

基于传感器网络的环境监测系统设计与优化

刘健

淮安淮测检测科技有限公司

DOI:10.32629/eep.v8i10.2930

[摘要] 针对传统环境监测系统覆盖范围小、数据传输延迟大、监测精度不够等问题,提出基于传感器网络的环境监测系统设计方案,并从硬件选型、网络拓扑、数据处理算法三方面优化。系统采用分层式结构,分感知层、网络层、应用层。感知层用高精度多类型传感器,通过ZigBee与LoRa双模通信模块传输数据;网络层用改进型LEACH路由协议,降低节点能耗、提高传输可靠性;应用层采用卡尔曼滤波和小波分析算法,去除监测数据噪声并精确融合。实验表明,优化后系统监测误差控制在 $\pm 2\%$ 以内,数据传输成功率达98.7%,节点续航比传统系统长3倍,能满足大范围、高精度、低功耗的环境监测需求,为生态环境保护、灾害预警等提供可靠数据支持。

[关键词] 传感器网络; 环境监测; 系统设计; 路由协议优化; 数据融合; 低功耗

中图分类号: X83 文献标识码: A

Design and Optimization of Environmental Monitoring System Based on Sensor Network

Jian Liu

Huai 'an Huaice Testing Technology Co., LTD

[Abstract] Aiming at the problems of small coverage, large data transmission delay and insufficient monitoring accuracy of traditional environmental monitoring systems, a design scheme of environmental monitoring system based on sensor network is proposed, and it is optimized from three aspects: hardware selection, network topology and data processing algorithm. The system adopts a hierarchical structure, divided into the perception layer, the network layer and the application layer. The perception layer uses high-precision multi-type sensors to transmit data through ZigBee and LoRa dual-mode communication modules. The network layer uses the improved LEACH routing protocol to reduce node energy consumption and improve transmission reliability. The application layer adopts Kalman filtering and wavelet analysis algorithms to remove noise from monitoring data and precisely fuse it. Experiments show that after optimization, the monitoring error of the system is controlled within $\pm 2\%$, the data transmission success rate reaches 98.7%, and the node battery life is three times longer than that of the traditional system. It can meet the requirements of large-scale, high-precision and low-power environmental monitoring, and provide reliable data support for ecological environment protection, disaster early warning, etc.

[Key words] Sensor Network; Environmental monitoring; System design; Routing protocol optimization; Data fusion; Low power consumption

引言

随着工业化进程的加快以及生态环境问题的日益严重,实时、准确、全面的环境监测已经成为生态保护、污染治理和公共健康保障的重要支撑,而传统的依靠人工巡检或者单点监测的方式存在着覆盖面小、响应滞后、数据不连续等缺点,已经不能满足复杂环境监测的实际需要,而传感器网络凭借其分布式感知、自组织通信、低成本部署等优势,为解决上述问题提供了一种有效的技术途径,本文设计了一个多参数、低功耗、高可靠

性的传感器网络环境监测系统,通过硬件选型优化、网络拓扑改进和数据处理算法升级,提高系统的监测精度、传输效率和续航能力,为环境监测领域的技术升级提供实践参考^[1]。

1 系统总体架构设计

1.1 感知层设计

感知层是系统数据采集终端,主要采集温度、湿度、PM2.5、SO₂、NO_x、土壤含水率、土壤酸碱度等环境参数,其性能直接影响监测数据准确性。为满足多参数监测需求,感知层采用模

块化设计,每个监测节点包含传感器、数据处理、通信、供电四个模块。

传感器模块按需选择:温度湿度传感器选SHT30,测量范围 $-40^{\circ}\text{C}\sim 125^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $0\sim 100\%\text{RH}$,精度 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 0.5\%\text{RH}$;空气质量传感器选PMS5003,可测PM1.0、PM2.5、PM10等颗粒物浓度,范围 $0\sim 1000\mu\text{g}/\text{m}^3$;气体传感器选MQ-135,对 SO_2 、 NO_x 、CO等有害气体灵敏度高,范围 $0\sim 1000\text{ppm}$;土壤参数传感器选EC-pH复合传感器,土壤含水率范围 $0\sim 100\%$,酸碱度范围 $3\sim 11\text{pH}$,精度 $\pm 1\%$ 、 $\pm 0.1\text{pH}$ 。

数据处理模块采用STM32L476微控制器,使用ARM Cortex-M4内核,集成12位ADC转换器,可同时采集多传感器数据,且低功耗,能满足长时间监测需求。

通信模块采用ZigBee和LoRa双模。ZigBee模块用CC2530,适合短距离、低速率传输,通信距离100m,支持自组织网络;LoRa模块用SX1278,采用扩频通信技术,通信距离3km,抗干扰强,适合长距离传输。双模可根据地形地貌灵活切换,保证数据传输连续性。

供电模块采用太阳能加锂电池备用方式。太阳能电池板为10W单晶硅电池,锂电池为18650型3.7V/2000mAh,电源管理芯片AXP192实现充电管理及低功耗控制。光照充足时,太阳能电池板充电并供电;光照不足时,锂电池供电,保证节点持续工作。

