

水下无线传感器 网络的通信与决策技术

■ 刘林峰 周剑 吴家皋 | 著

Techniques of
Communication and Decision
in Underwater Wireless Sensor
Networks

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

水下无线传感器 网络的通信与决策技术

■ 刘林峰 周剑 吴家皋 | 著

Techniques of
Communication and Decision
in Underwater Wireless Sensor
Networks

人 民 邮 电 出 版 社
北 京

图书在版编目 (C I P) 数据

水下无线传感器网络的通信与决策技术 / 刘林峰, 周剑, 吴家皋著. — 北京: 人民邮电出版社, 2015. 1
ISBN 978-7-115-37198-0

I. ①水… II. ①刘… ②周… ③吴… III. ①水下通信—无线电通信—传感器—研究 IV. ①TN929.3
②TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第238917号

内 容 提 要

本书结合作者近年来在水下无线传感器网络领域的研究成果, 围绕水下无线传感器网络通信技术与决策技术, 针对水下环境特点和网络特点, 全面介绍和探讨了节点部署、节点定位、拓扑控制、路由转发以及信息决策等问题。

本书可作为水下无线传感器网络相关领域的研究人员、工程技术人员和研究生的参考用书, 也可以作为高等院校计算机、通信等相关专业本科生和研究生的教材。

-
- ◆ 著 刘林峰 周 剑 吴家皋
责任编辑 邢建春
责任印制 程彦红
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
三河市海波印务有限公司印刷
 - ◆ 开本: 880×1230 1/32
印张: 4.5 2015 年 1 月第 1 版
字数: 116 千字 2015 年 1 月河北第 1 次印刷
-

定价: 39.00 元

读者服务热线: (010) 81055488 印装质量热线: (010) 81055316
反盗版热线: (010) 81055315

前 言

水下无线传感器网络作为无线传感器网络的一种衍生形式，可被广泛应用于污染监控、水文信息采集、军事入侵监测等众多水下场景，在水体监测和开发中发挥着重要作用。近年来，水下无线传感器网络领域受到国内外研究机构的广泛关注，相关人员进行了大量的研究工作，并取得了一定的成果，积极地推动着水下无线传感器网络的技术发展和实际应用。

由于水介质的特殊性和复杂性，水下无线传感器网络与传统的无线传感器网络在传输时延、带宽、节点移动性、信号干扰、能量消耗等方面存在着明显差异。因此，通信相关协议设计需要进行更改或重新考虑。此外，对水下无线传感器网络所采集的兴趣数据进行融合、分析及挖掘，并做出相应的决策，才能使数据采集具有现实意义，所以决策技术也是本书中涉及的一项关键技术。

本书以水下无线传感器网络通信与决策技术为核心内容，具体包括部署技术、定位技术、拓扑控制技术、路由转发技术、决策技术等，结合水下无线传感器网络及水下环境特点，针对典型网络目标和特定问题，分别给出相应的改进方案或解决方法。

本书由刘林峰、周剑、吴家皋负责策划、编写和统稿。参加研究和写作的成员有王一楠、刘倩倩、黄晨程、朱志文、管文冰、李晟、孔姗姗等，在此表示衷心感谢。

本书的出版得到国家自然科学基金项目（61373139、71301081）

的资助。

本书凝聚了作者近年在水下无线传感器网络领域的研究成果，也广泛收集了国内外相关材料，在本书编写过程中也引用了部分材料，在此一并表示感谢。由于作者学术水平有限，书中难免有错漏之处，欢迎读者批评指正。

作 者

2014年9月1日

目 录

第 1 章 水下无线传感器网络概述	1
1.1 水下无线传感器网络概念及特点	1
1.2 发展及研究现状	4
1.3 决策及应用	6
参考文献	8
第 2 章 水下无线传感器网络部署技术	11
2.1 部署技术概述	11
2.1.1 主要研究内容	11
2.1.2 主要评价指标	13
2.2 研究现状	14
2.2.1 基于部署方式的节点部署算法	14
2.2.2 基于优化对象的节点部署算法	17
2.2.3 基于部署特性的节点部署算法	22
2.3 一种基于深度调节的 UWSN 部署算法	24
2.3.1 系统架构和定义	25
2.3.2 基于泰森图的节点深度调节算法	30
2.3.3 仿真测试	31
2.4 本章小结	38
参考文献	38

