒情。利用卫星和机载传感器从高空遥感探测地面土壤含水率的方法均属于此类。遥感测墒能够同时监测大面积区域的土壤墒情,但是由于遥感数据精度还在不断提高过程中,导致遥感测墒在准确度上不是很高^[4-6]。第 3 类为固定监测站式测量土壤墒情^[7]。首先在需要监测的区域内建立土壤墒情监测站,将监测站采集到的土壤墒情数据通过无线传感器技术发送到土壤墒情监测中心。固定监测站式测量因测量精度高、节省人力、能够长期连续监测等优点被广泛应用^[8]。但在一些偏远、无 GPRS 信号的地区,固定监测站存在数据无法有效实时传输的问题,成为固定监测站在实际应用中的一个瓶颈。

本文设计一种基于铱星通信技术的土壤墒情实时监测系统,实现复杂环境下土壤墒情的实时采集、无障碍传输,用户可通过 Internet 随时随地访问土壤墒情监测网站查看监测地区的墒情数据,可实现土壤墒情、温度和降雨量的实时监测、历史数据查询和下载、系统错误自查、短信报警等功能,方便快捷。

1 铱星通信系统及 SBD 业务概况

1.1 铱星通信系统

铱星系统是美国摩托罗拉公司提出的第 1 代真正依靠卫星通信系统提供联络的全球个人通信方式,旨在突破现有基于地面的蜂窝无线通信的局限,通过太空向任何地区、任何人提供语音、数据、传真及寻呼信息^[9]。网络覆盖全球包括南、北极及各大海域,铱星系统的最大优势是其良好的覆盖范围,基本能够实现任何人在任何时间、任何地点、以任何方式与任何人进行通信。因此特别适合其他通信方式无法覆盖的区域进行通信,比如偏远山区、海洋、高山、沙漠、森林,等等。铱星系统主要由卫星星座、关口站、地面控制设备和用户终端组成。铱星系统卫星星座由分布在 6 个极地圆轨道面的 72 颗星(6 颗备用星)组成,卫星星座设计能保证全球任何地区在任何时间至少有一颗卫星覆盖,无论在任何地方

都能够保证数据通信的信号强度和可靠性,不受天气、高度、电离层、距离等不稳定因素的制约,是世界上唯一真正实现全球覆盖的语音和数据通信系统。铱星系统的星座网提供手机到关口站的接入信令链路、关口站到关口站的网路信令链路、关口站到系统控制段的管理链路。

铱星系统的业务包括:双向语音通信、短信和数据功能。铱星系统提供 2 种数据业务:2.4 kb/s 和 9.6 kb/s,2.4 kb/s 业务用于点对点的数据传输,9.6 kb/s 业务用于登陆 Internet,以 9.6 kb/s 带宽浏览 Internet,完全满足土壤墒情监测系统每小时传输 14 个字节的要求。铱星系统与指定 IP 地址或绑定的邮箱进行通信,土壤墒情监测系统选用与绑定的邮箱进行通信。铱星数据通信费用有按照数据传输时间和按照字节两种收费方式,土壤墒情监测系统每小时发送一次数据,每次发送数据量为 14 个字节,每个月的数据量为 10 080 字节,数据量较小,因此选用按照字节收费的方式。铱星系统通信既弥补了 GPRS 不能覆盖全球所有角落的问题,又降低了 GPS、北斗等同步卫星通信费用过高的问题,为土壤墒情固定监测站提供了一种可实施的通信方案。

1.2 铱星 SBD 业务

SBD(Short burst data)业务是结合铱星全球覆盖网络提供的铱星突发短数据(SBD)传输服务。SBD 业务是一种简单有效的、在地面终端和远程计算机服务器之间采用数据包的方式实现短消息的双向传输^[10]。它主要包括地面终端、铱星单元、铱星低轨卫星群、短数据关口站(Gateway)、互联网和用户应用平台。地面终端由可实现特定功能的传感器、数据采集器、控制器组成,土壤墒情监测系统土壤墒情采集器属于地面终端。铱星单元是实现 SBD 业务的铱星模块,例如土壤墒情监测系统中使用的 9602 模块。短数据关口站(Gateway)负责存储和转发双向的 SBD 数据,全球建有 15 个关口站。在北京建有 1 个关口站,初期有 300 条空中信道,可容纳 3 万用户。用户应用平台即用户服务器用于 SBD 业务信息的接收、分析、处理和对地面终端的控制,它和关口站之间是通过邮件或 IP 端口实现数据的收发,土壤墒情监测系统应用平台是通过邮件的方式和关口站进行数据的收发,应用平台上运行的上位机软件实时读取绑定的邮箱数据,上位机将数据分析处理后保存到服务器的数据库中。