1.2网络层设计

网络层是连接感知层和应用层的桥梁,负责将感知层监测数据传至应用层,需解决数据传输可靠性、实时性和能耗平衡问题。它采用“簇头节点、簇成员节点、汇聚节点”的分层拓扑结构,把监测区域分成多个簇,每个簇含若干监测节点(簇成员)和一个簇头节点。簇头节点收集簇内成员数据并融合后传至汇聚节点,汇聚节点通过GPRS/4G模块将数据上传到应用层服务器。

由于传统LEACH路由协议随机选举簇头,易导致簇头分布不均、能耗过高,影响网络性能,因此本文改进该协议,提出基于剩余能量和距离的簇头选举算法(RE-D-LEACH)。该算法选举簇头时,综合考虑节点剩余能量和与汇聚节点的距离,剩余能量越高、离汇聚节点越近的节点,当选簇头概率越大,节点簇头选举概率 $P(i)$ 的计算公式如下:

$$P(i) = \alpha \times (E_{res}(i)/E_{max}) + \beta \times (d_{max} - d(i))/d_{max}$$

其中, $E_{res}(i)$ 为节点 i 的剩余能量, E_{max} 为节点的初始能量, $d(i)$ 为节点 i 与汇聚节点的距离, d_{max} 为监测区域内节点与汇聚节点的最大距离, α 和 β 为权重系数,满足 $\alpha + \beta = 1$,通过实验确定 $\alpha = 0.6$, $\beta = 0.4$,确保节点能量与传输距离对簇头选举的均衡影响。改进后的协议可有效减少簇头节点的能耗,延长网络生命周期。

1.3应用层设计

应用层是系统的核心分析显示平台,接收数据、存储数据、分析数据、显示数据。应用层采用服务器-客户端模式,用MySQL数据库存储监测数据,可快速查询、管理数据;数据处理模块采

用卡尔曼滤波和小波分析结合的方法,卡尔曼滤波来消除随机噪声,小波分析提取特征信息,完成监测数据的精确融合;可视化模块采用Web技术实现,提供实时数据曲线、历史数据查询、异常数据报警等功能,用户可以通过电脑、手机等终端远程访问系统。

2 系统硬件优化设计

2.1传感器校准

传感器在长时间的使用过程中,容易受到环境温度、湿度等因素的影响,造成测量误差增大。为保证监测数据的准确性,对传感器进行校准。以温度传感器SHT30为例,用两点校准法,选取 0°C 、 100°C 两个标准温度点,把传感器放在标准恒温箱里,记录传感器的测量值和标准值,建立校准方程:

$$T_{cal} = a \times T_{meas} + b$$

其中, T_{cal} 为校准后的温度值, T_{meas} 为传感器的测量值, a 和 b 为校准系数。通过实验测得 $a = 1.02$, $b = -0.3^{\circ}\text{C}$,校准后的温度测量误差控制在 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以内。同理,对湿度、空气质量、土壤参数等传感器进行校准,确保各传感器的测量误差满足系统要求。

2.2低功耗电路设计

监测节点大多布置在野外,供电条件受限,低功耗设计是节点续航时间长的保证。采用以下措施来优化低功耗电路:一是选择低功耗元器件,STM32L476微控制器的休眠电流为 $0.5\mu\text{A}$,SX1278模块的接收电流为10mA,发射电流为100mA,可以有效地降低元器件的静态功耗;二是采用电源管理芯片AXP192实现动态功耗控制,根据节点的工作状态切换供电模式,节点在数据采集状态时采用正常供电模式;节点在休眠状态时切换到低功耗供电模式,关闭不必要的外设,降低供电电压;三是优化电路布局,减小电路中的漏电流,采用多层PCB板,缩短信号线长度,减小电磁干扰^[2]。

2.3通信模块优化

通信模块的能耗在节点总能耗中占比较大,为了降低通信能耗,对通信模块进行优化设计,一是采用动态通信周期调整策略,根据监测数据变化率调整通信周期,监测数据变化小的时候,拉长通信周期,减少数据传输次数;监测数据变化大的时候,缩短通信周期,保证数据实时性。通信周期的调整公式为:

$$T_{comm} = T_0 \times (1 + k \times \Delta D)$$

其中, T_0 为初始通信周期(默认60s), ΔD 为相邻两次监测数据的变化率, k 为调整系数($k = 0.5$)。二是优化通信协议,简化数据传输格式,采用二进制格式传输数据,减少数据传输量,同时采用数据压缩算法,对监测数据进行压缩处理,降低通信带宽占用^[3]。

3 系统软件优化设计

3.1数据采集算法优化

传统数据采集算法用固定的采样频率,容易造成数据冗余或者数据缺失。为了平衡数据采集的完整性与能耗,采用自适应采样频率算法,根据监测数据变化率来调节采样频率。当监测数

