

# 基于无线传感网络的水质在线移动监测系统<sup>①</sup>



刘燕娜<sup>1</sup>, 屠德展<sup>2</sup>, 潘晓曼<sup>1</sup>, 高学江<sup>1</sup>, 王 瑞<sup>1</sup>, 洪 榛<sup>3</sup>

<sup>1</sup>浙江理工大学 机械与自动控制学院, 杭州 310018)

<sup>2</sup>(加利福尼亚大学洛杉矶分校 电气与计算机工程系, 洛杉矶 CA 90095-1594)

<sup>3</sup>浙江工业大学 网络空间安全研究院, 杭州 310023)

通讯作者: 洪 榛, E-mail: zhong1983@zjut.edu.cn

**摘 要:** 针对静态离线水质监测方法存在采样误差大、监测频次低、监测数据分散以及无法实时反馈水质状况的连续动态变化等问题, 研发了基于无线传感网络的水质在线移动监测系统. 该系统由水下监测器、浮标节点和可视化软件组成. 水下监测器模仿金枪鱼外观设计, 内部装备水质传感器 (温度、pH、浊度和电导率等) 用于获取水质参数信息; 浮标节点采用太阳能供电方式, 负责接收、处理、中继及转发来自多个水下监测器的数据; 多个水下监测器之间, 水下监测器与浮标节点之间采用 170 MHz 无线射频模块或水声通信, 浮标节点与岸边基站采用 ZigBee 通信; 可视化软件包括上位机与移动终端. 本系统的实施解决了传统人工取样监测的局限性, 实现水域任意点的水质在线监测.

**关键词:** 水质监测; 无线传感网络; 在线移动; 编队检测; 仿生节点

引用格式: 刘燕娜, 屠德展, 潘晓曼, 高学江, 王瑞, 洪榛. 基于无线传感网络的水质在线移动监测系统. 计算机系统应用, 2021, 30(9): 104-109. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/8087.html>

## Online Mobile Water Quality Monitoring System Using Wireless Sensor Networks

LIU Yan-Na<sup>1</sup>, TU De-Zhan<sup>2</sup>, PAN Xiao-Man<sup>1</sup>, GAO Xue-Jiang<sup>1</sup>, WANG Rui<sup>1</sup>, HONG Zhen<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

<sup>2</sup>(Department of Electrical and Computer Engineering, UCLA, Los Angeles, CA 90095-1594, USA)

<sup>3</sup>(Institute of Cyberspace Security, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** An online mobile water quality monitoring system, which is based on wireless sensor networks, is developed to solve the existing problems in the static off-line monitoring methods, such as large sampling errors, low monitoring frequency, dispersed monitoring data and lack of real-time feedback on continuous dynamic changes of water quality. The system is composed of an underwater monitor, buoy nodes, and visual software. The exterior design of the underwater monitor mimics tuna appearance, and the internal is equipped with water quality sensors (regarding temperature, pH, turbidity, conductivity, etc.) to acquire the parameters of water quality. Buoy nodes, depending on solar power, are responsible for receiving, processing, relaying, and forwarding the data from multiple underwater monitors. The underwater monitors communicate with each other and the buoy nodes through a 170 MHz wireless radio frequency module or underwater sound, while the buoy nodes communicate with shore stations by ZigBee. In addition, visual software includes PC and mobile terminals. This system overcomes the limitations of traditional monitoring based on manual sampling, achieving online monitoring of water quality at any point.

