

文章编号: 1007-4619(2007)04-0545-07

环境监测中无线传感器网络地面遥感新技术

官 鹏

(中国科学院 遥感应用研究所, 北京师范大学 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101)

摘 要: 最近国际上蓬勃发展起来一个新交叉科学领域——无线传感器网络技术。本文首先介绍了无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)技术,它是遥感技术的拓展而且两者互为支撑。然后介绍了无线传感器网络技术的潜在应用领域及其在地学应用中的国际发展趋势,提出了无线传感器网络技术应用到环境领域的基本问题,建议在地球观测领域发展无线传感器网络技术。最后介绍了无线传感器网络技术在环境监测中的几个设想。

关键词: 无线传感器网络

中图分类号: TP732 文献标识码: A

Wireless Sensor Network as a New Ground Remote Sensing Technology for Environmental Monitoring

GONG Peng

(State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University, Beijing 100101, China)

Abstract: Wireless sensor network (WSN) is a new technology recently developed with great potential in large number of fields including earth observation, environmental monitoring, agriculture, resource management, public health, public security, transportation, and military. In this paper, the content and development of WSN technology are first introduced here. It is considered as an expansion of remote sensing and they support each other well. The potential of WSN in earth applications and its general trends are discussed and fundamental questions are raised. It is suggested that WSN should be highly developed in the field of earth observation. A few near-term applications of WSN in environmental monitoring are proposed.

Key words: wireless sensor network (WSN)

1 引 言

无线传感器网络技术是指将传感器技术、自动控制技术、数据网络传输、储存、处理与分析技术集成的现代信息科学技术^[1-3]。它的传感器一般与小型计算机和无线发送装置集于一体,称作网络传感器节点(图 1)^[4]。每个节点一般置于观测对象的附近,或与观测对象直接接触,甚至埋于感兴趣观测对

象当中。可以获得关于观测对象的图像、声音、气味、震动等物理、化学、生物学特性^[5]。人们可以通过手机、因特网等无线通讯技术控制传感器开启或关闭,获得各种数据,对所获数据进行显示、储存或分析,并通过网络传输到数据收集中心。它的发展及其广泛应用前景主要归因于传感器技术的小型化、智能化、廉价性和数据无线传输的可能性^[2,6]。

图 1 中的传感器网络节点,尺寸小于 500 mm³,里面有个中央处理器,可以链接多种传感器。该系

收稿日期: 2007-02-28 修订日期: 2007-04-16

基金项目: 国家“863”高技术计划项目(编号: 2006AA12Z112)、国家科技支撑计划项目(编号: 2006BA01B02)。

作者简介: 官 鹏(1965—),男,从事遥感生态测量学、环境与健康时空动态模型、入侵植物监测和居住区遥感研究。已发表论文 300 余篇。



图 1 便于野外环境应用而封装的无线传感器网络节点
(集成了小型运算、无线传输、温度计、湿度计、
太阳辐射计、全球定位系统等^[41])

Fig 1 Wireless sensor node encapsulated for environmental
monitoring in the field
(It integrates microcomputing, wireless transmission, thermometer,
humidity sensor, solar radiation meter and global positioning
system receiver all in to one unit^[41])

统有温度、光照、湿度及全球定位系统四个传感器，还带一个小天线。只要把这个小仪器启动，然后扔在一个环境里，它自己就能寻找附近的同类传感器网络节点，实现相互间的网络通讯、指令和数据传输，并自动构建网络拓扑。其中之一不工作后，节点间可以自动跳接到其他工作的节点，最后传到一个总站。每个节点既有位置，又有相关的环境特征数据。在战场上这类技术有很大的应用潜力。此外，在紧急状态下，例如森林火灾，无线传感器网络技术大有应用潜力。当火势凶猛、范围扩大、火力逼人时，不可能把有限的火警力量处处投放进去，因此火警往往无法实时掌握火的前沿和活火范围。这时把传感器网络节点往火里布撒，撒在不同的位置，被烧掉的可能马上失灵，没有烧掉的随着火焰向它逼近，就可以

测得活火蔓延的具体情况，帮助控制大火的决策。

2 无线传感器网络技术是传统遥感技术的新的增长点

遥感科学技术的基本数据流程如图 2 所示。其基础是辐射传输理论，其技术序列包括传感器设计、数据获取、数据处理、信息提取和应用 5 个部分。新的应用需求对传感器设计、数据获取和信息提取不断提出新要求。数据获取之后需要对数据的辐射和几何准确性进行标定，主要是针对传感器自身的误差，或者是环境因素对数据造成的一些误差，设法让得到的数据最接近于真实。