2 系统硬件设计

2.1 系统架构

系统由土壤墒情监测节点(包括数据采集器、传

传感器和铱星模块)、监测管理服务器和系统软件组成,如图 1 所示。土壤墒情监测节点与监测中心通信采用铱星网络。数据采集器按照监测要求挂接了 3 层土壤水分传感器(分别距地表 10 cm、20 cm 和 40 cm 处)、1 个土壤温度传感器(距地表 20 cm 处)、1 个空气温度传感器和 1 个降雨量传感器。系统软件包括上位机接收管理软件和数据库,以及将数据发布到 Internet 上供用户查询的土壤墒情网站。

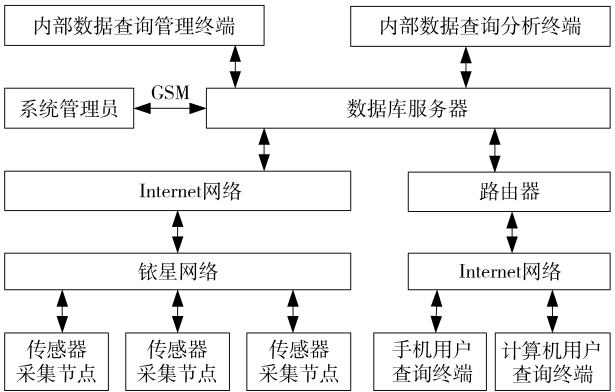


图 1 土壤墒情监测系统结构框图

数据采集器依据自身精准时钟,每小时(采集间隔可设置)自动采集当前土壤含水率、温度、降雨量、传感器数据存储后通过铱星模块将数据发送到监测中心,监测中心的网络服务器通过已安装的上位机软件实时读取邮箱数据,一旦有无线墒情监测节点的数据发回,将数据包解包后使用 ADO 方法存入主数据库,Web 站点服务程序实时访问调用数据库,为用户提供远程的数据访问、查看、下载等服务。同时,监测中心的数据库服务器安装的上位机软件根据采集回的土壤墒情监测节点数据与设定报警阈值的对比,决定是否通过连接在服务器端的 GSM 无线数据传输模块给指定用户发送报警短信。整个系统循环运行,从而实现复杂、无 GPRS 信号地区的土壤墒情、温度和降雨量长期连续远程监测。

2.2 硬件设计

远程无线墒情监测节点主要由 STM32 处理器模块、铱星 9602 模块、传感器接口模块、传感器阵列、时钟模块、SD 卡存储模块、系统状态指示模块、触摸屏显示模块以及电源模块组成,如图 2 所示。

中央处理器选用 ST 公司的高性能、低成本、低功耗的 STM32 微处理器,中央处理器作为主要功能单元,实现向系统的各个部分发出各种命令,同时对被测参数进行巡回检测、数据处理、控制计算以及逻辑判断等功能。

