

面向海洋场景的无线传感器网络体系结构模型研究

刘林峰^{1,2} 刘 业³

(南京邮电大学计算机学院 南京 210003)¹ (南京邮电大学计算机技术研究所 南京 210003)²
(中国科学技术大学苏州研究院 苏州 215123)³

摘 要 研究了传统无线传感器网络体系结构的缺陷,分析了海洋场景的特点,总结了基于海洋场景的无线传感器网络的典型需求目标,归纳出海洋环境中无线传感器网络体系结构模型设计的若干原则。结合海洋环境自适应、网络自愈、能量高效、动态优化等目标需求,提出了一种面向海洋场景的无线传感器网络体系结构模型 WSNAOS,并对 WSNAOS 模型的设计理念、主要特色、各层和各模块功能进行了详细阐述。WSNAOS 模型不仅具备了海洋环境自适应和能量高效等特征,还能为面向海洋场景的无线传感器网络各类协议的研究提供一个统一的问题描述和分析的理论框架。

关键词 无线传感器网络,海洋场景,网络体系结构

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Research on Wireless Sensor Network Architecture Model in Ocean Scene

LIU Lin-feng^{1,2} LIU Ye³

(College of Computer, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)¹
(Institute of Computer Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)²
(Suzhou Institute for Advanced Study, University of Science and Technology of China, Suzhou 215123, China)³

Abstract The defects in traditional wireless sensor network (WSN) architectures were firstly studied, then the characteristics of ocean scene were analyzed. The typical requirement objectives of WSN based on ocean scene were acquired, at last a set of design principles for WSN model in ocean environment were concluded. According with the objects ocean environment adaptive, network self-cure, energy efficient and dynamic optimization, a wireless sensor network architecture model for ocean scene (WSNAOS) was proposed. Furthermore, the design thinking, general characteristics and functions of every layer or every module were described and discussed. WSNAOS not only has the characteristics: ocean environment adaptive, energy efficient and so on, but also supplies the research of WSN protocols in ocean scene with a common problem description and an academic framework.

Keywords Wireless sensor network, Ocean scene, Network architecture

随着通信技术、嵌入式技术、传感器技术、无线技术的迅速发展和日趋成熟,具备通信能力、计算能力和感知能力的微型传感器节点开始在世界范围内涌现,数目众多的传感器节点协同工作,它们随机分布于监测区域周遭环境,通过自组织的无线通信方式构成无线传感器网络^[1-3] (Wireless Sensor Network, WSN), WSN 可以实现对客观物理世界的感知和控制,但它往往缺乏持续、稳定的能量补给。其首要设计目标^[4]一般是通过高效使用能量来最大化网络生命期^[5],从而能采集更多的兴趣数据,最大限度地实现网络功用效率。在环境监测等应用中,网络覆盖度^[6]也作为衡量网络性能的关键指标。当今陆地资源日趋枯竭,人类的生存和发展的目光转向誉为“能量之源”的海洋^[7,8]。但海洋尤其是海底环境对于人

类而言非常恶劣,人类无法在海洋中便捷地、大规模地开展资源监测和开发活动。无线传感器网络是感知物理世界的一项新型工具,尤其随着近年来硬件技术的发展,传感器节点已具备水下作业^[9]和感知各类矿物资源、化学元素的能力,因此无线传感器网络势必能在海洋资源监测和开发中发挥重要作用。此外,无线传感器网络还被广泛应用于海洋污染监控、海底地理信息采集、海域战术监视等众多海洋监测应用。海洋场景中 WSN 内应有 4 种节点类型:底面节点、浮游节点、自移动节点^[10]和汇聚节点。其中底面节点铺设于海底面,可能会因海底面地形异常复杂而遭遇障碍地势,从而形成通信孤岛。该类节点受海底面摩擦力影响,所以位置迁移幅度较小。浮游节点依靠浮力装置悬浮在海水中(悬浮深度与海水盐度、