无线传感器网络的技术层面和传统遥感有很多相似的地方。它能够使用更多的传感器、有更灵活的传感器搭载平台（人、动物、植物、建筑、车辆、地面或空中），更容易的数据校正和简单的数据处理。图 2 中间的虚线箭头是指遥感数据和无线传感器网络数据之间的相互辅助关系。航空遥感可以装载一个无线传感器网络数据接收站，在飞机过顶时向下方的传感器网络节点发送指令，启动和实施数据传输。地面传感器网络节点原始数据可以辅助遥感数据校正和信息提取。经过处理分析的地面网络节点数据可以支持遥感应用，反之亦然。

无线传感器网络技术的特点之一是有为数较多的传感器，可以自动构成网络传感器组合，通过协同工作完成对较大面积区域的多种信息获取任务。在信息提取方面，无线传感器网络和遥感有一个较大不同。遥感数据一般以成像形式供人们使用。人

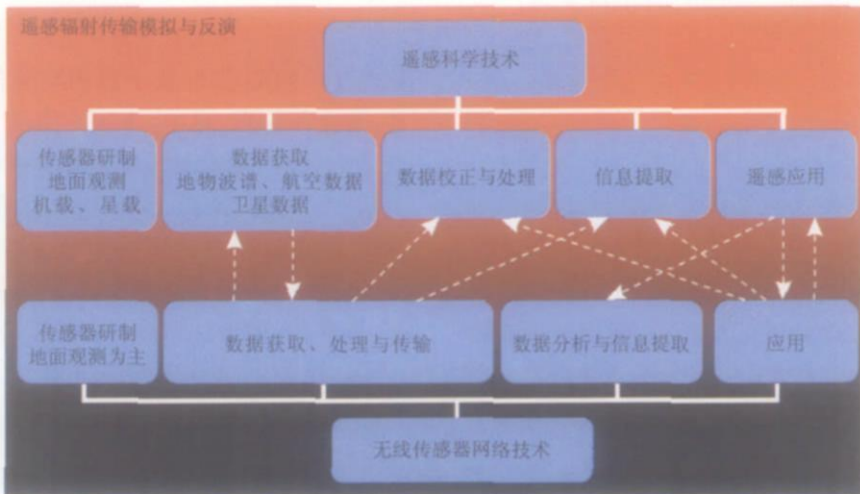


图 2 遥感和无线传感器网络技术的基本内容及其相互联系

Fig 2 Contents and inter relation between remote sensing science and technology and the wireless sensor network

们通过对图像色调及空间结构变化特征进行解译而获得信息。无线传感器网络技术主要是直接测量对象的各种特性,如温度、湿度、风速、风向、压力、气体化学成分、某些生物成分等。但是遥感方法一般无法直接获得风速信息。

由于遥感发展已经有 30 余年。传感器研制、数据获取平台建设比无线传感器网络技术更加成熟。因此更多人关注信息提取和应用。而无线传感器网络技术是最近六七年才发展起来的,它在数据获取和平台搭建方面还需要做许多工作,因此应用还相对滞后^[2 3 7]。

3 无线传感器网络技术可以实现实时数据传输与显示

相对于传统制图学而言,人们认为遥感数据现势性强,而相对于无线传感器网络技术而言,遥感的现势性和时间采样频率要差得多。无线传感器网络技术能做到实时数据传输、显示和基本分析。有了实时数据就能实现与其他来源或其他无线传感器数据的瞬时集成。下一步实时显示才能成为可能。无线传感器网络技术,加上传统的遥感,再加上虚拟现实,就形成了天地一体化的遥感系统。美国军方专门成立地空间情报局 (Geospatial Intelligence Agency),收集分析全球的地空间信息。其主要任务之一是传感器瞬时集成和虚拟现实技术。图 3 是从北京通过网络查询获得的加州大学 James Reserve