本系统中选用了铱星公司生产的铱星 9602 模

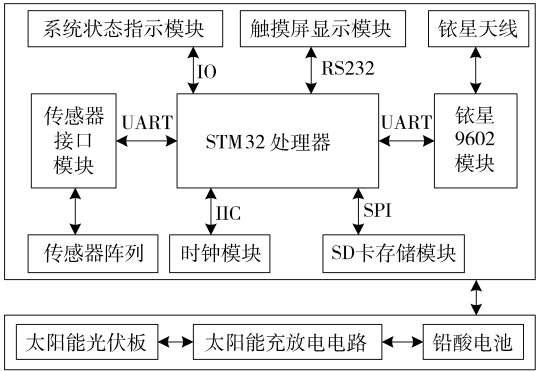


图 2 系统硬件框图

Fig. 2 Block diagram of system hardware

块(图 3)作为无线数据传输的通信模块。9602 模块是单板核心收发器模块,是作为“黑盒子”提供的,通过卫星信道收发数据包。除天线接口以外,所有设备连接都是通过一个多针接口,9602 模块接口到用户连接器包括 DC5V 电源输入、RS232 串行数据接口、供电电压指示、网络输出与电源开/关控制线。9602 模块主要射频(RF)连接器是天线(ANT)连接器,ANT 连接器提供了 9602 模块和主机系统的主板之间的 RF 连接,出于安全原因,9602 模块上的 2 个 RF 连接器,用于跨板连接到主机系统的主板,不应该被直接连接到一个外部天线电缆或电缆分配系统。9602 模块具有体积小、质量轻、功耗低等优点,它通过 RS232 接口,结合相应的 AT 指令协议完成 SBD 业务^[10]。9602 模块最大移动发送信息是 340 个字节,最大移动接收信息是 270 个字节。通过 9602 模块实现的 SBD 业务是一种简单高效的网络传输功能,在地面终端设备和用户应用平台之间传输短数据信息。每一个 9602 模块具有唯一的 ID,因此 9602 模块没有纳入,也不需要用户身份模块(也称为 SIM 卡)插入到收发器,使用模块之前只要使用 ID 号进行注册即可。



图 3 铱星 9602 模块

Fig. 3 Iridium 9602 module

在对铱星模块使用之前需要进行相应的参数设置,比如波特率、通信校验方式等。STM32 中央处理器使用 AT 指令与铱星 9602 模块进行收发数据、读取模块信号强度等操作。中央处理器与铱星模块是通过 RS232 串口进行通信的,所以在通信之前要设置

STM32 和铱星模块的波特率一致,本文使用的波特率为 9.6 kb/s。STM32 中央处理器采集传感器数据后通过 RS232 串口使用 AT 指令将数据发给铱星模块,铱星模块使用铱星网络将信息以邮件的方式发送给用户端服务器,完成一次数据的上传。服务器端上位机需要发送数据给土壤墒情采集器节点时,使用邮件发给铱星网络,土壤墒情监测节点通过铱星模块从铱星网络接收数据,完成一次数据的传递。

系统中用到的土壤水分传感器采用自主研发的 BD-II 型土壤水分传感器,测量范围为 0 ~ 100%,测量精度为 $\pm 2\%$ 。该传感器由 100 MHz 高频信号源、同轴传输线及土壤探针组成,利用信号源中的高频电磁波沿着传输线发送至探针,一部分信号会被反射回信号源,因为探头的阻抗与传输线的阻抗不同,这样就在传输线上叠加形成了入射波与反射波的驻波,并且导致传输线上的电压幅值发生变化。土壤介电特性主要受含水率影响,同时土壤介电特性也将影响到探头阻抗,当含水率变化时,土壤的介电特性也随之变化,同时影响到传输线上电压幅值的变化,只要根据传输线上电压幅值差就能确定土壤含水率^[11]。BD-II 型土壤水分传感器具有响应时间快、成本低廉、适合长期埋设测量等优点。根据农业部 2012 年 4 月印发的《全国土壤墒情监测工作方案》要求监测 0 ~ 40 cm 土层的含水率,因此本系统土壤水分传感器分 3 层竖直排列,水平埋放,可以有效检测地表下 40 cm 范围内土壤水分的变化情况,分层埋放方式如图 4 所示^[12]。

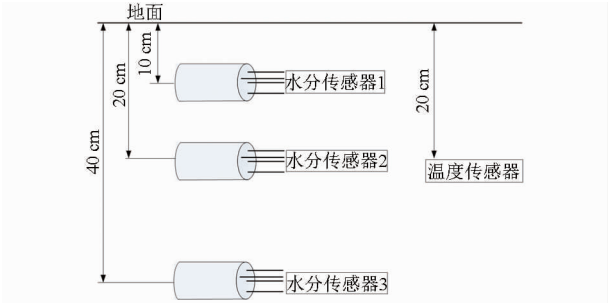


图 4 传感器分布

Fig.4 Schematic diagram of sensor distribution

温度传感器则采用 DALLAS(达拉斯)公司生产的 DS18B20 型温度传感器,测量范围 $-55 \sim 125^{\circ}\text{C}$,测量精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。该温度传感器具有体积小、抗干扰能力强、精度高、价格便宜等优点。