**Key words:** water quality monitoring; wireless sensor network; online moving; formation monitoring; bionic node

① 基金项目: 浙江省基础公益研究计划 (LGF18F010008)

Foundation item: Basic Research Plan for Public Welfare of Zhejiang Province (LGF18F010008)

收稿时间: 2020-12-13; 修改时间: 2021-01-11, 2021-01-20; 采用时间: 2021-01-27; csa 在线出版时间: 2021-09-02

我国水资源总量 2.8 万亿立方米,居世界第 4 位,但我国人均水资源量只有世界平均水平的 1/4,属于水资源紧缺的国家<sup>[1]</sup>.随着社会经济的迅速发展,水污染形势愈发严重.水污染已由局部发展到全流域,由下游蔓延到上游,由城市扩散到农村,由地表延伸到地下<sup>[2]</sup>.2013 年浙江省提出“五水共治”的理念,人们对水质健康的关注日益增加,水质安全监测研究成为广受关注的研究领域.为更好地发挥科技在“五水共治”中的支撑引领作用,在 2015 年浙江省科技厅也发布了《2015 年“五水共治”科技专项行动计划》通知.2015 年 4 月 16 日,国务院正式发布《水污染防治行动计划》,到 2030 年消除城市臭水,将拉动万亿投资.早发现,早解决,从源头解决水质污染是一种有效途径.

国内外的众多研究机构都在积极地对水质监测系统进行研究.国外高校在这方面已走在了前列,如印度普纳大学开发了基于水下无线传感网的太阳能板供电的水质在线监测系统<sup>[3]</sup>;澳大利亚墨尔本大学设计了低功耗的水质自动监测系统<sup>[4]</sup>;英国埃塞克斯大学研究将机器鱼用于泰晤士运河的水质监测<sup>[5]</sup>;波兰克拉科夫工业大学设计仿生水下机器人用于执行情报、侦察和监视 (ISR) 任务<sup>[6]</sup>.国内高校近年来也加快了对水质监测系统的研究与开发,如西北工业大学研发了低功耗的水下传感器节点<sup>[7]</sup>;北京航空航天大学利用机器鱼对太湖进行水质检测<sup>[8]</sup>.基于国内外的研究现状,存在采样误差大、监测频次低、监测数据分散以及无法实时反馈水质状况的连续动态变化等问题.综合实际情况,针对水质监测系统,研发设计了可移动的水质在线监测系统,提出了多个水下监测器编队检测的方法,采用 GPS 与惯性导航组合定位方式进行协同驱动控制,实现了多个水下监测器编队检测,监测范围大、效率高.

## 1 系统架构

本系统采用可移动的水下监测器在线监测水质状况及采集水体样本.系统结构框图如图 1 所示,水下监测器装配有动力模块,能在浅水域以一定的速度移动,采集水环境数据,并利用频率 170 MHz 的无线射频模块或水声通信模块将水环境数据传输至浮标节点;浮标节点安放在水面浮标上,接收、处理及融合附近多个水下监测器上传的水环境数据,并通过 ZigBee 将处理后的数据包以多跳的方式传输至陆地基站;基站布设在被监测水域附近的陆地上,负责接收和处理浮标

节点上传的数据,并通过基站将采集到的信息传递到数据终端;数据终端包含数据分析与可视化处理,最终将数据以图表的形式反馈被监测水域的水环境参数.

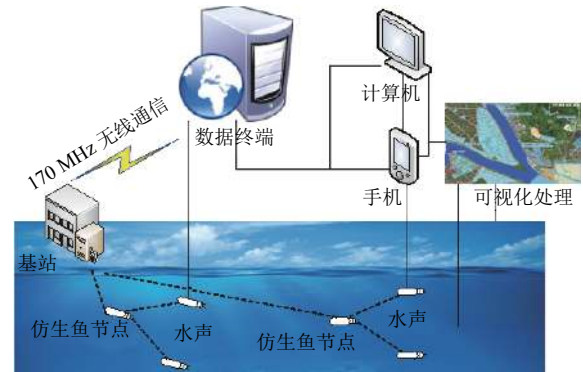


图 1 系统结构框图

水下监测器主要负责水环境在线移动监测,浮标节点主要负责接收、处理、中继及转发来自多个水下监测器的数据;基站负责整个被监测水域的水环境参数汇聚及上传至数据终端,多个水下监测器与附近的浮标节点形成点对点单跳星型网络,多个浮标节点与基站形成多跳自组织网络;数据终端将得到的数据通过分析进行可视化处理,其可视化终端主要包含计算机和手机.计算机通过与基站的有线连接获取水环境参数,将数据做整理分析,最后将整理后的数据做可视化处理;另外,整理后的数据也将被发送至云端服务器,手机可以通过应用程序软件访问云端服务器获取水环境信息,并做可视化处理.