安装的环境摄像机和气象站于当地时间 2006 年 12 月 21 日凌晨的实时数据。

James Reserve 只有几平方公里,但是架设了很多传感器——土壤传感器(测土壤呼吸的仪器、土壤剖面成像仪、土壤湿度仪等)、观测摄像机、自动气象站、涡度相关仪等。在山坡上沿特定方向埋了许多透明的管子,每个管子中布设一架很精密的传感相机,用一个马达带动沿管子上下移动成像,上下一个过程一个小时左右,可以获得数据量在 20GB 以上的土壤剖面成像资料,为分析土壤水渗透、化学成分迁移、土壤中生物活动、植物根系发育等提供科学数据。涡度相关仪主要测量土壤和生态系统与空气之间碳、氮、水等的交换。尽管 James Reserve 在国际上很有名,但目前传感器网络主要还是有线的,地面、树上到处拉着线,空中吊着各种各样的传感器,地面上也有很多。他们在人工鸟窝里架设相机,观察鸟类筑巢、孵育活动。有的相机对着一片青苔。这里不断向研究者们提供详细的生态系统数据。美国自然科学基金会正在规划建 20 个左右的生态监测网站(在加州只建一个。初步确定由伯克利加州大学负责,在旧金山湾区的南面),整个投资的力度在 3 亿美元左右。每个监测网站的主要投入是布设各种环境要素的监测传感器,为科学研究架设平台,为美国环境变化研究提供连续的实测资料。中国也建立了生态网站,已经做了大量基础设施投入,但是在地面传感器网络方面还没有多少投入。只有有了地面监测传感器网络,才能真正地实现天地一体化

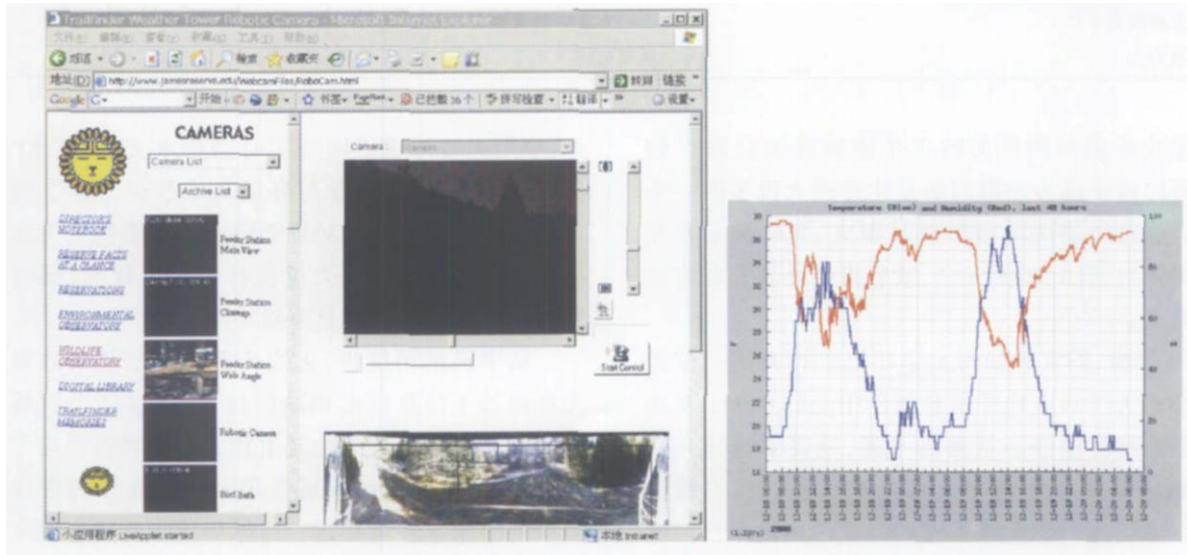


图 3 通过网络查询获得的加州大学 James Reserve 的实时图像过去 48 小时温度和湿度数据

Fig 3 The latest 48-hour temperature and humidity profiles at the University of California James Reserve acquired through real-time Internet data retrieval

的设想,也只有有了这些连续的监测数据,才能谈遥感的真实性检验。

4 无线传感器网络技术在环境地学应用中的特点及基本问题

在遥感领域里,国际上已经把无线传感器网络技术视为未来一个非常重要的领域^[6,8,9]。表 1 列出了今年美国几个大的地空间科学机构提出的未来 5—10 年优先发展的研究方向,不难看出传感器网络技术已经受到地学和国防情报领域的高度重视^[10,11],并被视为地空间信息科学领域的重要组成部分。其中美国地质调查局(USGS)是美国最大的地表空间信息提供者,拥有近万名从事地质矿产、地