雨量传感器采用的是上海气象仪器厂有限公司生产的 SL3-1 型翻斗式雨量传感器,测量范围在 4 mm/min 以内,测量精度为 0.1 mm。该传感器采用翻斗,且是上下翻斗,由感应器干簧开关送出开关信号,无需供电即可正常工作。

系统根据从时钟模块读取的时间来采集传感器数据,并对其他模块进行时间设置,因此时钟对于整个系统至关重要。本文采用的是内置高精度具有温度补偿的 32.768 kHz 水晶振子的 IIC 总线接口方式的实时计时器 RX8025 芯片。芯片内置高精度计时精度调整电路,可以实现宽温度范围的高精准计时;芯片可在 1.7 ~ 5.5 V 的电压范围内工作,时钟模块设置了板载备用纽扣电池,使系统永久走时。

基于 Flash 存储单元的 SD 卡是专为安全性高、容量大、高性能目的设计的存储设备,本文选用闪迪公司的 SD 卡,存储容量为 4 GB,可以保存土壤墒情监测节点的数据长达 10 a 之久。SD 卡与中央处理器采用 SPI 的通信方式,读写速率可达 25 MB/s。为了使系统更加稳定,实现单片机对 SD 卡的文件操作,本设计移植了 znFAT 文件管理系统。有了文件管理系统,单片机即可对 SD 卡进行创建、打开、读写文件等操作。

系统状态指示模块中有 3 种指示灯,绿色的呼吸灯用于指示系统是否处于正常状态,三色发光二极管用于指示蓄电池的工作状态,5 个黄色指示灯用于指示当前铱星模块的信号强度。

触摸屏显示模块即采集器端的人机交互界面模块,用于实现对土壤墒情采集节点进行参数设置(采集间隔设置、系统时间的校准等)和显示传感器的数据。人机交互界面模块包括土壤信息显示模块、气象信息显示模块、传感器校正模块、系统参数设置模块和帮助模块。界面如图 5 所示。



图 5 触摸屏显示模块

Fig.5 Display module of touch screen

整个系统由智能太阳能充放电管理系统供电,供电系统由太阳能光伏板、铅酸蓄电池和太阳能充放电管理电路组成^[13]。太阳能供电系统为野外条件苛刻的场所提供了方便。为了降低功耗,本系统完成采集任务后便进入睡眠模式,直到下一个采集任务到来唤醒系统^[14]。通过近一年的试验表明,将电池电量充满以后,即使是在连续阴雨天气也能使系统正常工作 10 d 左右。图 6 为土壤墒情监测节点实物图,图中右下方为雨量传感器。



图 6 远程土壤墒情监测站

Fig. 6 Remote soil moisture monitoring station

3 系统软件设计

系统软件是基于 B/S 与 C/S 的混合架构,土壤墒情监测站与监测中心上位机(运行在服务器上)形成一个 C/S 结构,数据将最后汇总到 SQL Server 数据库中。另外,最终用户与 Web 服务器构成 B/S 结构。

3.1 监测中心上位机软件设计

本监测上位机的设计是基于 Visual Studio 2008 平台使用 MFC 开发的应用程序。监测中心上位机软件的总体框图如图 7 所示。主要包括网络通信模块(邮箱操作模块)、数据库管理模块、节点状态显示模块、操作信息显示模块、节点管理控制模块和短信报警模块等。其中网络通信模块(邮箱操作模块)负责读取与铱星模块绑定的邮箱数据,同时用户可以通过与铱星模块绑定的邮箱随时给无线墒情监测节点发送采集与设置命令;数据库管理模块负责在通信模块提取出有效数据后将数据存储于各类表中,以供用户进行查询修改等操作;节点网络状态显示模块负责从数据库中查询节点参数信息,并显示给用户;节点管理控制模块负责对在线、无线墒情监测节点进行传感器采集控制、参数修改及查询等各类操作;操作信息显示模块负责记录用户操作指令、提示错误信息并显示给用户;短信报警模块负责向用户发送报警短信。

