

Design of Water Depth Surveying System Based on Wireless Sensor Networks*

Chunping Liu¹, Shenyong Gao², Peng Liu¹

¹Institute of Computer, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou

²Department of Computer and Information Engineer, Zhejiang University of Water Resource and Electric Power, Hangzhou
Email: liucp777@126.com

Received: Nov. 27th, 2013; revised: Nov. 28th, 2013; accepted: Dec. 3rd, 2013

Copyright © 2013 Chunping Liu et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: Surveying depth of water is particularly important in the management and development of reservoirs and rivers. In view of high cost and long cycle of the traditional artificial surveying method, this paper develops a real-time water depth surveying system based on wireless sensor networks. In this system, we design a node used for surveying depth of water, which uses the ultrasonic ranging sensor to survey and the angle detection sensor to calibrate. The processed data transmitting to the client can enable users to obtain depth information of the target area in real time. If we deploy large-scale of node, it can be used to measure underwater terrain. Preliminary experimentations prove the convenient deployment, high accuracy, practicability and popularization value of the system. This paper contributes to the exploration research on the applications of WSN in hydraulic engineering survey.

Keywords: Wireless Sensor Networks; Water Depth Surveying; Surveying System

基于无线传感器网络的水深监测系统设计*

刘春平¹, 高申勇², 刘鹏¹

¹杭州电子科技大学计算机学院, 杭州

²浙江水利水电学院计算机与信息工程系, 杭州

Email: liucp777@126.com

收稿日期: 2013年11月27日; 修回日期: 2013年11月28日; 录用日期: 2013年12月3日

摘要: 水深测量在水库、河道等水域的治理开发中尤为重要, 针对传统测量方法成本高、周期长的缺点, 该文采用无线传感器网络技术, 设计了一套水深实时监测系统。该系统采用了自行设计制作的无线水深测量节点, 通过超声波测距传感器测量水深数据, 并通过倾角检测传感器进行校准, 数据经处理后传输到客户端, 可以使用户获取目标水域的实时水深变化信息, 若大规模部署节点, 可应用于水下地形的测量。初步试验表明该系统部署方便, 测量精度较高, 具有一定的实用性和推广价值。该文为无线传感器网络在水利测量方面的应用做出了探索性研究。

关键词: 无线传感器网络; 水深测量; 监测系统

1. 引言

水库、河道等水域是人类重要的水利资源, 在波

*资助基金: 浙江省自然科学基金资助项目(LY12F03002), 浙江省重点科技创新团队项目资助(R09046-02)。

浪和水流日积月累地联合作用下, 水底泥沙淤积会带来一系列问题: 如对航运带来不利影响, 破坏上游生态环境等。因此, 实时监测水底地形特征具有迫切的必要性和社会意义^[1]。水库、河道测量是河流开发和

治理的基础工作，其中重要的一步是水深测量。目前的水深测量方法主要有测尺直接测量和测深仪测量等，这些方法需要测船人工测量，周期长且成本高。由于水深测量具有范围分布广，空间位置不确定等因素，传统测量方法无法满足长期实时监测需求^[2]。无线传感器网络具有分布式、低成本、部署灵活和自组织等特点，广泛地应用在环境监测、工业控制等领域，大量的传感器节点通过自组织形式构成网络，能够实时监测、采集到网络分布区域内的对象信息，并加以处理，完成对环境的数据采集和监测任务^[3]。本文基于无线传感器网络技术设计开发的水深监测系统，能够弥补传统测量方法的不足之处，可用于水库、河道水底地形的长期实时监测，相比现有测量方法，具有成本低、效率高，安全性好等优点。

2. 系统体系结构和主要功能

2.1. 体系结构

基于无线传感器网络的特点，所设计系统模型如图 1 所示。将目标水域划分为若干个子区域，在每个子区域水面上部署无线水深测量节点。所有节点周期性地采集水深数据，并以无线多跳的方式形成自组织网络，将数据传送至汇聚网关，然后由汇聚网关传给中央服务器存储，用户能通过 Web 客户端监测界面查看目标水域的信息。根据无线水深测量节点分布的特点，本文设计了一个由感知层、传输层和应用层构成的水深监测系统^[4]。