震、水资源、生物多样性、地理与制图研究的职员。他们将未来 10 年的科学研究重点放在生态系统科学、环境与健康、水普查、自然灾害科学、气候变化科学和能源与矿产资源 6 个方面的地学前沿问题中^[12]。美国地质调查局要对美国的生态系统做全面的动态制图。USGS 在过去 127 年的发展历史中,引领了不少地学研究潮流,是地形制图的先驱,引导着世界的标准和规范。现在把研究精力转向生态环境制图。可见生态系统对人类社会发展的重要性。第二个研究方向是环境与健康。USGS 自己承认不是主要研究健康的国家机构,但是现在越来越多的疾病与环境因素有关,所以把它作为第二个战略重点,计划大力加强环境与健康的研究,并将无线传感器网络技术列为要重点使用的三大技术之一。

表 1 美国国家级地空间信息科学技术研究机构及学术组织的优先发展方向

Table 1 The Prioritized research directions Proposed by NGA, NRC and USGS of the United States of America

美国地空间情报局 (NGA) 2006 年提出的优先科研项目	美国国家研究委员会 2006 年出版 Beyond Mapping 指出的地空间信息技术的发展趋势	美国地质调查局 2006 年规划的今后 10 年的 6 大重点科学发展方向及 3 大技术
在任务规划、处理、发布过程中同化各类传感器网络 从异构传感器数据链中实现时空数据挖掘与知识发现 时空数据库管理 过程自动化与人类认知 可视化 地空间数据的高性能网格计算 图像融合 数据集成过程中的文字与地名搜索规则 数据再利用 从多种数据中检测移动目标 地空间数据本体 多级安全	从纸质到数字化数据存储与表达 从地图到用户可控内部数据处理过程的制图服务、多目的制图 可用传感器范围激增,如人、动物和机器人携带的传感器大大提高了空间、时间精度,传感器便于定位 来自不同源地的地理信息瞬时集成成为可能 大量虚拟现实技术再现地理环境的演变	生态系统科学 环境与健康 水普查 自然灾害科学 气候模拟 能源与矿产资源 特别指出必须采纳的 3 大技术: 纳米技术、地球微生物学、基于遥感与传感器网络的环境感知技术

无线传感器网络的特色是能够连续获取点数据。可以说无线传感器网络是比遥感大得多的一个领域。将传感器网络数据瞬时集成、实时显示并充分应用将对国防、国家安全、紧急事件处理有非常重大的意义。

10 年前,伯克利加州大学环境工程系的一位教授在加州大学成立地理信息科学中心时表示了对地理信息系统存储静态数据的不满,他说了这样一句话,“地理信息系统能在洪水爆发时告诉我洪峰流量吗?恐怕你们在家睡着觉的时候一场洪水已经爆发了。”他的不满实际是针对当时地理信息系统不能提供实时测量数据而言的。现在他与地理信息科学中心的教授一起,在美国自然科学基金会的支持

下,应用无线传感器网络实时监测水文、土壤水分、林中气象、火灾等地学与环境科学数据。这个例子说明时间连续性数据对地学研究的重要性。无线传感器网络技术不管白天黑夜都能提供数据,能极大地丰富传统的地理信息系统中的数据。

从学科的角度讲,无线传感器网络技术的发展无疑得益于信息技术和通信技术,是这两个领域推动了无线传感器网络的诞生和发展。它也得益于生物技术,分子马达技术可以用来监测化学污染或环境中的细菌等环境要素。可见从传感器到应用无线传感器网络技术是多学科的交叉。无线传感器网络技术有很广泛的应用需求,因此它有强大的生命力。对于环境应用来说,有以下基本问题需要问答:

(1) 哪些环境要素是可测的

这需要物理、化学、地学等一些基础科学研究作为支持。世界上现在有二、三万种传感器,但依然不能完全满足需求。在环境要素当中,哪些要素是可测的,哪些是不可测的都是很重要的问题。有些环境要素如气温、湿度、风速、风向等在正常的温度范围内已经测出来了,但是拿这些仪器到极地或深海就不一定能够正常工作。还有许多空气成分不能简单实时地测量。因此回答这种问题并不简单,还需要做很多研究^[2 6 13]。