## 2 系统硬件设计

### 2.1 水下检测器硬件设计

水下监测器硬件结构如图 2 所示.

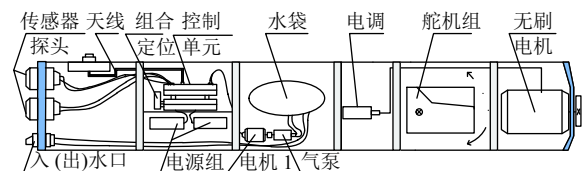


图 2 水下监测器硬件结构图

水下监测器作为一个水下可移动节点,其外壳是防水防腐的密封舱.开启电源后,浸于水中的传感器探头采集水环境参数,其模拟信号经过控制处理单元中的微弱信号调理模块放大后,再经自带数模转换的微

控制器单元进行 AD 转换. 最终, 得到的水环境数据通过 170 MHz 无线射频模块或水声通信模块发送至浮标节点. 其中, 水下监测器装配有温度、浊度、pH 值和电导率等传感器, 用于监测水的温度、浊度、pH 值与电导率等多种参数值; 采用陀螺仪与加速度计获取水下监测器的游动姿态, 依靠尾部的无刷电机发动螺旋桨, 利用方向舵与升降舵配合控制改变方向; 另外, 控制处理单元是整个水下监测器执行操作的处理中心, 控制电机 1 驱动气泵抽水入水袋或排出水袋内的水, 实现水下监测器的上下沉浮; 当水下监测器位于水下时, 采用惯性导航系统实现导航定位; 当其浮出水面时, 采用 GPS 实现导航定位并进行位置校正和时间校准.

### 2.2 浮标节点硬件设计

浮标节点 (结构如图 3 所示) 固定在水面, 采用太阳能供电方式, 可以长时间工作, 通过 170 MHz 无线射频模块接收水下监测器传输的数据, 采用 GPS 模块获得被监测水域的地理位置信息, 不同于水下监测器的 GPS 模块, 其主要用于基于地理位置的数据转发以及基于可视化界面的水域地理信息显示.

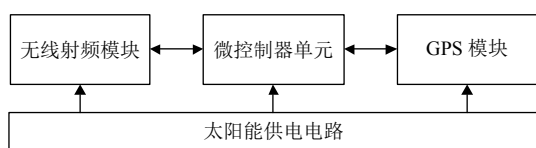


图 3 浮标节点结构图

## 3 系统软件设计

数据终端采用 PC 和移动终端实现. PC 通过无线串口模块实现与浮标节点的通信, 按照自定义的通信协议接收并解析数据, 利用 Matlab 软件建立时间-水质和位置-水质的数学模型, 最终实现水质数据的实时反馈与可视化反馈; 另外, 将处理后的数据导入数据库与云端服务器. Android 手机的 APP 通过访问云端服务器实时查看水质信息. 数据流图如图 4 所示.

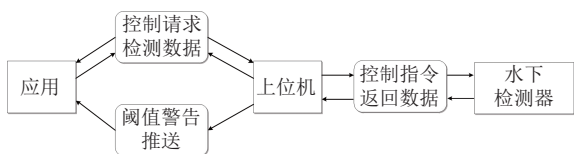


图 4 数据流图

### 3.1 通信协议设计

通信协议设计实际上在任何系统中都发挥了不可替

代的作用, 因为只有合适的通信协议才能交互数据. 根据相关的约定, 综合考虑实验的实际情况, 根据各类实验制定了总体格式类似、局部却有所不同的通信协议格式. 如针对水质参数传递, 定制的协议格式如图 5 所示.

