

基于 WSN 的紫外-可见光谱水质 COD 监测仪 采传系统设计

刘娟¹ 冯鹏¹ 魏彪¹ 吴德操^{1,2} 汤斌³ 唐媛¹ 熊双飞¹ 张峥¹ 汤戈¹

¹重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044

²重庆工业职业技术学院, 重庆 401120

³重庆理工大学光电信息学院, 重庆 400050

摘要 针对日益严重的水环境问题,水质化学需氧量(COD)的实时在线监测对水质污染预警具有十分重要的意义。依据紫外-可见光谱分析法可实现水质 COD 参数在线、原位测量的原理,将无线传感网络(WSN)技术与光谱法水质 COD 监测技术相结合,研究了一种适用于大面积水域水质 COD 监测的信息采集与传输系统。基于 Coxtex-A7 硬件平台,采用数据压缩和无线传感网络等技术实现了水质 COD 的无线实时监测。实验测试结果表明,该系统能够实现水质 COD 监测数据的采集与高效、可靠的传输。该系统不仅具有功耗低、流域覆盖面积广、响应速度快、易于维护等特点,还可为水体流域内水质环境的综合分析提供依据。

关键词 光谱学; 紫外-可见光谱; 水质监测; 化学需氧量; 无线传感网络; 流域覆盖

中图分类号 TP273

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.013002

Design of Acquisition and Transmission System for Water COD Monitoring Based on UV-VIS Spectroscopy and Wireless Sensor Networks

Liu Juan¹ Feng Peng¹ Wei Biao¹ Wu Decao^{1,2} Tang Bin³

Tang Yuan¹ Xiong Shuangfei¹ Zhang Zheng¹ Tang Ge¹

¹Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China

²Chongqing Industry Polytechnic College, Chongqing 401120, China

³College of Optoelectronic Information, Chongqing University of Technology, Chongqing 400050, China

Abstract To solve the increasingly serious problem of water environment, it is of great significance to monitor chemical oxygen demand (COD) of water as the early warning of water pollution. Based on the principle of ultraviolet-visible spectroscopy to measure the water quality parameter COD, the collection and transmission system of water COD monitoring information in a large area is studied by combining the wireless sensor network (WSN) technology with spectral COD monitoring technology. Based on the Coxtex-A7 hardware platform, the data compression and WSN is utilized to realize wireless real-time monitoring of water COD. The experimental results show that the system can achieve collection and effective and reliable transmission of water COD monitoring data. This system does not only have the characteristics of low power consumption, wide coverage area, fast response, and easy maintenance, but also provides a basis for the comprehensive analysis of water environment in a water basin.

Key words spectroscopy; ultraviolet-visible spectrometry; water quality monitoring; chemical oxygen demand; wireless sensor network; basin covering

OCIS codes 300.6540; 300.6550; 060.4254

收稿日期: 2014-06-13; 收到修改稿日期: 2015-07-03; 网络出版日期: 2015-12-28

基金项目: 四川省科技支撑计划(2012SZ0111)、重庆市研究生科研创新项目(CYS14039)

作者简介: 刘娟(1991—),女,硕士研究生,主要从事无线传感网络及信号处理方面的研究。

E-mail: liujuanhbqy@163.com

导师简介: 冯鹏(1981—),男,博士,副教授,主要从事光谱水质检测与分析等方面的研究。

E-mail: coe-fp@cqu.edu.cn(通信联系人)

1 引言

在水体环境中,化学需氧量(COD)既是衡量水体水质状况的最重要参数之一,也是水体环境监测中的必测项目。针对日益严重的水环境问题,建立流域覆盖的实时在线水质监控系统具有十分重要的意义。基于紫外-可见(UV-VIS)光谱分析法可实现水质 COD 参数的快速测量,具有操作简便、无二次污染、可实现在线、原位测量等优点,已成为水质 COD 监测的一个重要发展方向^[1-5]。