(2) 如何按照环境监测实际需求制作和筛选相应的传感器

对已有传感器,需要针对特定的环境应用研究比较各种性能^[14-16]。在性价比、物理尺寸、便利性等方面还有一系列的问题必须有人做工作。

(3) 如何在空间布设无线传感器节点

无线传感器节点的密度、分布等也需要开展研究。因为许多小气候随地形而变,土壤性质也是如此,这些凭直觉看不到的环境特点,需要尝试各种采样方案才能找到答案。在没有传感器网络技术之前,小气候和水土条件在复杂空间范围内变化的问题没有多少研究积累。考虑空间采样问题,还要考虑系统安全性、稳定性等问题。

(4) 如何传送、存储和表达所测得的数据

这些数据存储和传输问题远没有得到解决。如,在偏远地区供电问题和数据入网问题等还需要做大量试验^[17]。大量数据的传输仍然是一个瓶颈问题。

(5) 如何从所测数据中提取有关信息

研究和解决传感器网络技术的提高和应用需求的扩大对数据处理和信息提取提出的新要求。

(6) 如何运用提取的信息解决环境科学问题和地学问题,并为决策者提供决策支持

传感器网络技术在诸如公众健康、小区安全、智能交通、矿务安全、货物运输、谍报工作等许多领域具有重要作用。它在环境地学领域也具有重要的应用潜力。环境地学中地理位置必须明确地知道。地理位置是传感器网络技术中的可测要素,而传感器网络的一个特长是能够获得长时间连续监测数据。环境地学从静态理解到动态模拟的关键就是能够把时间和空间联系起来。

从逐点的环境监测到地球观测数据网是个很自然的流程。所有与地球有关的数据和与环境有关的数据都能连接在一起,链接到一起就有新机会,要联

网就需要解决一些问题。首先要有一个标准,然后要有一个数据交换协议,然后就是多部门的数据联网和部门协作的问题。要有良好的组织协调能力,这在中国比较难。最后才是技术,技术是重要的而且会不断发展。但是它需要的是集成合作和改变现有的水平,遥感就是一个集成的技术问题,最终的目标是为了把国家管理得更好。

传感器网络等新型的地学技术在生态系统监测中应用的意义重大。有人可能认为生态系统太窄了。实际上生态系统的真正含义包括了地质—地下水—土壤—地表水—地表景观—生物—地形制约的气候—大的宏观气候,即从地质到土壤到植物到土地覆盖到大气。生态系统实际上包含的内容是很多的,地表系统中每一个成分都在里面。水文和气象的监测目前已经发展得比较好了,有自己的监测网络体系。火山和地震就更不要说了,也有网络台站。

大洋和极地,人很难去,因此需要遥感和无线传感器网络这类技术。其实针对极地和海洋发展无线传感器网络技术有很大的挑战,要么是温度太低,要么是压力太大。

5 国家地球观测领域应该发展无线传感器网络技术

地球观测领域需要开展无线传感器网络的应用。国家在信息领域已经设立了智能传感器技术研制项目,涵盖了无线传感器网络技术。尽管如此,作者仍认为应该在地球观测领域设立无线传感器网络专题。地球科学领域有它的特殊性,就像遥感设在地学领域一样,在信息领域研究遥感侧重于传感器研制,它建立在对研究对象物理、化学、生物特性的理解,以及回答如何才能探测这些特性的问题等的基础上。在地学领域遥感主要解决地学应用问题。无线传感器网络技术对地学研究的作用类似于遥感,但是它更侧重于用地面传感器网络技术获得在地面不同空间结构位置上的信息。因此它是遥感、地理信息系统和全球导航技术的自然延伸。

为什么说它是地球观测领域的自然延伸呢?遥感能够拓展人的视觉,使人们看到肉眼看不到的更多的东西。无线传感器网络技术则延伸了人们听到、嗅到、触摸到的能力。

环境地学对传感器的要求是对位置的显式表达。位置对应其他的领域可能不太需要。当然现在对于健康领域也越来越多地需要位置的信息。环境

地学对属性和位置需要进行同时的分析和研究。位置的信息帮助属性信息的提取,属性的信息会帮助人们鉴定位置。无线传感器网络技术提供的是点的数据,而遥感提供的是面的数据。无线传感器网络技术一般直接获取需要的地表参数,并对遥感解译结果提供真实性检验的参考数据——即所谓的地面实况数据。遥感在地球观测领域中许多参数不能直接获得,需要对遥感数据进行反演才能获得,并需要辅助数据。如何把无线传感器网络技术获得的点数据与遥感得到的面数据进行融合,这是一个地学尺度转换的核心科学问题。因为由于地面结构的复杂性,不能简单地拿着点数据验证面数据。这是环境地学里需要解决的难题。此外无线传感器网络技术对难于到达的区域如海洋、极地等区域仍可通过布设无线传感器网络技术来获得相关地学数据。