到稿日期:2009-11-09 返修日期:2010-01-20 本文受国家自然科学基金项目(60903181, 40801149),国家高技术研究发展计划(863 计划)(2009AA12Z219),江苏省高校自然科学研究项目(09KJB520009),江苏省博士后基金(0801019C),中国博士后科学基金(20090451240),南京邮电大学引进人才科研启动基金项目(NY208073)资助。

刘林峰(1981—),男,博士,讲师,CCF 会员,主要研究方向为无线传感器网络,E-mail:liulf@njupt.edu.cn;刘 业(1977—),男,博士,讲师,主要研究方向为 P2P 网络。

浮力装置属性相关),受外力扰动的位置改变幅度较大,但发生位移待稳定后仍将处于相同悬浮深度的横切平面上。自移动节点具备自主的移动能力,能够按照某种策略进行位移,承担改善网络结构和自愈失效拓扑的重要作用。

在无线传感器网络领域,学术界现有成果多集中于特定环境下对某项关键技术的研究。国内外研究机构往往根据特定应用类型、运行环境独立进行研究与开发,未针对应用环境研究无线传感器网络的体系结构。而研究传感器网络体系结构不仅能从整体上把握特定场景下的传感器网络特征,还将对各项关键技术的研究产生深远的指导意义。目前在国内外文献中关于面向海洋场景的传感器网络体系结构的研究鲜见报道,本文将针对海洋场景的典型特点,充分借鉴其他形式网络如互联网、P2P 网络、ad hoc 网络、overlay 网络等的体系结构,采取自顶向下的研究方法,首先从体系结构角度分析、抽象、归纳传感器网络的共性和个性需求目标,然后将问题划分、归类、映射到关键技术层面,最后依据网络需求给出 WSN 体系结构的设计原则。

1 面向海洋场景的传感器网络体系结构分析和设计

无线传感器网络在成网方式、通信模式、资源能力等方面与互联网具有很大差异,也有别于传统意义上的自组织网络,不再遵循传统互联网中“端系统复杂、核心网络简单”的网络体系结构原则,因此传统 IP 层路由转发和存储机制不再适用。

1.1 研究基础

当前学术界较为认同的传感器网络协议^[11,12]通常由物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层组成,其每层功能与互联网结构的对应层相似。除此之外,传感器体系结构中还配以能量管理、移动管理、任务管理、时间同步、定位技术等模块,分别针对传感器网络的各项特点对结构进行扩充和支撑。各协议或模块是息息相关的,如定位技术为基于节点位置信息的拓扑控制或路由协议等提供位置信息,拓扑控制为路由协议提供必要的支撑平台,因此直接影响到上层路由协议的性能,该体系最终形成一种 5 层结构,如图 1 所示。

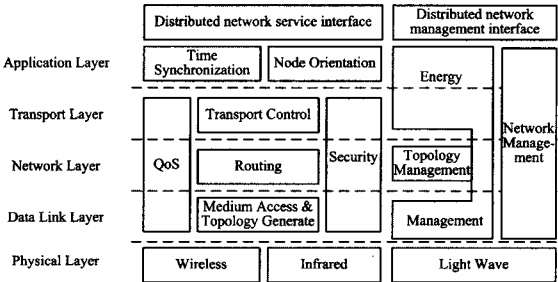


图 1 无线传感器网络体系 5 层结构

文献[13]提出一种 SNA(Sensor Network Architecture)体系结构模型。如图 2 所示,该模型可解析为物理层、数据链路层、传感器网络协议层(SP, Sensor-Net Protocol)、传感器网络应用层的层次结构。其中 SP 能识别多种应用并为上层协议运行提供高效的通用平台。在 SNA 模型中还特别融入了能量管理和拓扑发现等能力,能够较好地解决海洋场景中 WSN 的能量高度受限和拓扑易变问题。基于文献[13]的研究成果,由于普通数据报文和控制报文的重要性存在差异,文献[14]认为在 WSN 体系结构模型中也应划分为数据和控制