#	地址	坐标	温度	浊度	pH 值	电导率	...	#
---	----	----	----	----	------	-----	-----	---

图 5 通信协议描述

该命令以“#”作为开始, 后面接着地址、坐标、各类水质参数, “...”代表可扩展的水质参数, 不同的参数用“|”间隔, 最后同样以“#”结束该条命令.

定制特定的协议格式, 在很大程度上满足了本系统的需要, 具有一定的动态性、实时性. 而且, 严格的通信协议格式也为区分不同的命令和参数传递提供了保障.

### 3.2 编队控制

为了防止多个水下监测器的碰撞及脱离浮标节点通信范围等问题, 采用多个水下监测器编队控制方式, 若干个水下监测器与浮标节点形成一簇, 浮标节点以广播的方式告知水下监测器队形信息, 同时汇聚水下监测器采集的水质参数信息, 并与其他浮标节点实现通信. 水下监测器接收队形信息后以一定的几何构型在浮标节点附近移动, 其编队控制算法采用分布式模糊编队控制.

如图 6 所示为编队控制系统的运动模型,  $(Px_0, Py_0)$  代表主监测器,  $(Px_1, Py_1)$ 、 $(Px_2, Py_2)$  代表从监测器. 通过上述分布式模糊 PID 控制算法, 从监测器可在  $(Px_2, Py_2)$  附近扇形区域内跟随前行, 追踪主监测器运行轨迹.

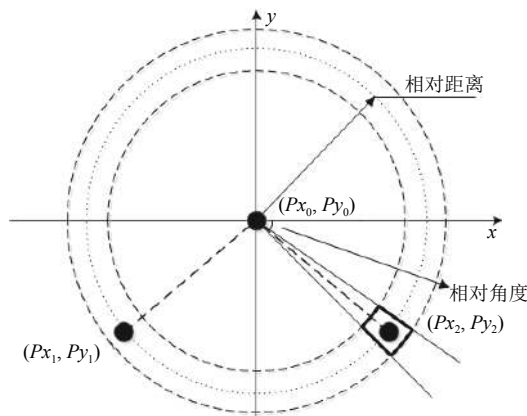


图 6 编队运动模型

程序流程如图7所示。由图7(a)可知,主监测器点以水声广播的方式告知从监测器队形信息,同时收集从监测器采集的水质参数信息,并与岸上基站实现通信;由图7(b)可知,从监测器初始化后依次经过水质参数采集、自身位置姿态采集和无线发送信息,同时接收主监测器的位置,经过算法设计,获取相对位置信息,经模糊控制器输出控制从监测器跟随主监测器移动。