《国家中长期科学和技术发展规划纲要》中 11 个重点领域 63 项优先发展的主题中有 20 项适合应用遥感技术,但却有 43 项适合应用无线传感器网络技术。而这 43 项中有 37 项需要位置信息显式表达的无线传感器网络技术。这里面绝大多数优先发展

的主题都需要位置相关的信息。所以作者呼吁在地球观测领域加强无线传感器网络技术的设备建设和技术推广应用。

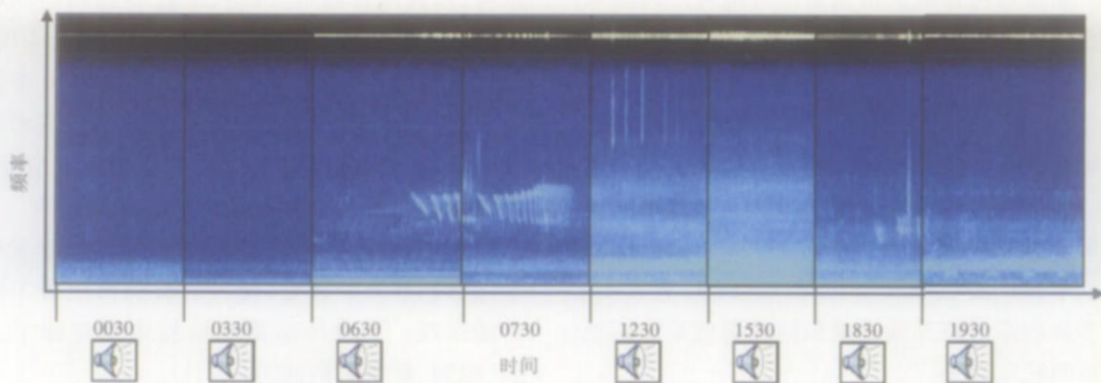
6 无线传感器网络技术湿地环境连续监测设想

图 4 是密植根州立大学使用麦克风记录的声音频谱数据。目的是分析鸟类生活习性及人类噪声环境特性。该声音传感器系统包括一个麦克风,一个卫星通讯装置,太阳能电源。由于一个麦克风对能量的需求不太高,所以能够一直从早到黑连续开启录音机对周围声音环境连续监测。音频数据获取后,给鸟类及各种发声的动物生物多样性研究开辟了新方法。图 4 音频数据图中亮的部分是声音能量较高的部分。可以看出,不同时间记录着不同的环境声音信息。

这种设施激发作者设计了一个简单试验,即用多个位置架设的录音机对发声目标进行定位。基于这种思路作者提出开发“声像一体化湿地连续遥感监测技术”。这种系统技术在地球观测领域比较独



(a)



(b)

图 4 通过卫星无线网络获取的野外环境音频采集传感器 (a) 及获取的音频数据 (b)

Fig 4 The sensor system developed for gathering audio data in the field (a), and the audio data acquired by the sensor system (b)

特, 因为传统遥感一般不是基于地面摄像机或录音机传感器建立监测手段。作者从鄱阳湖湿地动态状况监测的实际需求出发, 考虑通过搭建由摄像机和录音机组成的一体化声像传感系统, 和现代化的无线网络数据传输平台, 建成远程、可控、无干扰的湿地生态系统监测技术, 实现植被生态系统、野生动物群落、家畜牧养的实时监测, 为湿地环境生态管理与野生动物保护、遥感数据地面实时验证与真实性检验及最终遥感天地一体化提供服务。

作者计划在鄱阳湖选择适当洲滩, 构建能够获取声像数据的无线传感器网络技术, 形成地面遥感系统, 回答如何实现对湿地植被生长、野生鸟类以及人类放牧活动连续观测的问题。实现对洲滩植被的多角度、近景立体测量和野生鸟类及放牧活动的较大空间范围与较远距离的观测。