两部分。如图 3 所示,数据侧与文献[13]相似,而控制侧必须包含传输层,以确保控制报文的可靠传输。尽管上述模型覆盖的关键问题较为全面,但文献[13,14]中并未考虑部署环境的多样性,在模型中没有针对环境进行与适应性相关的研究。

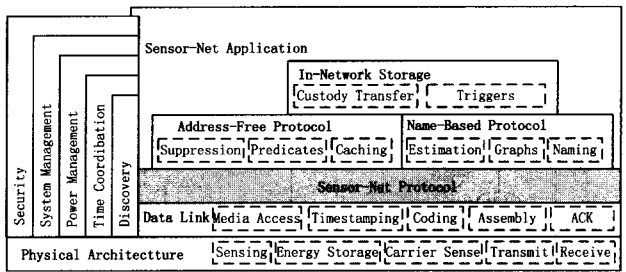


图 2 SNA 体系结构模型解析图

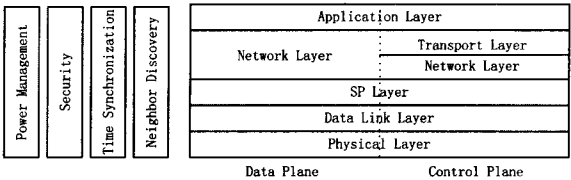


图 3 区分数据和控制报文的传感器网络体系结构

针对传感器网络数据为中心的特点,Kumar 等人在 2006 年从数据角度提出一种分层的网络体系结构 SensorStack^[15]。SensorStack 结构包括无线通信层、数据链路层、数据服务层、数据融合层和应用层,并配有信息交互服务和支撑服务模块。其中,数据链路层提供传统的 TCP/IP 的 MAC 层服务;数据服务层负责分发数据报文至单个或多个邻居节点,并且能接收待融合数据报文或转发报文至应用层;SensorStack 的数据融合层支持两种融合机制:在每跳节点进行融合或只在特定节点(如目的地节点)进行融合;信息交互服务模块可以视作构建了一个信息数据库,它除了解决不同服务间信息的获取问题外,还实现了交叉层的优化;支撑服务模块提供了数据捕获、汇聚节点处数据表达、初始化数据融合以及特定应用需求自适应等功能。SensorStack 涉及了物理部署场景差异对 WSN 体系结构的影响,提出通过交叉层的信息查询方式来自适应场景的动态变化。然而 SensorStack 对于环境自适应问题没有做较为详尽的研究,环境定义也无法囊括 WSN 的其他外界影响因素,所以相关原则和模型也无法适用于本文面向海洋场景的 WSN。

1.2 WSN 需求目标分析

针对传统 WSN 体系结构研究和设计中的不足,结合海洋场景的典型特征和特殊需求,本文认为海洋场景中传感器网络体系结构的研究必须考虑以下 10 个方面:

需求 1:海洋环境自适应。面向海洋监测场景部署的无线传感器网络必须具备一定的海洋环境自适应能力。这是由于海洋环境、网络状况以及监测类型都会呈现出多样性:(1)因气候变化、人为活动、自然灾害等外因影响,不同海域甚至相同海域在不同时段的物理环境迥异;(2)针对不同海洋监测应用所计划部署的传感器网络状况,如节点数量、分布特点及节点能力并非一致;(3)不同海洋监测应用所期望获得的数据类型、用户需求也不尽相同。无线传感器网络的海洋环境自适应能力主要体现在对海洋环境的感知、识别、判断以及应对能力。海洋环境的具体涵义如图 4 所示。从图 4 中可以看

出,海洋环境由物理环境、网络环境和应用环境3部分组成,其中物理环境包含无线传感器网络部署的海洋地貌、海洋气候、海水温度、海水盐度、海浪海风扰动规律等;网络环境反映了节点规模、节点分布及节点硬件能力等情况;应用环境包括具体监测类型、用户需求和兴趣数据特点等。