编写好的上位机软件可以实现用户通过服务器监控软件对所有无线墒情监测节点进行配置和管理,为用户端提供图形的操作界面,负责对收到的数据进行转换、存储以及分析。

3.2 土壤墒情监测网站设计

土壤墒情监测网站是采用 ASP(Active server page)及 SQL Server 数据库为基础结构,使用 IIS(Microsoft internet information service)作为 Web 应用程序服务器,使用 LoadRunner 测试,可以承受 500 个用户左右的并发访问量。基于浏览器的应

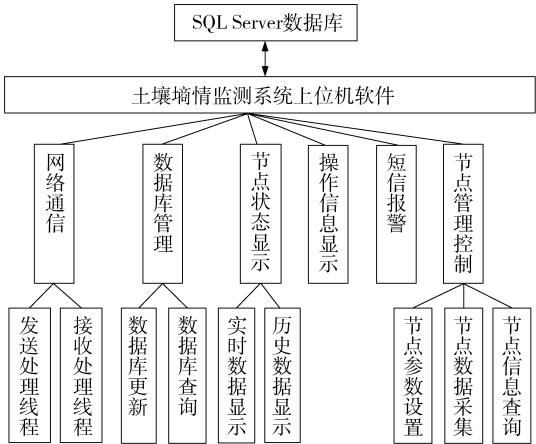


图 7 监测上位机软件流程图

Fig. 7 Flow chart of monitoring software

用软件,适用于查询及下载各个地区的数据,通过互联网传递系统数据。土壤墒情监测网站是土壤墒情实时监测系统的一个重要组成部分,用以方便地把获取到的土壤信息(包括水分和温度等)和降雨量信息即时反映在互联网上,并提供历史数据的查询以及下载等功能。图 8 为网站截图,图中显示的某个墒情监测节点近 10 d 的 3 个土壤含水率、2 个温度和 1 个降雨量传感器的变化曲线。

4 运行效果分析

本文叙述的基于铱星网络的土壤墒情实时监测系统已经应用于土壤墒情、土壤温度、大气温度及降雨量的监测中,无线墒情监测节点挂接了 3 个土壤含水率传感器(分 3 层布设)、3 个温度传感器(大气温度和土壤温度)以及 1 个降雨量传感器。下面对系统的可靠性、稳定性与运行成本进行分析。

4.1 可靠性分析

为了验证系统的可靠性,土壤墒情采集节点首先在北京妙峰山进行试验,此地区树木茂密程度适中,没有 GPRS 信号。测试时间为 200 min,每 2 min 采集一次传感器数据,将数据保存到采集板的 SD 卡中,同时将数据通过铱星模块发送到用户服务器端。测试过程中手动记录铱星模块的信号强度,表 1 为信号强度与通信成功率的对比,表中“0”表示信号质量为 0 格(没有信号),表中“5”表示信号质量为 5 格(信号最好)。表 1 数据表明,在 77% 的时间内信号强度在 3~5 之间,信号强度在 3~5 之间才能保证数据的可靠传输,数据延迟时间小于 1 min。在实际安装过程中土壤墒情监测节点安装在了空阔的田野中,铱星网络信号强度都可以保证在 3~5 之间,同时信号延迟时间也会缩短。