第 3 章 水下无线传感器网络定位技术	42
3.1 定位技术研究现状	43
3.2 基于部分信标失效的定位算法	45
3.2.1 算法	46
3.2.2 仿真测试	48
3.3 基于 AUV 协助的定位算法	51
3.3.1 模型假设	52
3.3.2 AAL 算法	54
3.3.3 AAL 仿真	56
3.4 基于多跳拟合改进的三边测量定位	59
3.5 本章小结	64
参考文献	64
第 4 章 水下无线传感器网络拓扑控制技术	67
4.1 拓扑控制问题概述	67
4.2 面向多目标的拓扑控制技术	70
4.2.1 UWSN 拓扑控制模型	71
4.2.2 博弈模型	72
4.2.3 SAA 算法	76
4.2.4 实验及其分析	79
4.3 基于锚定节点移动的拓扑控制技术	85
4.4 本章小结	89
参考文献	90

第 5 章 水下无线传感器网络路由转发技术	93
5.1 路由转发技术研究现状	93
5.2 一种基于静态节点的路由技术	97
5.2.1 算法	99
5.2.2 仿真实验	103
5.3 基于移动节点的数据转发技术	107
5.4 本章小结	112
参考文献	112
第 6 章 水下无线传感器网络决策支持技术	114
6.1 基于感知信息的决策支持问题概述	114
6.2 基于感知信息的定量决策	118
6.2.1 基于感知信息融合的水质评价	118
6.2.2 基于神经网络的水质预测	122
6.3 基于感知信息的定性决策	125
6.3.1 基于感知信息的实时三维可视化	125
6.3.2 基于群体研讨的水质预测	131
6.4 本章小结	134
参考文献	135

第 1 章

水下无线传感器网络概述

1.1 水下无线传感器网络概念及特点

数目众多的传感器节点随机分布于监测区域周遭环境，通过协同工作和自组织无线通信方式构成无线传感器网络^[1]（WSN，wireless sensor network），节点所采集的兴趣数据逐跳路由至汇聚节点，以实现对外观物理世界的感知和控制。WSN 在水域监测、国防军事、气象预报、智能家居、建筑物状态监控、空间探索、医疗卫生、城市交通等诸多领域有着广阔的应用前景，它的出现被视作信息感知、采集和管理的一场革命，美国《Business Week》将其列为“21 世纪最重要的 21 项技术”之一，目前 WSN 及相关技术已列入我国中长期发展规划中的重点发展方向。由于 WSN 往往缺乏持续、稳定的能量补给，其首要设计目标^[2]一般是通过高效使用能量来最大化网络生命期^[3]，从而期望能采集到更多兴趣数据，同时更大限度地实现网络效用。在环境监测等应用中网络覆盖度^[4]通常也作为衡量网络性能的关键指标。

地球表面约 71% 被各类水体（河流、沼泽、湖泊、海洋等）覆盖，当今陆地资源日趋枯竭，而各类水体能提供未来人类生存所需的食品、原料和生活发展空间，将成为人类可持续发展的物质基础。我国人口众多，人均土地资源匮乏，然而却是一个水体资源大国，拥有 27 万平方千米内陆水域和近 300 万平方千米的主张管辖海域，各类水体内蕴藏着极为丰富的资源，因此必须高度重视开发和保护水体资源。我国已逐步重视水体资源的保护和利用，比如针对国情制定了《国家“十一五”海洋科学和技术发展规划纲要》，党的十八大也提出了可持续地利用各类水体资源的战略部署。水下环境较为恶劣，人类无法在水域中便捷、大规模地开展资源监测和开发活动，依靠技术手段来探访水体资源这一方式已被达成普遍共识，如何利用各项技术来合理监测和发掘水下资源已经成为各国科学技术界的关注热点。水下网络的概念最早源于 1993 年美国提出的自主海洋采样网（AOSN），并于 1998 年开展了海网 Seaweb 的实验，随着水下网络研究和应用的迅猛发展，尤其是近年来硬件技术的发展使得传感器节点已具备水下作业^[5]和感知各类矿物资源、化学元素的能力，适合水下环境的传感器节点可协同组网并以声通信方式形成水下无线传感器网络（UWSN，underwater wireless sensor network）^[6-8]。水声传感器网络可被广泛应用于污染监控、水文信息采集、军事入侵监测等众多水下场景，未来势必能在水体监测和开发中发挥出重要作用。鉴于水介质的特殊性和复杂性，水声传感器网络与传统的无线传感器网络存在很大的差异，主要表现在以下 6 个方面。

1) UWSN 节点信号受水下障碍物阻隔、天线方向、发射功率、

天线增益、电池状态及信噪比阈值等方面的差异化影响,被认为具有不规则性,即 UWSN 节点的通信范围和感知范围在不同方位上是不规则的^[9-11]。

2) 由于电磁波在水中会急速衰减并产生多径效应,而光波会发生反射、折射及散射现象,所以都无法适合水中的长距传播, UWSN 采用声波通信^[12,13]方式,因此传播时延要远大于电磁波(光速约为声速的 20 万倍)。