据变化率 ΔD 小于5%的时候使用低采样频率(1次/分钟)；当 $5\% \leq \Delta D < 10\%$ 的时候使用中采样频率(2次/分钟)；当 ΔD 大于等于10%的时候使用高采样频率(5次/分钟)。该算法可以在保证数据完整性的情况下减少不必要的采样次数,降低节点能耗。

3.2 路由协议优化

在网络层改进LEACH路由协议的基础上,对路由传输策略进行进一步的优化,一是采用多路径路由机制,在簇头节点和汇聚节点之间建立多条传输路径,当主路径出现故障时,自动切换到备用路径,提高数据传输的可靠性;二是采用数据聚合技术,簇头节点将簇内成员的监测数据进行聚合处理,去除冗余数据,减少数据传输量,降低网络能耗。数据聚合使用加权平均算法,根据传感器的测量精度给传感器赋予不同的权重,精度高的传感器赋予较大的权重,聚合后的数据更接近实际的环境状况。

3.3 数据处理算法优化

监测数据中存在大量噪声,影响数据的准确性,采用卡尔曼滤波与小波分析相结合的算法进行数据处理。首先,利用卡尔曼滤波对原始数据进行预处理,去除随机噪声。卡尔曼滤波的状态方程和观测方程分别为:

$$X(k) = A \times X(k-1) + B \times U(k) + W(k)$$

$$Z(k) = H \times X(k) + V(k)$$

其中, $X(k)$ 为系统状态向量, A 为状态转移矩阵, B 为控制矩阵, $U(k)$ 为控制向量, $W(k)$ 为过程噪声, $Z(k)$ 为观测向量, H 为观测矩阵, $V(k)$ 为观测噪声。通过迭代计算预测值和更新值,实现噪声去除。

4 系统测试与性能分析

4.1 监测精度测试

选取10个标准监测点,将系统监测数据和专业监测设备测量数据进行对比,测试结果如表1所示。由表1可知,系统对温度、湿度、PM2.5、SO₂、土壤含水率、土壤酸碱度等参数的监测误差均在 $\pm 2\%$ 以内,符合环境监测的精度要求^[4]。

表1 监测精度测试结果

监测参数	标准值	系统测量值	误差
温度(°C)	25.0	24.8	-0.8%
湿度(%RH)	60.0	60.3	+0.5%
PM2.5($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	50.0	50.8	+1.6%
SO ₂ (ppm)	0.1	0.102	+2.0%
土壤含水率(%)	30.0	29.7	-1.0%
土壤酸碱度(pH)	7.0	7.05	+0.7%

4.2 数据传输成功率测试

连续测试72小时,记录数据传输情况,共传输129600条数据,成功传输128015条,数据传输成功率98.7%。其中ZigBee通信模式下数据传输成功率是97.5%,LoRa通信模式下数据传输成功率是99.2%,双模切换机制提高了数据传输的可靠性。

4.3 节点续航时间测试

在相同的供电条件下,对优化后的系统和传统的系统节点的续航时间进行对比。传统系统采用固定的采样频率和随机的簇头选举协议,优化后的系统采用自适应的采样频率和RE-D-LEACH路由协议。由测试结果可知,传统系统节点续航时间为15天,优化后系统节点续航时间为48天,是传统系统的3倍,可以满足长时间监测的要求。

4.4 系统响应时间测试

测试系统从数据采集到应用层展示的响应时间,结果显示,系统的平均响应时间为2.3s,其中数据采集时间0.5s,数据传输时间1.2s,数据处理时间0.3s,数据展示时间0.3s,响应速度快,可实现实时监测^[5]。

5 结语

本文设计基于传感器网络的环境监测系统,采用分层式架构,全方位感知、可靠传输和准确处理环境参数。硬件上优化传感器选型与校准、低功耗电路设计及通信模块配置,提升监测精度与节点续航;软件上改进LEACH路由协议,提出自适应采样频率算法及卡尔曼滤波与小波分析结合的数据处理算法,提高数据传输可靠性与处理精度。实验证明,该系统监测误差控制在 $\pm 2\%$ 以内,数据传输成功率98.7%,节点续航延长3倍,能满足大范围、高精度、低功耗的环境监测要求。

【参考文献】

- [1]潘晓贝,郭志冬.基于无线传感器网络的智慧农业农田环境智能监测系统设计[J].内燃机与配件,2025,(21):104-106.
- [2]胡上贤.智慧家居中多传感器融合的室内环境监测系统优化设计[J].现代商贸工业,2025,(15):260-262.
- [3]杜亮,苏蓓蓓.基于智能传感器的环境监测与控制系统设计与优化[J].电子技术,2025,54(01):360-361.
- [4]张凯,王左栋.基于无线传感器网络的环境监测系统设计与实现[J].皮革制作与环保科技,2024,5(19):193-195.
- [5]韩建书.基于ZigBee无线传感器网络技术的双孢菇生长环境监测系统的设计[J].工业计量,2019,29(06):53-55+75.

作者简介:

刘健(1991—),男,汉族,江苏淮安人,本科,助理工程,研究方向:环境工程。