图 8 监测网站截图

Fig. 8 Screen shot of website

表 1 信号强度与通信成功率统计

	%					
信号质量	0	1	2	3	4	5
维持时间百分比	8	4	11	19	28	30
成功率	0	2	8	100	100	100

4.2 稳定性分析

为了验证整个系统的稳定性,选取北京市海淀区布设的一个无线墒情监测节点从 2013 年 4 月 28 日—2013 年 6 月 3 日连续 37 d 的数据进行分析。通过对比 SD 卡中存储的传感器数据和服务器端数据库中的传感器数据可知,在 37 d 中土壤墒情监测节点一共采集存储传感器数据 888 组,服务器中数据库存储数据 863 组,铱星模块正确传输数据的比例为 97.2%,满足土壤墒情监测系统数据通信的要求。图 9~11 分别是该节点 2013 年 4 月 28 日—2013 年 6 月 3 日土壤墒情、土壤温度、空气温度和降雨量的变化曲线。5 月 2 号降雨以后连续一个月没有降雨,在大气温度在 20℃ 左右连续干旱的情况下,由于土壤的蒸发以及植物的蒸腾作用 3 层土壤含水率在逐渐减小。5 月 2 日降雨以后 3 层土壤含水率基本相同,在 30% 左右,5 月 3—18 日上层土壤含水率变化速度略高于中层土壤含水率变化速度,但是 5 月 18 日以后,中层土壤含水率变化速度略高于上层土壤含水率变化速度。一个月的干旱期上层和中层土壤含水率变化速度明显高于下层土壤含水率变化速度。上层土壤含水率由 28.6% 变为 22.2%,中层土壤含水率由 29.5% 变为 22.1%,下层土壤含水率由 29.1% 变为 26.3%,上层和中层土壤含水率变化

幅值基本相同,下层土壤含水率变化幅值较小。在一个月的干旱期大气温度及土壤温度都在缓慢上升,但空气温度变化幅值高于土壤温度变化幅值。由分析曲线可知,系统运行稳定可靠。

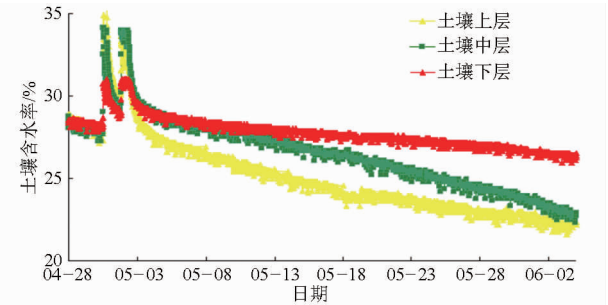


图 9 土壤墒情变化曲线

Fig. 9 Curves of soil moisture

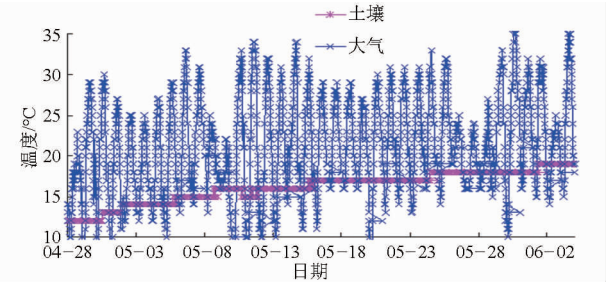


图 10 温度变化曲线

Fig. 10 Curves of temperature

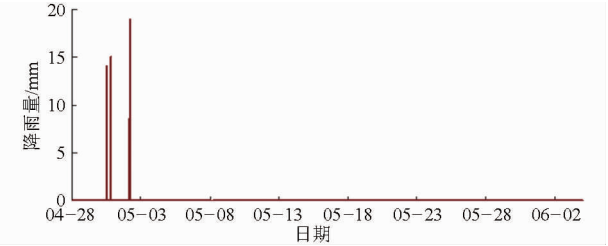


图 11 降雨量变化曲线

Fig. 11 Curves of rainfall

4.3 运行成本分析

土壤墒情监测节点每小时传输一次数据,每个数据包 14 个字节(1 个字节的协议号、1 个字节的设备号、6 个字节的土壤水分数据、2 个字节的温度数据、2 个字节的降雨量数据、1 个字节的 CRC 校验、1 个结束字节),1 个月传输 10 080 个字节。目前铱星公司的 SBD 业务在中国市场按照传输数据流量进行收费,土壤墒情监测系统选择 200 元/月的收费标准,包括 12 000 个字节,超过部分每 1 000 个字节收取 10 元流量费。

5 结束语

设计了一种基于铱星通信的土壤墒情实时监测系统,实现了传感器数据的实时采集、通过铱星 9602 模块进行全球无死角数据传输、可通过网络进行数据的实时查询等功能。系统采用清洁能源——太阳能供电方式,为偏远、无 GPRS 信号地区提供了一个长时间不间断监测土壤墒情、温度、降雨量的可实施方案,为指导农林生产、抗旱、防涝以及制定灌溉策略提供了可靠的数据依据。

参 考 文 献

1 杨绍辉. 土壤墒情(旱情)监测技术与预报模型研究[D]. 北京:中国农业大学,2006.