(1) 感知层：无线水深测量节点主要负责测量水深，组网并将数据传输到汇聚网关。节点通过 IEEE 802.15.4 协议形成多跳的通信网络，尽可能地将信息数据传送到汇聚网关。

(2) 传输层：汇聚网关主要完成数据汇聚转发和通信协议的解析转换。网关将从感知层接收到的数据按所设计的协议字段解析后重新封装，考虑传感器节点数量多、数据采集频率高且允许出现偶然丢包的特点，采用 UDP 协议将数据包转发到中央服务器。

(3) 应用层：中央服务器是监测系统和外界通信的桥梁，服务器程序将系统获得的数据按协议解析后存储到相应数据库表中，用户可通过 Web 界面进行查阅。这种结构允许用户通过网络远程查看水深变化情况。

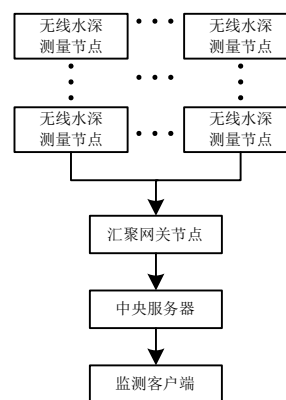


Figure 1. Model of water depth surveying system based on wireless sensor networks
图 1. 基于无线传感器网络的水深监测系统模型

2.2. 主要功能

(1) 采集和存储数据。网络中无线水深测量节点将监测水域的水深变化数据汇聚到中央服务器存储。自组织网络形式支持节点的动态添加和删除。

(2) 数据的访问和管理。用户页面采用真实二维地图或卫星地图的形式呈现，方便用户对节点部署进行操作管理，数据以图表化的方式显示。若采用改进的地形拟合算法处理数据，可直观地模拟水底的地形风貌特征。

3. 系统硬件设计

由于无线水深测量节点部署在水库、河道上，与一般监测环境不同，对此专门设计特殊的防水外壳，能够以浮标的方式固定部署在目标点。同时还需考虑风浪摇摆，水流流速等环境因素的影响。由于超声波的指向性强，能量消耗缓慢，在介质中传播的距离较远，常用于距离的测量，故本节点设计采用测量精度高，抗干扰性强的超声波测距传感器，并加入了倾角检测传感器校正倾斜误差。

3.1. 无线水深测量节点

无线水深测量节点是水深监测系统中最为重要的部分，它的主要硬件结构由 TelosB 节点模块、超声波测距传感器模块、倾角检测电路模块组成，实物设计如图 2 所示。

3.1.1. TelosB 节点模块

本节点模块由美国 Crossbow 公司研制，专为无

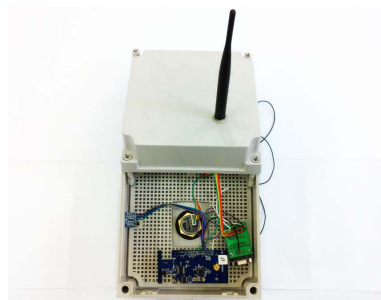


Figure 2. Wireless water depth surveying node
图 2. 无线水深测量节点实物图

线传感器网络设计的超低功耗通用节点，主要由数据采集单元、数据处理单元、无线通信单元和电源管理单元组成。节点采用 TI 公司的 MSP430F1611 处理器，工作频率达到 8 MHz，同时集成了符合 IEEE 802.15.4 协议规范的无线收发芯片 CC2420。基于节点，再辅以合理的低功耗监听协议，适合各类低功耗应用场合。节点为用户提供了连接其他设备的扩展接口，如 UART 接口，多个数字 I/O 接口和模数转换 ADC 接口等。无线水深测量节点基于本模块开发接口电路，连接其他传感器电路构成系统电路。