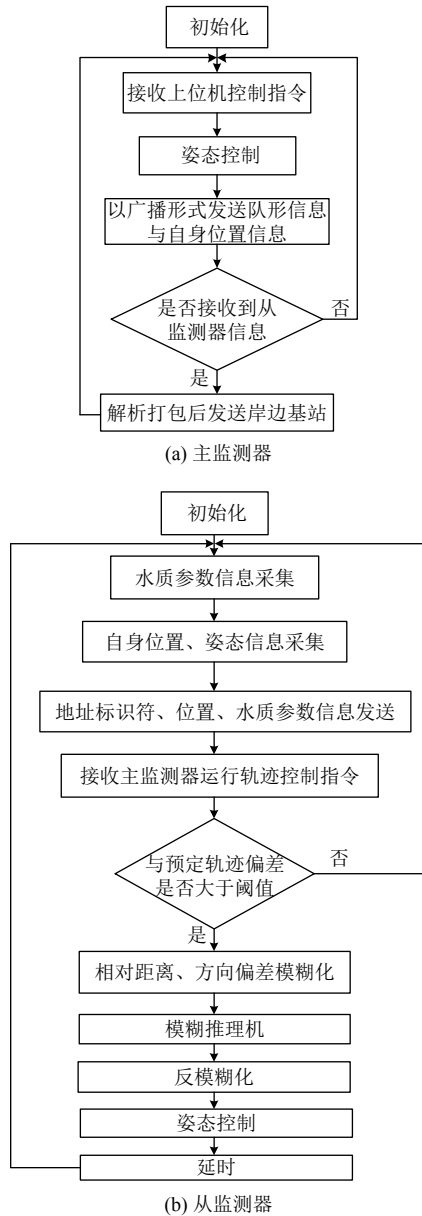


图7 程序流程图

### 3.3 PC 端软件设计

PC 端上位机软件功能如图8所示,具有数据监控、水下监测器控制、实时消息推送、数据统计以及阈值设置等功能。软件采用基于 Web 的 JavaScript 开

发, JavaScript 是一种属于网络的脚本语言,已经被广泛用于 Web 应用开发,常用来为网页添加各式各样的动态功能,提供更流畅美观的浏览效果。

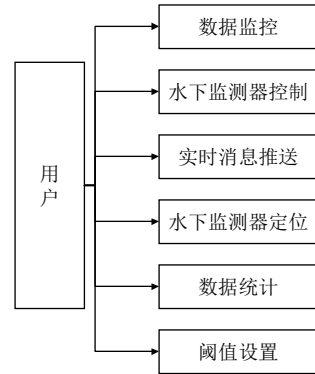


图8 PC 端软件功能图

### 3.4 PC 移动端软件设计

APP 和上位机间使用 Socket 通信机制进行通信,通过 Socket 实时进行数据交互,可以同时接收多个浮标节点的数据。APP 为 Socket 的客户端,主要用于显示水域水质参数信息。上位机端作为 Socket 的服务器端,用于处理数据和对数据进行分发。移动端功能图如图9所示。

系统采用 XMPP 协议,上位机端可以推送水质信息,当浊度小于预先设定阈值时,上位机就会向 APP 推送一条消息,提醒用户检测到污染。



图9 移动端功能图

## 4 系统实现及实验测试

### 4.1 实验平台

为了验证系统设计的可行性,搭建了水质在线移动监测平台(图10)。目前,水下监测器装载 GPS/INS 系统,可检测温度、浊度、pH 值和电导率等水质参数,已实现两个移动节点编队检测,但还未能完全自主航行。

### 4.2 实验内容与结果

实验对水下监测器、浮标节点和可视化软件整个平台监测性能进行了测试。

4.2.1 水下检测器性能测试

如图 11(a) 所示, 水下监测器外观模仿鱼的流线型设计, 内部电路模块与外部环境通过防水接口隔离, 达到防水效果. 图 11(b) 中为水下监测器内部结构图, 各个电路模块、电源、水质传感器、动力系统均包含在内, 其中水质检测探头位于水下监测器头部.



图 10 水下监测器编队监测



(a) 整体图



(b) 去上盖图

图 11 水下监测器结构图

经过实验测试, 水下监测器的各项技术参数指标如表 1.

表 1 水下监测器技术参数

指标	技术参数
尺寸	~ 75 cm×25 cm×7.5 cm
重量	~ 4 kg
执行器	无刷电机、舵机
通讯模式	无线通信(170 MHz)
续航时间	>1小时

4.2.2 软件系统性能测试

图 12 为实验时上位机的截图, A 区域为功能模块, 包括监控、命令、管理、地图等, B 区域为可视化界面, 不同功能模块对应一个可视化界面, 实现友好的人机交互.

水下监测器通过无线传感网络将自身地址、位置、水质参数等信息发送至上位机软件, 再导入数据库与服务器. 手机移动端通过访问数据库获取相关信

息. 图 13 为实验时手机端 APP 显示界面, 图 13(a) 为水质参数信息与当前监测器的位置信息, 包括经度和纬度; 图 13(b) 为实际定位地图, 能够更加直观地观测到多个监测器所处的位置; 图 13(c) 为水质历史数据, 供后期查看; 图 13(d) 为水下监测器模拟遥控手柄, 当需要回收监测器可选择远程遥控的方式控制监测器返回岸边.