现有的水质监测系统由单台或多台在线水质分析仪器组成,其采集与传输方式主要分为两类:1) 构建传感器网络,将水质监测仪器加入构建的无线网络中,实现数据的无线传输;2) 利用公用网络,如 GSM(全球移动通信系统)、GPRS(通用无线分组业务)等,采用 TCP/IP 协议进行通信^[2-5]。前者的传输距离有限,难以实现大面积的组网和远程监控;后者应用于传输数据量较大的系统时,耗费流量较多,花费高,并且监测节点存在无运营商信号覆盖的可能。将传感器网络与广域网有效结合,可实现对大面积水域水质信息的自动采集与无线传输。

本文针对大面积水域的水质环境进行监测和预警的需要,将无线传感网络技术与光谱法水质 COD 监测技术相结合,研究了光谱法水质 COD 监测的数据采集与传输系统,监测流域内水质变化的总体情况,为水体流域内水质环境的综合分析提供依据。

2 系统原理及总体结构

由于水体有机物的组成成分复杂,不同类型水样在紫外-可见波段的吸收光谱存在着明显差异,与水质 COD 参数的相关度区间也不同^[5-7],建立水质在线监测系统,收集监控水域水质环境的吸收光谱,对水质参数的解算具有十分重要的意义。

基于无线传感网络的光谱法水质 COD 在线监测系统拓扑图如图 1 所示。系统包含了监测节点、汇聚节点、云端数据处理中心以及控制中心。监测节点可根据流域中的重点监控区域进行布置,将采集到的光谱数据以及其他传感数据压缩后通过远距离无线数传网络传输至汇聚节点,然后经 4G/3G/GPRS 网络发送云端。在云端数据处理中心,利用云计算等技术对流域内的光谱进行处理,用户可在任意一台电脑通过网页直接查询水质信息,并直接控制网络中的节点。系统还可根据特征光谱建立指纹光谱,检测到与之吻合的光谱时立即报警,并显示该节点的位置信息以及水质信息,便于用户及时进行下一步处理。

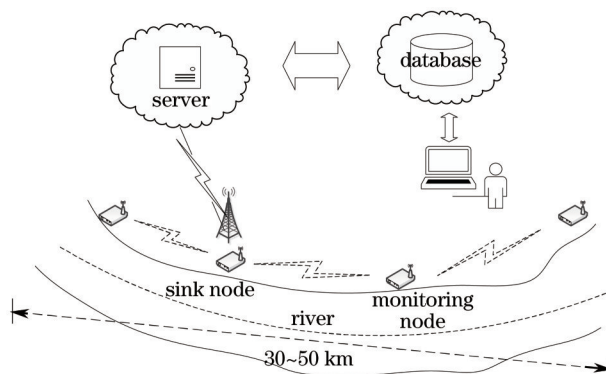


图 1 基于无线传感网络的光谱法水质 COD 监测系统拓扑图

Fig.1 Monitoring system topology of water quality parameter COD monitoring by UV-VIS spectroscopy based on wireless sensor networks

3 节点硬件设计

光谱法水质 COD 监测节点结构如图 2 所示。监测节点主要由 4 部分构成,即传感器模块、控制模块、电源模块以及无线通信模块,负责水质环境 COD 信息的采集、预处理以及无线通信。与普通的监测节点相比,汇聚节点拥有 4G 模块,它是监控中心与监控节点信息交换的枢纽站。系统节点具有体积小、功耗低、传输距离远的特点,建立的网络能够自组织、自愈合,能够实现大面积水域的水质信息监管。