3.1.2. 超声波测距传感器模块

本模块采用的 MB7067 传感器是一款工业上常用的超声波测距传感器，达到 IP67 防水等级，具有天气适应性强、抗噪声、自动校准、窄带测量、体积尺寸小等优点，适合应用在水深测量系统。其主要参数有：工作电压 3.0 V~5.5 V，采用电池就能供电；工作电流 2.1 mA，并能切换到休眠模式；两种信号输出方式分别为 RS232 串口信号输出方式和脉冲输出方式；测量范围 20 cm~700 cm，测量精度为 1 cm。

超声波测距传感器测量水深采用 TOF (Time of Flight) 渡越时间法^[5]，基本工作原理为传感器发射超声波，超声波在传输过程中碰到障碍物就会形成反射波，超声波接收器接收回波，利用发射和接收的时间差以及超声波在水中的传播速度来计算测量点跟障碍物之间的距离。本传感器采用自发自收单探头方式，如图 3 所示为单探头原理图。

从图 3 中可以看出，若超声波在水中的传播速度为 c ，测量时间为 t ，超声波探头到障碍物之间的距离为 S ，则有：
$$S = \frac{1}{2}ct。$$

本模块与 TelosB 节点硬件连接结构图如图 4 所

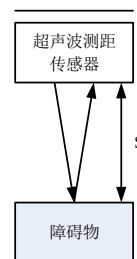


Figure 3. The schematic diagram of the ultrasonic ranging sensor
图 3. 超声波测距传感器原理图

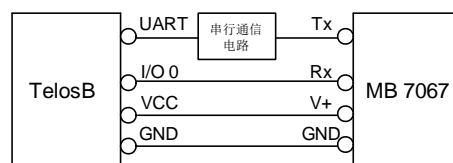


Figure 4. MB7067 ultrasonic ranging sensor
图 4. MB7067 超声波测距传感器

示：其中，MB7067 超声波测距传感器的电源由 TelosB 节点的电源管理单元提供；通过 I/O 0 输出高低电平切换工作状态和休眠状态；为了提高节点的测距精度，选取 RS232 串口信号输出方式，由于 TelosB 节点的 UART 接口输入的电平为 TTL 电平，故中间需要串行通信电路来实现 EIA 电平和 TTL 电平的转换。

3.1.3. 倾角检测传感器模块

本模块基于 MMA7361L 三轴加速度传感器开发，主要用于实时检测节点的倾斜度，利用测量值校正因水面波浪导致模块倾斜产生的测量误差。MMA7361L 的主要特性有：高灵敏度相位可供选择 ($\pm 1.5 \text{ g} \pm 6 \text{ g}$)；工作电压较低：2.2 V~3.6 V；正常工作电流为 400 μA ，休眠模式为 3 μA ；通过低通滤波器调节信号，准确度高。

本模块与 TelosB 节点硬件连接结构图如图 5 所示：根据实际用途，无线水深测量节点只需校正垂直方向的倾斜角度，即需要获得 Z 轴的模拟加速度值，通过 TelosB 节点 ADC0 接口进行电压采样并模数转换。I/O 1 控制 MMA7361L 传感器的量程，输入高电平选择 6 g，低电平选择 1.5 g。I/O 2 控制 MMA7361L 工作模式和休眠模式的切换。同样，MMA7361L 的电源由 TelosB 节点的电源管理单元提供。

3.2. 汇聚网关

汇聚网关主要由嵌入式处理器、存储器、I/O 系

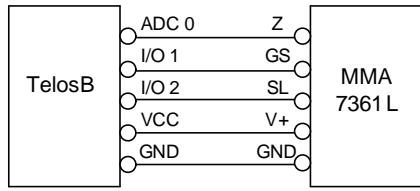


Figure 5. MMA7361 three-axis acceleration sensor
图 5. MMA7361 三轴加速度传感器

统和外接 TelosB 节点等组成。如图 6 所示。汇聚网关设计的关键问题是处理速度，嵌入式处理器采用了高性能的 S3C6410 芯片，主频 800 MHz，内存达到 256 MB，采用容量大小为 256 MB 的 FLASH，提高系统的处理速度和增大存储节点的信息量。嵌入式外围设备主要采用了以太网卡，WIFI 模块等，提供有线和无线的通信方式。外接 TelosB 节点连接在网关 I/O 系统的 USB 接口上，其功能是作为所有无线水深测量节点的根节点，接收感知层的数据。