2 孙凯,王一鸣,杨绍辉,等. 区域墒情特征的研究[J]. 水利学报,2005,36(3):355-359.
Sun Kai,Wang Yiming,Yang Shaohui,et al. Study on regional characteristics of soil moisture content[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005,36(3): 355-359. (in Chinese)

3 孙凯,王一鸣,杨绍辉. 墒情监测取样方法的研究[J]. 农业工程学报,2004,20(4):74-78.
Sun Kai, Wang Yiming, Yang Shaohui. Sampling method for soil moisture monitoring[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(4): 74-78. (in Chinese)

4 Goward S N. Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature-vegetation index measurements :an exploration with the simplified simple biosphere model[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(2-3): 225-242.

5 Braun P, Maurer B, Muller G, et al. An integrated approach for the determination of regional evapotranspiration using mesoscale modeling, remote sensing and boundary layer measurements[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2001, 76(1-2): 83-105.

6 刘伟,施建成. 基于机载极化雷达技术的农作物覆盖区土壤水分估算[J]. 干旱区地理,2005,28(6):856-861.
Liu Wei, Shi Jiancheng. Content in vegetated areas using multi-polarization airborne SAR[J]. Arid Land Gepgraphy, 2005, 28(6): 856-861. (in Chinese)

7 杨卫中,王一鸣,石庆兰,等. 吉林市土壤墒情监测系统开发及利用[J]. 农业工程学报,2010,26(2):177-181.
Yang Weizhong,Wang Yiming,Shi Qinglan,et al. Development and application of soil moisture monitor system in Jilin Region[J]. Transactions of the CSAE,2010,26(2):177-181. (in Chinese)

8 杨绍辉,王一鸣,孙凯,等. 土壤墒情(旱情)监测与预测预报系统的设计与开发[J]. 中国农业大学学报,2007,12(4):75-79.
Yang Shaohui, Wang Yiming, Sun Kai, et al. Design and development of a soil moisture content monitoring and forecasting[J]. Journal of China Agricultural University, 2007,12(4):75-79. (in Chinese)

9 Iridunm Satellite LLC. Iridium satellite data services white paper[R]. USA:Iridium,2003.

10 Iridum Satellite LLC. Iridium short burst data service developers guide, Release 2.0[R]. USA: Iridium, 2007.

11 赵燕东,王一鸣. 基于驻波率原理的土壤水分传感器的测量敏感度分析[J]. 农业工程学报,2002,18(2):5-8.
Zhao Yandong, Wang Yiming. Analysis of sensitivity of soilmoisture measurement based on standing-wave ratio[J]. Transactions of the CSAE,2002,18(2):5-8. (in Chinese)

12 章军富,陈峻崎,胡剑非,等. 基于 GPRS/SMS 和 μ C/OS 的都市绿地精准灌溉控制系统[J]. 农业工程学报,2009,25(9):1-6.
Zhang Junfu, Chen Junqi, Hu Jianfei, et al. Control system of urban green land precision irrigation based on GPRS/SMS and μ C/OS embedded technology[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(9):1-6. (in Chinese)

13 韩亚东. 太阳能光伏发电系统设计及供电系统优化方法研究[D]. 沈阳:东北大学,2008.

14 胡培金,江挺,赵燕东. 基于 Zigbee 无线网络的土壤墒情监控系统[J]. 农业工程学报,2011,27(4):230-234.
Hu Peijin, Jiang Ting, Zhao Yandong. Monitoring system of soil water content based on Zigbee wireless sensor network [J]. Transactions of the CSAE,2011,27(4):230-234. (in Chinese)

15 杨绍辉,杨卫中,王一鸣. 土壤墒情信息采集与远程监测系统[J]. 农业机械学报,2010,41(9):173-177.
Yang Shaohui, Yang Weizhong, Wang Yiming. Remote collecting and monitoring system of soil moisture content information[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(9):173-177. (in Chinese)