3.1 传感器模块与控制模块

为满足节点集成化与微型化的设计要求,监测仪选用海洋公司的便携式微型光谱仪 USB2000+。此外,

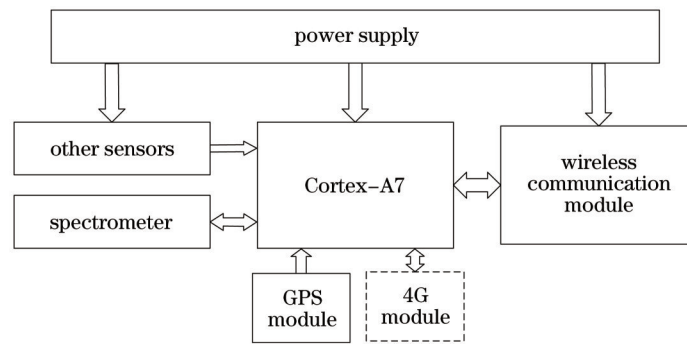


图2 光谱法水质 COD 监测节点结构图

Fig.2 Diagram of node structure of water quality parameter COD monitoring by UV-VIS spectroscopy

还选择了其他传感器模块,如 AD590 温度传感器、201T-S 复合电极和 NEO-M8N GPS 模块作为补充。

监测节点的控制模块采用具有超低功耗的 Cortex-A7 双核处理器,运行嵌入式 Linux 系统,可驱动并控制光谱仪及其他模块工作,能够实现短时间内的单点多次采集。将采集到的光谱进行去噪、压缩后再发送,减小了网络传输数据量和系统功耗,很大程度上降低了通信成本。

3.2 节点互连

在流域内建立水质 COD 监测系统,监测节点间的数传通信距离应达到 5 km,为满足设计要求,数传模块采用二级功率放大电路,射频控制芯片 TI CC2530,经过 CC2591 一级放大后得到 22 dBm 输出功率,再由 YP242034 二级放大达到 37 dBm。发射、接收使用双通道设计,通过射频开关进行切换,接收时断开发送电路以降低功耗。

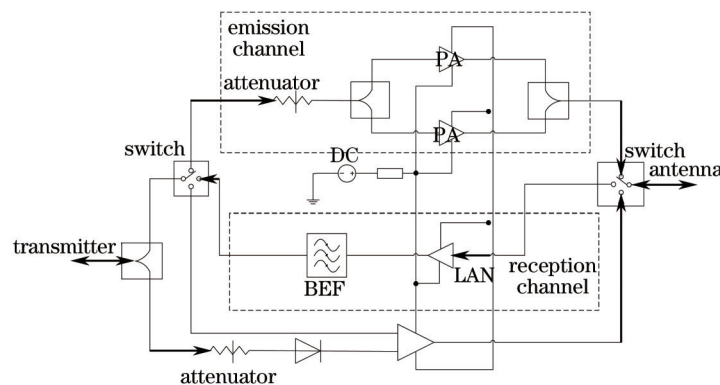


图3 二级放大电路设计图

Fig.3 Design drawing of secondary amplifier circuit

不考虑外界影响和传输损耗,电磁波在理想情况下传播,无线通信传输距离的计算公式为

$$L = 32.44 + 20 \lg d + 20 \lg F, \quad (1)$$

式中 L 为链路损耗, d 为传输距离, F 为电磁波频率^[8]。将工作频率 $F = 2450$ MHz, $d = 5$ km 代入(1)式中,可得无线传输链路损耗应满足

$$L \geq 114.20 \text{ dB}. \quad (2)$$

假定由大气、遮挡物等造成损耗的典型值为 15 dBm,则可得无线通信模块的链路损耗为 $L = 37 - (-97) - 15 = 119 \text{ dB} > 114.20 \text{ dB}$,可以满足要求。

3.3 云端互连

监测节点与云端服务器使用 4G/3G/GPRS 多模通讯模块^[9-10](中兴 ME3760) 连接,内嵌 TCP/IP 协议,具有丰富的频段,峰值传输速率上行可达 50 Mbps,下行可达 100 Mbps。光谱及其他传感数据在汇聚节点汇总后,可由 4G 模块将数据发送至云端,也可接收云端发送的数据及命令,是实现远程监控的重要组成部分。