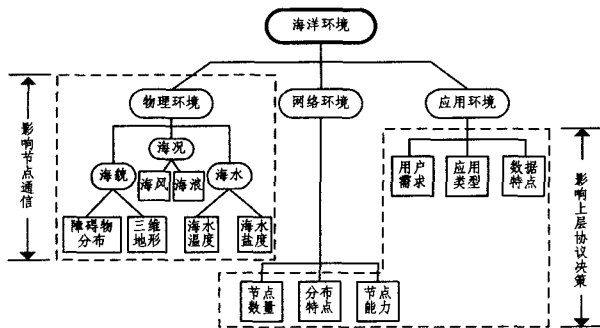


图4 海洋场景中环境的涵义

需求2:网络自愈合。海洋环境中无线传感器网络的连通性要求无线传感器网络具备网络自愈合能力。这是由于海洋场景有别于陆地场景,无线传感器网络在海洋场景中需要进行水下通信,并且传感器节点会受到各类外力(如海浪和海风扰动、海洋生物触动等)影响而发生位置迁移,甚至可能因此遭受毁坏,从而导致网络拓扑变化频繁、局部网络失效概率增高,进而传感器网络的连通性也缺乏基本保障,所以网络自愈合能力也是海洋场景中无线传感器网络必备的要素之一。

需求3:能量高效。传统无线网络的设计强调高质量的服务保障和高效带宽的利用,然而由于传感器网络并不相同,由于缺乏持续、稳定的能量供给,其首要设计目标是通过高效使用能量来最大化网络生命期,以采集更多的兴趣数据。其中WSN生命期^[16]通常定义为在传感器网络系统的流量路由过程中,最早因耗尽电池能量而失效的节点的生存时间。网络生命期体现了能耗的效率,生命期极大化是高效能耗WSN的优化目标,从本质上反映出网络拓扑结构、节点可用能量和路由选择等因素对生命期的影响。从生命期极大化的角度来优化可控因素,以避免系统内节点能量达上限,从而提高网络的整体能耗效率。传感器网络的绝大部分能量消耗于通信传输环节^[17],通信时节点的能量消耗模型决定着能耗不仅与路径的选择相关,还与网络拓扑、数据流量、通信干扰等诸多因素紧密相联。综上所述,无线传感器网络另一设计目标是通过高效使用能量来最大化网络生命期,即注重网络的能量高效(energy efficient)特征。

需求4:网络动态优化。海洋环境恶劣且复杂多变,很容易改变无线传感器网络初始的较优状态(如拓扑结构、水声信道等)。为了提高各种网络性能指标,必须适时对无线传感器网络的各种状态进行动态优化。该能力可以通过自移动节点迁移等拓扑控制手段来实现。

需求5:覆盖范围可预测。由于海洋中受到各种海况(如海风、海浪等)扰动影响,无线传感器网络可能发生横向或纵向的漂移,致使网络覆盖范围发生变更。覆盖范围的预测能力基于各种海况对海洋运动体的典型扰动规律,有助于传感器网络作出适当部署决策,以便在特定时期覆盖特定兴趣区域,完成监测活动。

需求6:网络可异构。通常情况下面向海洋场景的监测应用需要部署大量无线传感器节点,这些节点所形成的无线

传感器网络可能是异构的,如节点的计算能力、初始能量、通信半径,乃至协议等方面都可能存在差异,所以传感器网络应容纳不同类型节点组成异构网络。

需求7:多维可扩展^[18]。无线传感器网络应该在网络规模、网络功能、网络性能等多个维度上具备良好的可扩展性,这样才能保证网络系统在有差异的环境下保持功能、规模的可扩展特点和性能的优雅升/降级特点。