4. 系统软件设计

4.1. 底层软件设计

底层软件分为节点模块和网关模块。

(1) 节点模块平台选用的是专为无线传感器网络设计的嵌入式 TinyOS 操作系统，采用 nesC 语言开发^[6]。软件流程图如图 7 所示，无线水深测量节点经初始化后，分别通过超声波测距传感器和倾角传感器周期性采集所处水域的水深数值和倾斜角度值，存入发送队列；各节点间采用 IEEE 802.15.4 协议实现通信，所有节点采用 CTP (Collection Tree Protocol)多跳路由协议传输数据，完成数据发送和转发的功能^[7]。CTP 协议是基于树的汇聚协议，网络中的某些节点将自己设为汇聚根节点，而其他节点形成到这些汇聚根节点的路由树，CTP 协议没有地址限制，节点并不是向固定的汇聚根节点发送数据包，而是选择下一跳节点的同时已经隐式地选择了汇聚根节点，各节点根据路由梯度，自主选择一条到汇聚网关链路质量高的路径。同时针对节点的能量消耗，模块加入了低功耗监听管理，让节点定时处于休眠状态，降低了无线水深测量节点的功耗，延长工作周期。

(2) 网关模块基于嵌入式 Linux 开发，实现数据转发，传输协议转换等功能。网关作为互联网和无线传感网络之间的媒介，通过 IEEE 802.15.4 协议与无线

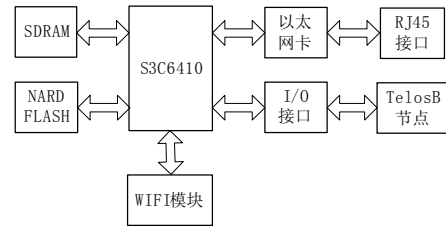


Figure 6. Framework of gateway
图 6. 汇聚网关框架

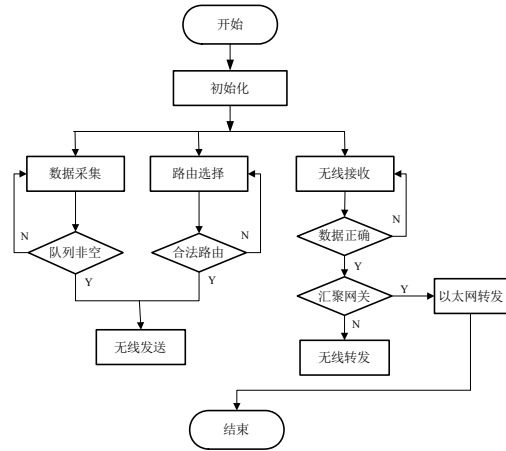


Figure 7. Flow chart of node module software
图 7. 节点模块软件流程图

传感网进行通信，通过 UDP 协议与中央服务器进行信息交互，因此，汇聚网关接收到感知层所有无线水深测量节点的数据后，需要进行协议解析，提取有效数据部分，并按照 UDP 协议重新封装后将数据包上传至中央服务器。

4.2. 应用层系统软件设计

应用层系统软件必须方便用户使用，提供友好的图形化操作界面，并提供拓展功能。主要可分为 3 个部分：数据分析和处理模块，数据库存储模块，Web 客户端模块。

(1) 数据分析和处理模块：模块的主要功能是将超声波测距传感器和倾角传感器的原始数据转换为所测节点位置的标准的测深距离。中央服务器收到数据后，按照协议格式对数据进行解析，提取有效数据段部分进行处理，如数字滤波、数值计算、标度转换等。