4 节点软件设计

水质 COD 监测仪的数据采集方式可分为定时采集和指令采集两种。监测节点每隔一段时间自动唤醒,

也可在监控中心的命令下唤醒,进行环境水样的信息采集等,并经远距离无线数传网络发送至汇聚节点,在汇聚节点处经4G/3G/GPRS网络上传至云端,其工作流程图如图4所示。

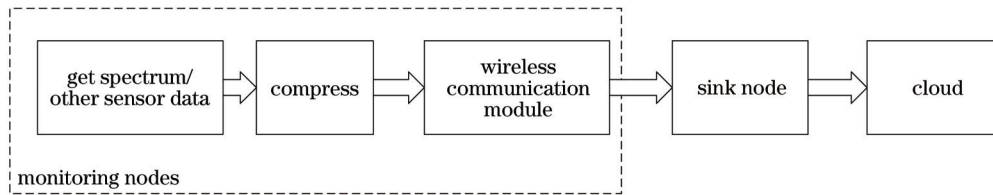


图4 光谱法水质COD监测数据发送流程图

Fig.4 Data transmission flow chart of water quality parameter COD monitoring by UV-VIS spectroscopy

4.1 数据压缩

监测节点获取的水质环境COD吸收光谱数据共2068点,由于地表水光谱相对平滑,数据间相关性较高,选择使用合适的压缩算法可极大程度地减小数据量,提高数据传输效率,降低4G网络使用成本。

目前,小波变换已广泛应用于图像压缩、光谱压缩、地震信号压缩等领域。其中,阈值选择直接关系到压缩的效果,阈值过大时,误差会变大,而阈值过小时,压缩比又不太理想^[11-12]。由于光谱的有用信号能量集中在低频部分,高频分量很少,因此可选用能量阈值法压缩光谱数据^[13-15],具体步骤如下:

- 1) 对光谱信号采用sym4小波4层分解,并按绝对值从大到小排列小波分解系数 $c_1 > c_2 > \dots > c_k > \dots > c_n$;
- 2) 计算小波系数的能量 $g(t) = \sum_{k=1}^{k=t} c_k^2$, $t \leq n$;
- 3) 计算 $g(t)$ 的导数 $g'(t)$,当 $g'(t_0) = 0$ 时,求得 t_0 时刻的 c_{t_0} 作为压缩阈值;
- 4) 保留大于选定阈值的小波系数,并将小于选定阈值的小波系数置零,达到压缩目的。

任意选取4组光谱数据,按照以上步骤进行压缩,利用标准化均方根误差进行评价,结果如表1所示。为确保光谱解算的精度,误差应该在 10^{-2} 量级下,此时,保存能量百分比可达99.99%,零系数百分比可达50%,即原始光谱2068个非零点,压缩后剩余1034个非零点,该方法能够有效压缩光谱。

表1 能量阈值法压缩光谱数据性能参数对比

Table 1 Performance parameter comparison of spectral data compression by energy threshold method

Spectral data	Percentage of retained energy /%	Percentage of zero coefficient /%	N_{MSE}
1	99.99	51.94	0.0118
2	100.00	57.00	0.0033
3	99.99	52.22	0.0107
4	99.99	49.83	0.0116

4.2 数据包格式

为提高数据传输的可靠性,采用固定长度的数据包格式,如表2所示。为满足不同类型传感器数据的传输,可将数据区细分为节点序号、采集时间、数据类型和传感数据三部分,各部分的字段含义如表3所示。

表2 数据包格式

Table 2 List of data packet format

Frame head	Length	Command	Data payload	CRC check	Stop
(2 byte)	(1 byte)	(2 byte)	(0-80 byte)	(1 byte)	(1 byte)