需求8:服务质量可保障。不同类型的海洋监测应用对无线传感器网络服务质量提出不同的要求(如面向军事领域的海洋监测应用寻求低时延和安全的服务),一般需要为特定应用保障某种特定的服务质量。海洋场景中部署的无线传感器网络必须结合特定应用需求进行合理的资源管理和分配,以确保满足必要的服务质量要求。

需求9:数据可靠传输。海洋环境中采用水声通信方式^[19],由于有温度、盐度、水流、界面的反射和折射因素^[20],水声信道带宽有限,信号容易发生畸变,或会受到噪声严重干扰,因此务必在传感器网络的设计中考虑数据的可靠传输。一般这可以通过适量地增加拓扑及路由的冗余度来解决。

需求10:高性能。尽可能地实现网络的其他性能指标,包括提升网络容量,减小信道干扰,增强空间复用率,扩大网络覆盖度,降低信道误码率,优化通信链路等。

1.3 体系结构设计原则

由上述需求目标可得出如下5条传感器网络体系结构的设计指导原则。

原则1:自适应原则。海洋环境的复杂性和多变性使应用场景和类型非常丰富,并且预先设定的部署可能频繁发生变化,所以海洋环境自适应、网络自愈合及网络动态优化能力是传感器网络体系结构设计中需要重点关注的,这些能力是面向海洋场景的无线传感器网络典型的且区别于其它网络的特征,也是该场景下传感器网络体系结构有别于传统网络体系结构的设计要点。

原则2:能量高效原则。传感器网络体系结构的设计必须体现能量高效的特征。能耗效率控制覆盖能量的感知、控制、调度和使用4个环节,通过对能量的管理最终延长网络生命期和传感器网络的工作寿命。

原则3:分层设计原则。体系结构的分层方法能够有效分解网络系统的复杂性,并且有利于对其体系结构的理解、实现和标准化。因此,面向海洋场景的无线传感器网络体系结构设计也应该遵循分层式结构。

原则4:构件化设计原则^[21]。将构件化思想引入到高效能耗的WSN应用构建中来是非常必要的,当任一资源描述、服务组合策略或交互协议等相关技术发生改变时能够相对容易地进行可替换操作。构件化设计不仅使体系结构功能得到合理划分和封装,还使得面向海洋场景的无线传感器网络特色需求的实现成为可能。

原则5:多方式交互原则。鉴于海洋场景的多样性和部署于该场景的无线传感器网络的易变性,从服务的角度看,应通过传感器网络协议间水平、垂直以及跨层等多种方式的交互来获得相应服务。协议或模块则依据所获知的下层环境参数或上层应用反馈接受定制调用及优化,才能完善、扩展、提升传统传感器网络的功能和性能。

2 无线传感器网络体系结构参考模型

从海洋环境自适应、网络自愈合、能量高效等角度入手,在借鉴已有研究成果的基础上,参照本文给出的设计原则和构造规则,提出了一种面向海洋场景的无线传感器网络体系结构 WSNAOS(Wireless Sensor Network Architecture in Ocean Scene),如图 5 所示。

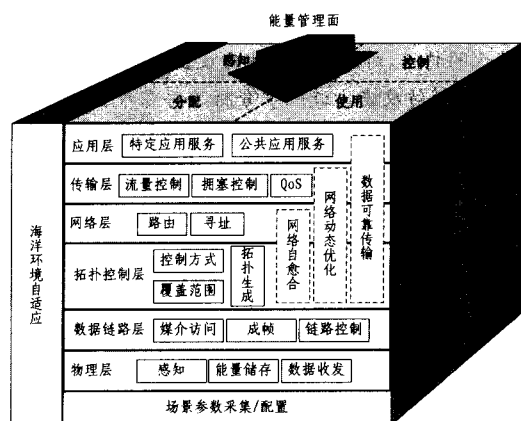


图 5 WSNAOS 体系结构模型

该三维立体图中显示了传感器网络的协议栈包括物理层、数据链路层、拓扑控制层、网络层、传输层及应用层的 6 层结构,且底层有场景参数采集和配置支撑,左右两侧分别有海洋环境自适应模块和安全管理、时间同步、移动管理、定位模块。