其中，若同一时间内收到的超声波测距传感器的距离值为 H_0 ，倾角传感器的垂直方向的倾角值为 θ ，则获得的校准测深值 $H = H_0 \times \sin \theta$ 。

数据的过滤粗差检测可采用以下的方法: 首先计算单位采样周期内的测深数据的平均值 $\bar{H} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_i$, n 为单位采样周期内所测得数据的个数, 通常 $n \leq 10$; 计算测深数据的中误差 m , $m = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n d_i^2 / n - 1}$, $d_i = H_i - \bar{H}$; 假设无线水深测量节点的标称误差为 m_0 , 若 $m \leq m_0$, 则表明测深数据无粗差, 若 $m > m_0$, 则表明测深数据中存在粗差。取二倍中误差作为极限误差, 一般剔除满足 $|d_i| > 2m_0$ 的观测值中最大的 $|d_i|$ 所对应的观测值。

(2) 数据库存储模块: 本模块的作用主要是有效地存储历史数据, 包含历史库和实时库。历史数据库保存 3 个月的数据, 可以提取不同时间段内的历史数据, 而实时库可显示当前每个节点的水深变化情况。

(3) Web 客户端模块: Web 客户端模块软件基于 JAVA EE 开发, 管理用户能够通过 Internet 登录查看。系统可由地图和卫星图两种模式查看节点监测区域的部署情况, 通过参数设置能够管理和查看每个节点的信息, 采用动态实时曲线图方式显示各个节点的历史数据。系统提供的扩展功能主要有: 对节点信息与所采集的数据进行定性的分析, 提供报警功能; 当节点的数量达到一定值时, 运用改进的地形拟合算法处理数据, 模拟水底地形图, 制定确保水利安全的生产方案。

5. 系统测试及性能分析

5.1. 系统测试

作为研究需要, 试验安排在校园内某个湖泊进行, 所测量的水域水深范围不超过 7 m, 满足系统的测量需求。在湖泊内选取 5 个测量点部署无线水深测量节点。系统进行了长时间的运行测试, 客户端界面数据显示系统运行良好, 节点地图的部署测量信息情况如图 8 所示。

每个节点数据采样间隔设定为 15 min, 每次采样 10 次数据计算平均值, 取 1002 号节点在 10 小时内收到的数据画统计图, 如图 9 所示, 经计算 1002 号节点所在区域水深约为 153 cm。

将 5 个测量点的平均测量深度和实际深度对比, 分析情况如表 1 所示, 误差结果表明系统的测量精度



Figure 8. Surveying information figure of node's deployment
图 8. 节点部署测量信息显示图

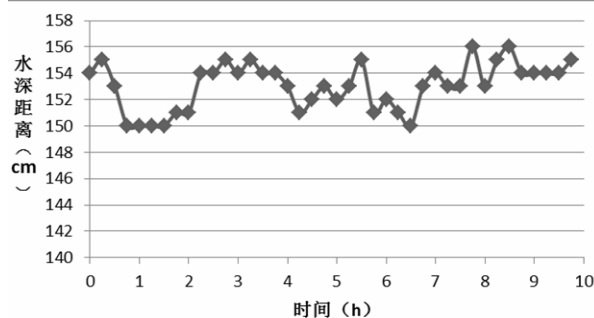


Figure 9. Statistical figure of No. 1002 node data
图 9. 1002 号节点数据统计图

Table 1. System resulting data analysis of experiment
表 1. 试验系统结果数据分析表

测量点	测量深度(cm)	实际深度(cm)	误差(%)
1 号	135	140	3.57
2 号	153	148	3.38
3 号	178	177	0.56
4 号	147	151	2.64
5 号	167	172	2.90

在允许的范围内, 满足实际测量的要求。

5.2. 误差分析

可能造成测量误差的原因主要有:

(1) 硬件误差: 声速受温度的影响, 声波传播途中水温会变化, 超声波测距传感器的测量精度难免会受到水温的影响; 传感器采用自发自收单探头方式, 回波幅值随传播距离成指数规律衰减, 若同一次接收正方向上的回波信号无法检测到, 则只能等待下一个

波峰，造成接收时间误差。

(2) 软件误差：节点软件在每次采样数据时需将超声波测距传感器和倾角检测传感器唤醒，若定时器唤醒失败，则读取的数值可能为上次保存的数值，可能造成误差。

5.3. 系统功能扩展

通过系统的实现和大量试验发现，提出的基于无线传感器网络的水深监测系统可以成功获取水深信息。如果增大节点的部署密度，并通过节点定位算法，可以轻松地实现水下地形表面的三维重建工作。这种三维表面定位算法通过高度信息已知，从而映射到二维平面定位上的方法在三维定位领域已经有了大量的分析和研究^[8,9]。

根据以上分析可知，当在被测区域内增大节点的部署密度，且通过定位算法获得节点二维平面坐标的情况下，将节点所在点测得的深度进行高度插值，可大致描绘出所在区域的水下地形表面图。仿真场景设定为在一个 100 m × 100 m 的区域内部署 20 个节点测量水深，测得的数据用 MATLAB 软件模拟水下地形如图 10 所示。

6. 结论

试验结果表明：本文设计的基于无线传感器网络的水深监测系统部署方便、扩展灵活，能够及时反映水深的变化情况。如适当地增加节点部署密度，配合合适的二维定位算法，还能够完成水下地形的三维表面定位功能。如果将本系统应用于水库、河道等水域的安全监测，管理部门可以实时掌握水下地形信息，从而有效避免因水下淤积而产生的不利影响。另外，

相关技术人员可对数据进行离线数据挖掘，用于分析水深变化情况，掌握水下地形变化规律，也是本系统应用领域的一种开拓。

参考文献 (References)

- [1] 韩其为, 杨小庆 (2003) 我国水库泥沙淤积研究综述. *中国水利水电科学研究院学报*, **1**, 169-178.
- [2] 王玉振 (2007) 河道水库测量精度评估与质量控制. 解放军信息工程大学, 郑州.
- [3] Akyildiz, I.F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., et al. (2002) Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, **38**, 393-422.
- [4] Pakzad, S.N., Fenves, G.L., Kim, S., et al. (2008) Design and implementation of scalable wireless sensor network for structural monitoring. *Journal of Infrastructure Systems*, **14**, 89-101.
- [5] 李扬 (2012) 基于超声波测距的船舶液位检测系统. 重庆大学, 重庆.
- [6] TinyOS Community Forum (2011) TinyOS Tutorials. http://tinyos.stanford.edu/tinyos-wiki/index.php/TinyOS_Tutorials
- [7] Gnawali, O., Fonseca, R., Jamieson, K., et al. (2009) Collection tree protocol. *Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, Berkeley, 4-6 November 2009, 1.
- [8] Zhao, Y., Wu, H., Jin, M., et al. (2012) Localization in 3D surface sensor networks: Challenges and solutions. *Proceedings of IEEE INFOCOM*, Orlando, 25-30 March 2012, 55-63.
- [9] 王瑞锦, 秦志光, 包红来, 等 (2013) 基于三角划分的复杂 3D 山体表面定位算法. *计算机应用研究*, **30**, 2823-2826.

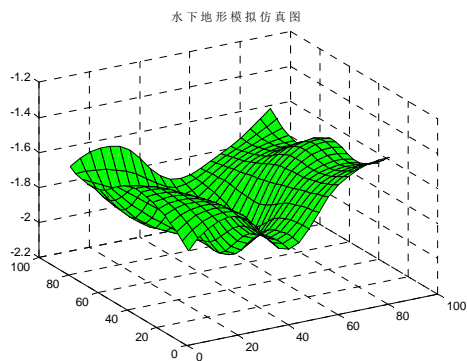


Figure 10. Simulation diagram of underwater terrain
图 10. 水下地形模拟仿真图