表3 数据字段含义

Table 3 Meaning of data field

	Node sequence numbers	Node sequence numbers, used to identify data sources
Data payload	Acquisition time	The time when the data was collected, used to distinguish the data from the same node
	Data types	Mark data type of the sensor, used to carry out data classification
	Sensor data	In accordance with the requirements, the data
	or spectral data	collected by sensor is transmitted

由于光谱数据的数据量较大,数据错误校验相对困难,并且在发送与接收过程中出错难以修正,需整段重发。为提高数据的传输效率,将光谱数据进行分段传输,设置固定的数据长度(80 byte),按顺序将分段的数据进行编号并依次发送。在数据接收端,可根据数据的长度和编号对光谱数据进行复原,并判断是否有丢失帧。如有丢失帧,则对丢失帧请求重传,从而避免对整个光谱进行重传。运用这种方法传输光谱,能够大幅提高传输速率,降低数据校验难度和传输中的误码率,确保光谱数据的稳定可靠传输。

4.3 汇聚节点

在汇聚节点处,监测节点的光谱数据以及其他数据经无线通信模块传输至处理器,经拆包处理后复原收到的数据,并按照数据的节点序号、采集时间以及数据类型进行分类,将复原后的数据依次放入数据库中。

汇聚节点能够自动将数据库中的数据重新打包,使用TCP/IP协议经4G模块传输至云端,在云端利用压缩后的数据重构出光谱信号并进行解算。监控中心还可通过TCP/IP协议发送命令至云端,汇聚节点的4G模块接收到云端的指令,判断指令类型后重新打包,经无线通信模块将指令发送至监测节点,从而完成监控中心命令的下达。汇聚节点是监控中心与监测节点的通信枢纽。

此外,汇聚节点还负责建立和维护无线网络,监测节点能够自动加入汇聚节点建立的无线网络中,形成网络拓扑,映射到整个监测区域中。

5 实验测试结果与分析

5.1 通信距离测试

在实际应用中,通信环境对通信距离有着较大影响,为了测试监测节点的最大通信距离,在野外环境中对节点进行测试^[16]。将汇聚节点和监测节点放置在不同距离处,进行点对点的通信测试,统计监测节点发送的数据包和汇聚节点收到的数据包,并计算丢包率,测试结果如表4所示。

表4 通信距离测试结果

Table 4 Results of communication distance test

Distance /km	Sent data packets	Received data packets	Packet loss rate /%
2	12231	12229	0.016
3.5	12309	12308	0.008
5	12189	12187	0.016
6.5	12339	12332	0.057
8	12412	12280	1.063

从表4数据可知,丢包率随着传输距离的增大而有所增加,在5 km的距离之内,丢包率极低。综合考虑实际应用,监测节点设计为浮标式,数据的传输在可视距离内,通信环境对通信质量的影响较为固定^[16],本文中紫外-可见光谱水质COD监测仪间的最大通信距离可设置为5 km。

5.2 组网测试

水质COD在线监测系统中的监测仪自动采集水质信息后,可由其他节点自动转发,形成多跳网络,将数据发送至汇聚节点,监测节点与汇聚节点距离越远,跳数越多。与汇聚节点每隔5 km放置一个监测节点^[17],改变数据发送间隔,分析测试数据的传输中丢包率与跳数间的关系,结果如图5所示。

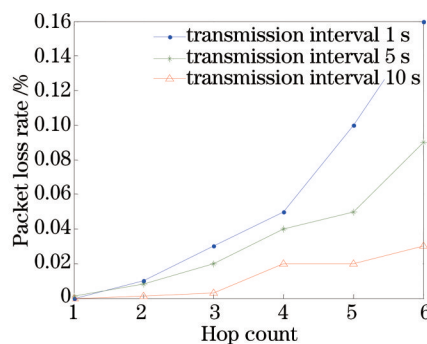


图5 组网测试结果

Fig.5 Test results of network construction

由图5可以看出,在相同发送间隔下,丢包率随着跳数的增加而增加;当跳数一定时,发送间隔越大,丢包率越低,当发送间隔为10 s时,丢包率几乎为零。对于该系统而言,将监测仪的发送间隔设置为10 s,与系统的自动重发机制结合,可满足数据的可靠传输。