3) 水声通信链接的带宽有限,且传输误码率较高。

4) UWSN 节点容易受到各类外力(如水流运动、水况扰动、水下生物触碰等)影响而发生移动。

5) 由于水下环境较为恶劣,所以节点更易遭受毁坏,从而导致网络拓扑变化频繁、局部网络失效概率增高。

6) 水下声波调制解调需要更多能耗,并且水下报文发送能耗要远高于报文接收能耗。

一般 UWSN 内有 4 种类型的节点:底面节点、锚定节点、自移动节点^[14]和汇聚节点。如图 1-1 所示,其中底面节点铺设于水底面,由于水底面地形一般较为复杂,可能会遭遇障碍地势而形成通信孤岛,该类节点不受缆线牵制所以位置迁移幅度可能较广;锚定节点的底部缆线被固定于水底面,节点依靠浮力装置悬浮在水中,该类节点受外力扰动的位置改变幅度较小,其移动区域形成球冠状曲面(图 1-1 中虚线阴影部分);自移动节点(AUV, autonomous underwater vehicles)具备自主的移动能力,能够按照某种策略进行位移,承担辅助节点部署、提高定位精度、改善网络结构和自愈失效拓扑等重要作用,但由于 AUV 节点代价昂贵,故在网络中

数量较少,如何提高该类节点的利用效率成为 UWSN 中一个重要问题;汇聚节点一般漂浮于水面,把兴趣数据汇总和处理后转发至低轨卫星。

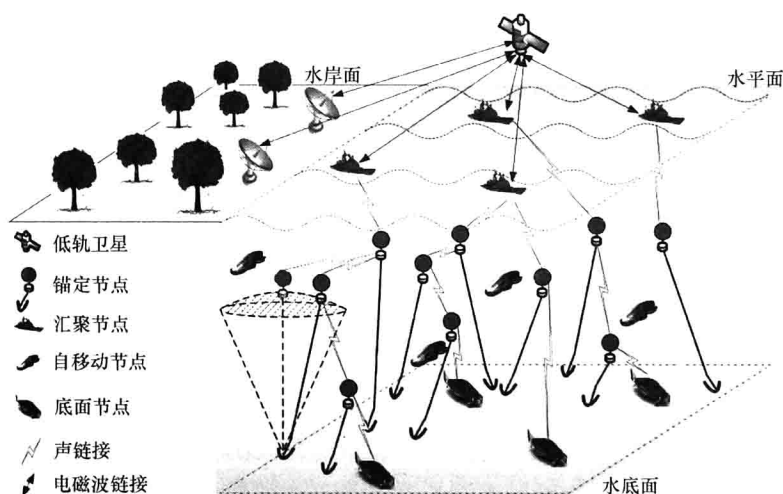


图 1-1 UWSN 结构示意

1.2 发展及研究现状

水下无线传感器网络拥有传统无线网络无法比拟的优势和应用价值,受到越来越多国家的重视。早在 1993 年,美国海洋研究署和麻省理工学院就提出了自主海洋采样网计划,将水下声学网络应用于开发的“自主式海洋采样网络”中。在 1999 年到 2004 年间,美国海军研究办公室(ONR)组织实施了海网 SeaWeb 项目,研究基于水声通信的无线传感器网络的组网技术,实现利用无线传感器网络获取的信息对水声信道时空、空变的特点进行建模。美国国防部

授予美国宾夕法尼亚州州立大学“近海水下监视网络”(PLUSNET)的合同, PLUSNET 系统是一种半自主控制的海底固定、水中机动的网络化设施, 可增强浅海环境中对安静型柴电潜艇的探测和跟踪能力^[15]。哥伦比亚河生态系统(CORIE)针对哥伦比亚河口及其周围河水放置多种传感器, 监测水流速、水温及河水深度和盐碱度等信息。美国海军的先进部署系统(ADS)广泛用于探测敌方潜艇。欧洲国家的 MAST (marine science and technology program) III 计划, 主要研究水声通信网络, 目标是能够实现在潜水中长距离、高数据率的通信。之后, 欧共体又提出了 ACME (acoustic communication network for monitoring of underwater environment in coastal areas) 计划, 是对之前计划的延续, 目的是设计一个适用于水下环境的通信网络可靠通信模型和网络协议算法^[16]。