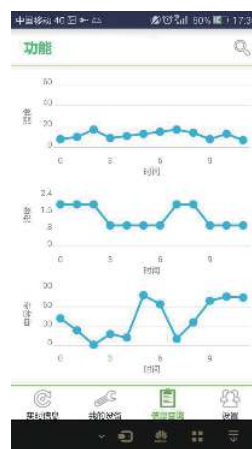


图 12 PC 端上位机



(a) 水质参数信息与监测器位置信息

(b) 多个监测器实时位置



(c) 水质历史数据



(d) 水下检测器模拟遥控手柄

图 13 手机 APP 界面

上位机软件将采集到的数据,经处理后自动生成图表,以直观的形式展示不同水域浊度信息.如图14所示.

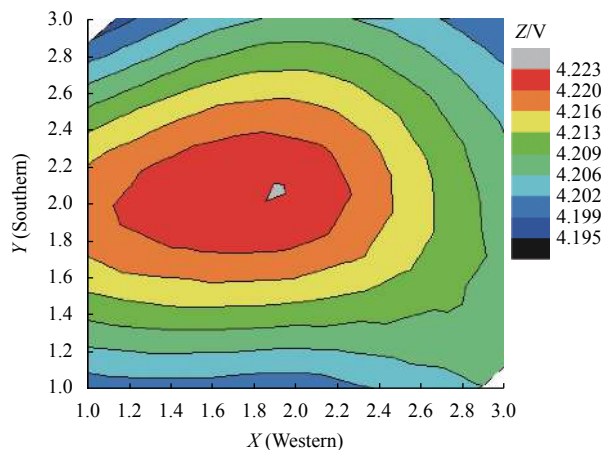


图14 某水域浊度信息

从上述实验可以看出,基于无线传感网络的水质在线移动监测系统可检测某水域任一点的水质环境.

## 5 结论

本文提出一种面向大范围水质监测的新方法.与传统方法相比,本方法提高了设备利用率,实时性更高.适用于池塘、运河、湖泊以及近海的水质在线监测,为日常水质管理提供指导,对污染水域进行报警.下一步的重点是降低系统功耗,提升水下监测器的续航能力,完善被测水域不同时间、不同位置水质数据地图测绘工作.

## 参考文献

- 1 田丽丽,姜博,付义.全国水污染现状分析.黑龙江科技信息,2012,(25):61.
- 2 李惠敏,霍家明,于卉.海河流域水污染现状与水资源质量状况综合评价.水资源保护,2000,(4):12-14.
- 3 Amruta MK, Satish MT. Solar powered water quality monitoring system using wireless sensor network. Proceedings of 2013 International Mutli-conference on Automation, Computing, Communication, Control and Compressed Sensing. Kottayam, India. 2013. 281-285.
- 4 Rao AS, Marshall S, Gubbi J, *et al.* Design of low-cost autonomous water quality monitoring system. Proceedings of 2013 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics. Mysore, India. 2013. 14-19.
- 5 Hu HS. Biologically inspired design of autonomous robotic fish at Essex. Proceedings of the IEEE SMC UK-RI Chapter Conference on Advances in Cybernetic Systems. Sheffield, UK. 2006. 1-8.
- 6 Morawski M, Słota A, Zajac J, *et al.* Hardware and low-level control of biomimetic underwater vehicle designed to perform ISR tasks. Journal of Marine Engineering & Technology, 2017, 16(4): 227-237.
- 7 Yu Y, Zhang XM, Peng B, *et al.* Design of sensor nodes in underwater sensor networks. Proceedings of 2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. Xi'an, China. 2009. 3978-3982.
- 8 Liang JH, Zheng WF, Wen L, *et al.* Propulsive and maneuvering performance of two joints biorobotic autonomous undersea vehicle SPC-III. Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Guilin, China. 2009. 314-220.