协议模型顶面的能量面包含了感知、控制、分配和使用 4 个切面。4 个切面之间既存在着协作关系,也在一定程度上存在矛盾性,分别承担着各自的职责:(1)能量感知面由传感器节点感知自身当前的剩余能量,该功能通过硬件实现,可通过测量节点电压值等方式得知相应能量值;(2)能量控制面,根据环境适应层所提供的环境和应用信息或者当前拓扑状态,利用拓扑控制技术对当前拓扑进行调整、修复,从而获得具有良好性质的拓扑结构,其执行可以是定期或触发式的;(3)能量分配面,用于处理节点间(或节点群间)能量的不均衡消耗问题,主要通过路由技术来实现对 WSN 局部区域间的能量平衡调度;(4)能量使用面,即对兴趣数据在 WSN 内传递时所消耗能量过程的观测和管理,是对节点能量消耗的动态记录,它与节点硬件状况、信号强弱、部署环境等相关。

场景参数采集和配置模块能获知部署背景的特征参数。特征参数应包括应用类型、节点硬件指标、网络环境参数、物理环境参数等,提供这些参数可以估算出如节点剩余能量、节点的单位能耗计算方法、兴趣事件发生概率、节点数据流量等多种重要信息。因此海洋环境自适应模块可根据特征参数给各协议层提供适当运行方式的判据或建议。6 层协议的功能分别如下:

(1)物理层提供简单、健壮的信号调试和无线收发技术,为节点提供稳定的调制、传输和接收系统。该层解决了编码调制、通信速率和频段选取等问题。通信速率的选取可根据环境适应层提供的网络环境参数确定,一般采用低功耗、低数据量的通信速率。

(2)数据链路层负责数据成帧、数据流的多路复用、帧检测、媒体访问和差错控制,协调节点对无线媒质的访问,减少相邻节点广播时的冲突,该层保证了传感器网络内点到点和

点到多点的连接。

(3)网络层的目标^[22]在于实现多跳、低能耗、低功率的路由操作。为增加路由可达度并且由于传感器网络节点的稳定性较差,节点多数使用广播式通信,路由算法也基于广播方式进行优化。网络层可根据环境适应层提供的硬件指标和环境参数等信息对路径进行判断和筛选,还必须考虑传感器网络数据为中心的特点。

(4)拓扑控制层根据环境适应层特征参数、节点剩余能量值、当前拓扑状态等信息选择适当拓扑控制方式(一般有分簇和功率调整两种方式),并调整网络拓扑结构,使得 WSN 具有更高的能耗效率。

(5)传输层负责数据流的传输控制,为传感器网络保持数据流或保证与 Internet 连接,从而保证通信服务质量。它的 3 个主要作用可归纳为:(a)通过对应用的多元化和多元分解构建网络层与应用层之间的桥梁;(b)针对应用层特定的可靠性需求,向源端到汇端提供带出错控制机制的传输服务;(c)通过流量拥塞控制机制管理网络内的数据流量。

(6)应用层^[23]由各种面向应用的软件系统构成,为不同的应用提供了一个相对统一的高层人机接口,并以不同的需求形式向人或计算机提交最终结果。目前已有的 3 种典型应用层协议为传感器管理协议;任务管理和数据广播协议;传感器查询和数据分发协议。

协议模型右侧面有 4 个纵向的支撑模块:时间同步模块、移动管理模块、安全管理模块和定位模块。时间同步模块为节点提供逻辑时间或物理时间的信息,可服务于 TDMA 调度机制的构成、多传感器节点的数据融合、目标的运行速度方向等;移动管理模块发现并注册节点移动状况,激发拓扑控制层愈合受损或改变的拓扑,并触发路由的调整和优化进程;安全管理模块包括物理层上电磁干扰的抵御、网络层上防止对路由机制的恶意攻击、采用接入认证方式发现和识别入侵节点、避免入侵节点的错误数据和泛洪攻击以及通过数据加密或数据水印提高兴趣数据的可靠性;定位模块为节点提供自身或邻居位置信息,可服务于拓扑控制、路由、目标跟踪等。