5.3 系统测试

在重庆市嘉陵江段,从磁器口处在可视距离内每隔5 km放置一个监测点,共布置5个监测点。将监测点设定为自动采集模式,每隔30 min采集一次数据,发送间隔设置为10 s,在监控中心接收到的数据如图6所示。测试结果表明,该采集传输系统能够实时采集光谱法水质COD信息,并能快速准确地将数据正确传输,工作稳定,性能可靠。

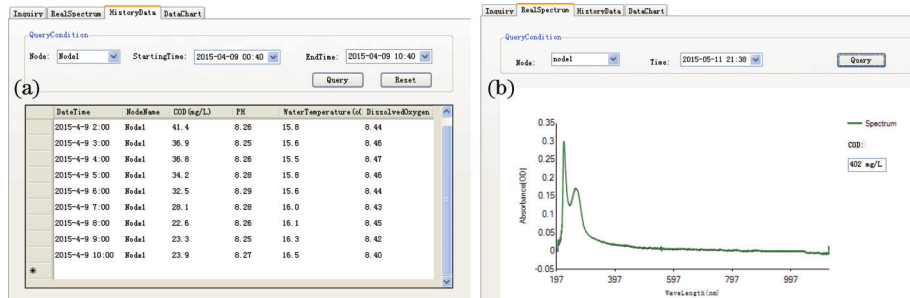


图6 云端实测数据显示图。(a) 监测节点水质信息;(b) 监测节点实时光谱

Fig.6 Display chart of cloud measured data. (a) Water quality information at monitoring nodes; (b) real-time spectrum at monitoring nodes

6 结 论

研究了基于无线传感网络的紫外-可见光谱水质COD监测仪数据采集和传输系统,将无线传感网络与光谱法水质COD监测技术相结合,借助于无线传输技术及4G技术,解决了光谱法水质COD监测实时采集、远距离传输等问题,实现了大范围水域中水质环境的在线、实时监测。对重庆市嘉陵江段从磁器口处在可视距离内每隔5 km放置一个监测点(共布置5个监测点)的实际测试结果表明,该系统能够实现光谱数据以及其他传感数据经监测节点采集,并经压缩后通过远距离无线网络传输至汇聚节点,再经4G模块传输至云端,完成了数据的解算。系统监测节点不仅功耗低,体积小,可在恶劣环境下正常工作,而且对于GPRS无法完全覆盖的区域,该系统具有不可替代的重要作用。

参 考 文 献

- Zeng Tianling, Wen Zhiyu, Wen Zhongquan, *et al.*. Research progress in water quality monitoring technology based on ultraviolet spectrum analysis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(4): 1098-1103.
曾甜玲, 温志渝, 温中泉, 等. 基于紫外光谱分析的水质监测技术研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(4): 1098-1103.
- Shi Jia, Xu Degang, Yan Dexian, *et al.*. Liquid refractive index wireless sensor network based on long period fiber grating and ZigBee [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(3): 030602.
石 嘉, 徐德刚, 严德贤, 等. 基于长周期光纤光栅和 ZigBee 组网技术的无线溶液折射率传感网络[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(3): 030602.
- Liao Haiyang, Du Yu, Wen Zhiyu. Design of embedded micro multi-parameter monitor for water quality[J]. Application of Electronic Technique, 2011, 37(1): 35-37.
廖海洋, 杜 宇, 温志渝. 嵌入式多参数微小水质监测系统的设计[J]. 电子技术应用, 2011, 37(1): 35-37.
- Nasirudin M A, Za'bah U N, Sidek O. Fresh water real-time monitoring system based on wireless sensor network and GSM[C]. IEEE Conference on Open Systems Icos, 2011: 354-357.
- Tang Bin, Wei Biao, Mao Benjiang, *et al.*. Noise analysis and denoising research on the UV-visible absorption spectroscopy water quality detection system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(4): 043002.
汤 斌, 魏 彪, 毛本将, 等. 紫外-可见吸收光谱法水质检测系统的噪声分析与处理研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4): 043002.
- Wang Zhu, Hao Xiaoqiang, Wei Debao. Remote water quality monitoring system based on WSN and GPRS[J]. Instrument