针对从无线传感器网络传输到实验室的数据, 研究湿地植被生长 (覆盖度、高度、叶面积指数、生物量) 和野生鸟类及放牧家畜的定量估测算法、高时频变化检测方法并开发相应软件, 以回答如何对无线传感器网络数据进行定量信息提取的问题。

中国大气环境污染形势十分严峻, 已经给公众健康带来很大威胁。特别是污染气体排放及包含沙尘在内的大气悬浮微粒浓度过高。但是中国环保系统监测点稀疏, 且多集中于城市。因此, 对于大气环境污染的监测, 既需要从空中利用遥感获取大气气溶胶及化学成分的大尺度信息, 又需要研制能够实时、廉价检测空气污染物含量的地面传感器网络技术。这是环境监测对无线传感器网络技术的又一个应用需求。类似地, 在土壤环境中土壤肥力、土壤水分、水体富营养化等环境领域, 无线传感器网络技术也拥有广阔的应用前景。

参 考 文 献 (References)

- [1] Culler D E, Hong W. Wireless Sensor Networks [J]. *Communications of the ACM* 2004 47(6): 32
- [2] Hart J K, Martinez K. Environmental Sensor Networks: A Revolution in the Earth System Science [J]. *Earth Science Reviews* 2006 78(3-4): 177-191
- [3] Stanekovic J A, Abdelzaher T F, Lu C Y, et al. Realtime Communication and Coordination in Embedded Sensor Networks [J]. *Proceedings of the IEEE* 2003 91(7): 1002-1022
- [4] Szwedzki R, et al. Habitat Monitoring by Sensor Networks [J]. *Communications of the ACM* 2004 47(6): 34
- [5] Ho CK, Robinson A, Miller D R, et al. Overview of Sensors and Needs for Environmental Monitoring [J]. *Sensors* 2006 5: 4-37.
- [6] Suhonen J, Kohvakka M, Hannikainen M, et al. Design, Implementation and Experiments on Outdoor Deployment of Wireless Sensor Network for Environmental Monitoring [J]. *Lecture Notes in Computer Science* 2006 4017: 109-121
- [7] Yang X P, Ong K G, Dreschel W R, et al. Design of a Wireless Sensor Network for Long-term In-situ Monitoring of an Aqueous Environment [J]. *Sensors* 2002 2(11): 455-472
- [8] Mahfuz M U, Ahmed K M. A Review of Micro-nano-scale Wireless Sensor Networks for Environmental Protection: Prospects and Challenges [J]. *Science and Technology of Advanced Materials* 2005 6(3-4): 302-306
- [9] Delin K A, Jackson S P, Johnson D W, et al. Environmental Studies with the Sensor Web: Principles and Practice [J]. *Sensors* 2005 5(1-2): 103-117.
- [10] Committee on Basic and Applied Research Priorities in Geospatial Science for the National Geospatial Intelligence Agency. Priorities for Geoint Research at the National Geospatial Intelligence Agency [M]. The National Academies Press 2006: 1029.
- [11] Committee on Beyond Mapping. Beyond Mapping Meeting National Needs Through Enhanced Geographic Information Sciences [M]. The National Academies Press 2006: 1009
- [12] Science Strategy Team. USGS Facing Tomorrow's Challenges: USGS Science in the Next Decade [S]. US Department of the Interior 2006: 629
- [13] Feng J, Qu G, Polkonjuk M. Actuator-based In-field Sensor Calibration [J]. *IEEE Sensors Journal* 2006 6(6): 1571-1579
- [14] Kung H Y, Hua J S, Chen C T. Drought Forecast Model and Framework Using Wireless Sensor Networks [J]. *Journal of Information Science and Engineering* 2006 22(4): 751-769
- [15] Norman M M, Korhonen T. Design of a Concept and a Wireless ASIC Sensor for Locating Earth Faults in Unearthed Electrical Distribution Networks [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery* 2006 21(3): 1074-1082
- [16] Chung W Y, Oh S J. Remote Monitoring System with Wireless Sensors Module for Room Environment [J]. *Sensors and Actuators B-Chemical* 2006 113(1): 64-70
- [17] Quek T Q S, Dardari D W, in M Z. Energy Efficiency of Dense Wireless Sensor Networks: To Cooperate or Not to Cooperate [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 2007 25(2): 459-470