结束语 无线传感器网络在成网方式、通信模式、资源能力等方面与互联网具有很大差异,也有别于传统意义上的自组织网络,因此传感器网络的体系结构必须赋予新的内涵和外延,以适应网络形式的更新和需求的变化。本文基于海洋场景,首先分析了传统无线传感器网络体系结构的缺陷和海洋场景的特点,从而总结出海洋环境中传感器网络的典型需求目标,并归纳出传感器网络体系结构模型设计的 5 条原则:自适应、能量高效、分层设计、构件化设计和多方式交互,提出了一种面向海洋场景的无线传感器网络体系结构 WSNAOS,对 WSNAOS 模型的设计理念、主要特色、各层和各模块功能进行了详细阐述。WSNAOS 模型能为面向海洋场景的无线传感器网络各类协议的研究提供一个统一的问题描述和分析的理论框架,期望为未来无线传感器网络在海洋环境中的建设和部署提供有益的指导。

参考文献

- [1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramanian Y, et al. Wireless sensor network: A survey [J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393-422

(下转第 101 页)

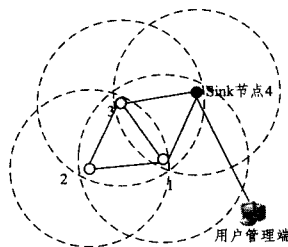


图5 无线传感器网络信息管理平台验证环境

以服务信息里的采集时间为例进行测试。想要改变节点1采集传感数据的间隔,在PC机的用户管理端界面输入节点1的IPv6地址以及想要设置的采集时间(8s),测试结果以图6所示的形式返回给用户。

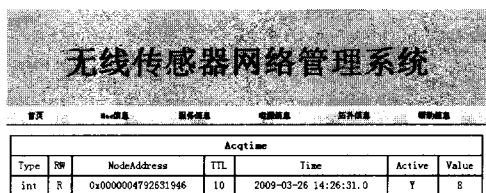


图6 Acqtime查询配置测试界面

可以在节点向服务器发送传感数据的数据库中观察到,经过对采集时间的设置,节点采集间隔由1s变为8s,如图7所示。



图7 经过对采集时间的设置,节点采集间隔改变

结束语 本文介绍了无线传感器网络管理方面的基础知

识和目前传感器网络的研究进展,描述了IPv6无线传感器网络管理系统平台的结构与功能,介绍了系统各个子系统的模块划分及设计。相对于比较成熟的无线传感器网络的基础支撑协议,该系统关于传感器网络管理方面的知识比较缺乏,还需要进一步的研究和实践。未来的无线传感器网络管理将在分布式管理、新的网络测量技术、灵活机动的配置功能几个方面进一步开拓发展^[8]。