- Technique and Sensor, 2010, (1): 48-49.
- 王 翥, 郝晓强, 魏德宝. 基于 WSN 和 GPRS 网络的远程水质监测系统[J]. 仪表技术与传感器, 2010, (1): 48-49.
- 7 Brito R S, Pinheiro H M, Ferreira F, *et al.* *In situ* UV-Vis spectroscopy to estimate COD and TSS in wastewater drainage systems[J]. Urban Water Journal, 2014, 11(4): 261-273.
- 8 Li Yuhang, Liao Haiyang, Wen Zhiyu, *et al.* Design of online water quality monitoring data acquisition and control system for the reservoir[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2011, 30(2): 61-63.
- 李宇航, 廖海洋, 温志渝, 等. 库区水质在线监测数据采集控制系统设计[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(2): 61-63.
- 9 Zhang Xu, Chen Feng. Study of wireless sensor network protocol for distributed water quality monitoring[J]. Instrument Technique, 2011, (8): 1-4.
- 张 旭, 陈 锋. 分布式水质监测的无线传感网络协议研究[J]. 仪表技术, 2011, (8): 1-4.
- 10 Jin N, Ma R, Lv Y, *et al.* A novel design of water environment monitoring system based on WSN[C]. IEEE International Conference on Computer Design and Applications, 2010, 2: 593-597.
- 11 Rasin Z. Water quality monitoring system using Zigbee based wireless sensor network[J]. International Journal of Engineering & Technology, 2009, 9(10): 14-18.
- 12 Wang Kai, Zhang Hui, Chang Shengjiang, *et al.* Adaptive wavelet algorithm for complicated spectra data compression [J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(6): 3613-3618.
- 王 凯, 张 会, 常胜江, 等. 用于复杂光谱数据压缩的自适应小波算法[J]. 物理学报, 2007, 56(6): 3613-3618.
- 13 Jiang Shanchao, Wang Jing, Sui Qingmei, *et al.* Research on grating spectrum reconstruction based on compressed sensing and its application characteristics [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0830002.
- 蒋善超, 王 静, 隋青美, 等. 基于压缩感知算法的光栅光谱重构及其应用特性研究[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0830002.
- 14 Zhang Baohua, Liu He. Infrared image denoising algorithm based on sub-band component threshold estimation [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0809002.
- 张宝华, 刘 鹤. 采用子带分量阈值估计的红外图像去噪方法[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0809002.
- 15 Chen Yuheng, Zhou Jiankang, Chen Xinhua, *et al.* Research on principle and experimentation of high-resolution optical compressive spectral imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0111005.
- 陈宇恒, 周建康, 陈新华, 等. 高分辨光学压缩光谱成像方法与实验研究[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0111005.
- 16 Shen Jie, Yao Daoyuan, Huang Heqing, *et al.* Measurement and analysis of radio channel model for near-ground wireless sensor network[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(1): 141-149.
- 沈 杰, 姚道远, 黄河清, 等. 野外地表无线传感网信道传播模型的测定与分析[J]. 光学精密工程, 2008, 16(1): 141-149.
- 17 Li Zuoyong. Model of optimal number of sites of environmental monitoring based on artificial neural network[J]. China Environmental Science, 1997, 17(1): 28-29.
- 李祚泳. 环境监测优化布点的人工神经网络模型[J]. 中国环境科学, 1997, 17(1): 28-29.

栏目编辑: 吴秀娟