参考文献

- [1] 孙利民,李建中,陈渝,等. 无线传感器网络[M]. 北京:清华大学出版社,2005:3
- [2] Davies J. 理解 IPv6 [M]. 张晓彤,晏国晟,曾庆峰,译. 北京:清华大学出版社,2004:13
- [3] 崔莉,鞠海玲,苗勇,等. 无线传感器网络研究进展[J]. 计算机研究与发展,2005,42(1):163-174
- [4] Ruiz L B, Nogueira J M, Loureiro A A F. MANNA: Management Architecture for Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2003, 41(2): 116-125
- [5] Ruiz L B, Silva F A, Braga T R M, et al. On Impact of Management in Wireless Sensor Networks [J]. IEEE/FIP Network Operations and Management Symposium, 2004, 1(4): 657-670
- [6] Wang Feng, Tian Qie-huan, Gao Quan-xue, et al. A Study of Sensor Management Based on Sensor Networks [C] // Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robots, Intelligent Systems and Signal Processing. Chang sha, China, October 2003, 2: 8-13
- [7] Harneny S. 简单网络管理协议(第2版)[M]. 胡谷雨,张巍,倪桂强,等译. 北京:电子工业出版社,2000:7
- [8] 李晓维,徐勇军,任丰原. 无线传感器网络技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2007:358
- [9] [EB/OL]. <http://snap.cs.berkeley.edu/>, 2007
- [10] Ramesh S. A Protocol Architecture for Wireless Sensor Networks [EB/OL]. www.cs.utah.edu/~sramesh/attachments/sensornet_archi.pdf, 2008
- [11] Kumar R, PalChaudhuri S, Ramachandran U. System support for cross-layering in sensor network stack [A] // Proc. of International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Networks (MSN) [C]. 2006
- [12] Chang J H, Tassiulas L. Routing for maximum system lifetime in wireless ad-hoc networks [A] // Proc. of 37th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing [C]. Monticello, IL, 1999
- [13] Iyengar R, Kar K, Banerjee S. Low-coordination topologies for redundancy in sensor networks [A] // Proc. of MobiHoc'05 [C]. San Francisco: ACM press, 2005: 332-342
- [14] 蒋树声. 海洋科技发展战略报告[M]. 北京:群言出版社,2007
- [15] 王曙光. 海洋开发战略研究[M]. 北京:海洋出版社,2004
- [16] Khan A, Jenkins L. Undersea wireless sensor network for ocean pollution prevention [A] // Proc. of Communication Systems Software and Middleware and Workshops (COMSWARE 2008) [C]. Bangalore: IEEE Press, 2008: 2-8
- [17] Gangadharapalli S, Golwelkar U, Varadarajan S. A topology based localization in ad hoc mobile sensor networks [J]. LNCS, 2004, 2928(1): 223-232
- [18] Akyildiz L F, Su W, Sankarasubramaniam Y. A survey on sensor networks [J]. IEEE Communications Magazines, IEEE Press, 2002: 102-114
- [19] Haenselmann T. Sensornetworks [EB/OL]. http://www.informatik.uni-mannheim.de/~haensel/sn_book/, 2006: 15-70
- [20] Nets-noss: Creating an architecture for wireless sensor networks [EB/OL]. <http://snap.cs.berkeley.edu/>, 2007
- [21] Ramesh S. A Protocol Architecture for Wireless Sensor Networks [EB/OL]. www.cs.utah.edu/~sramesh/attachments/sensornet_archi.pdf, 2008
- [22] Kumar R, PalChaudhuri S, Ramachandran U. System support for cross-layering in sensor network stack [A] // Proc. of International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Networks (MSN) [C]. 2006
- [23] Chang J H, Tassiulas L. Routing for maximum system lifetime in wireless ad-hoc networks [A] // Proc. of 37th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing [C]. Monticello, IL, 1999
- [24] Estrin D. Tutorial "Wireless sensor networks", part IV: sensor network protocols [EB/OL]. <http://nest1.ee.ucla.edu/tutorials/mobicom02/>, 2002
- [25] 杨鹏. 面向服务的新一代网络体系结构及其形式化建模的研究 [D]. 东南大学, 2006
- [26] Pompili D, Melodia T. An architecture for ocean bottom underwater acoustic sensor networks [A] // Proc. of Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop [C]. Bodrum, Turkey, 2004
- [27] 朱昌平,等. 水声通信基本原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2009
- [28] 杨鹏,顾冠群. 新一代网络体系结构:需求目标、设计原则及参考模型[J]. 计算机科学,2007,34(4):1-6
- [29] Edgar H C. Wireless Sensor Networks: Architectures and Protocols [M]. Florida: CRC Press, 2003
- [30] Ilyas M, Mahgoub I. Handbook of sensor networks: compact wireless and wired sensing systems [M]. Washington, D. C: CRC Press, 2005