我国在水下无线传感器网络研究方面起步较晚, 近些年我国开始重视水下无线传感器网络技术在军事、农业及环境监测等方面的应用和研究, 把水下无线传感器网络技术列为国家“863”计划重点资助对象, 并纳入国家自然科学基金项目重点扶持对象。我国在水下无线传感器网络的研究和应用方面也取得了一定的成绩, 如中国科学院上海微系统与信息技术研究所联合中科院南京地理与湖泊研究所开发的太湖水质监测系统, 能够对太湖中的蓝藻进行监测, 对水华灾害进行预警。水利部有关单位与中科院上海微系统与信息技术研究所合作开发了泥石流监测系统, 通过采集蒋家沟附近土壤的压力和水分等参数, 监测蒋家沟泥石流的爆发。国内越来越多的高校、科研机构及企业如中科院上海微系统研究所、沈阳自动化所、沈阳软件研究所、北京邮电大学及清华大学等开始展开水下无线传

传感器网络相关技术的研究^[17]。

1.3 决策及应用

传感器网络的主要任务是感知特定区域的数据,具有可以实时、持续、低成本的感知物理环境信息的特点。根据这个特点,传感器网络的应用探索逐渐成为新的研究趋势。美国国土安全部开始的 SBInet 计划,在与墨西哥和加拿大的边境地区推动基于传感器网络技术的“虚拟边境”建设,以产生一个保卫美国国境的虚拟围墙。2009 年,思科公司与美国国家航空和宇宙航行局(NASA)提出“星球皮肤”(planetary skin)合作项目,该项目针对全球气候变化的挑战,通过开发遍布全球的空中、海洋和陆地传感器网络来感知、分析和报告环境变化情况。日本 NTT DoCoMo 于 2009 年底将环境传感器大规模地安装在移动基站,覆盖日本东京附近关东地区 300 个区域,来感知碳排放和其他大气条件。香港科技大学利用传感器网络开发的煤矿安全监控与引导系统已经在多个国家的相关企业成功应用。浙江林学院、西安交通大学、清华大学、北京邮电大学等高校在浙江天目山国家级自然保护区开展的合作项目“绿野千传”(GreenOrbs),旨在通过开发大规模无线传感器网络系统对森林生态环境进行长期监测,利用传感器感知包括温度、湿度、光照和二氧化碳浓度等多种数据,并以感知的信息向多种重要应用提供支持。

已有学者将传感器网络应用于决策领域。Stoianov 等通过传感器网络感知输水管道的信息,帮助对其管理。Kim 等通过传感器网络感知油轮的信息,用于给出正确的油轮驾驶操作。Yu 等通过传感

器网络感知土壤的冻融状态，用于决定寒冷地区的路面保护策略。Panchard 等通过传感器网络感知土壤信息，用于决定雨养农业的灌溉策略。

现在无线传感网络的概念不再是单纯的物理量传感，而是信息感知、数据传递和智能处理的组合。无论是“智慧地球”，还是“感知中国”，都突出了“智慧”和“知”。利用传感器取得环境信息，通过无线通信手段汇集数据，经分析和处理得出有价值的认知，从而为决策和反馈控制提供依据。

随着工业化程度的提高，城市化进程的不断加快以及人口的不断增加，人类活动越来越频繁深刻地影响着水环境，水污染已成为我国面临的主要环境问题。水污染的发生是一个复杂的生态变化过程，不是单一因素的产物，而是诸多如理化、生物、气象、水文等因素综合作用的结果。此外，水污染状况处于不断变化中。因此，水污染防治是一个具有一定时效性的复杂动态系统问题。

水环境信息是进行水污染防治决策的依据。水环境状况处于不断变化中，必须在一定时间内对当前环境状况进行处理。这要求必须实时了解当前的水环境信息，快速给出水污染防治方案。目前，水环境信息感知方法有人工监测、卫星遥感等。人工监测是比较原始的监测方式，由监测人员配备着嵌入式水质监测仪器，到指定水域现场获取水质参数，必要时需采集水体样本带回实验室进行分析化验。人工监测方法虽然简单易操作，但是耗费了大量的人力和时间，不适合实时、连续的水环境信息需求。卫星遥感方法基本原理是通过遥感卫星对湖泊水体表面的水色进行主动或被动扫描，运用光谱水质模型进行反演。卫星遥感具有范围广、动态、相对成本低

等优势,但存在受天气影响大,精度低,且无法对水面下的环境进行感知等问题。传感器网络具有实时、持续、低成本感知物理环境信息的特点,本书通过传感器网络持续、全面感知水环境信息,并将感知到的信息作为决策依据。

本书针对传感器网络感知信息的特点,研究基于感知信息的定量决策方法与定性决策方法。通过传感器网络感知的信息具有不确定性。如何利用计算机强计算能力与存储能力,从不确定的感知信息中由计算机定量计算得出准确决策,是本书需要解决的关键问题。通过传感器网络感知的信息数据类型繁杂,如何利用专家群体经验以及对隐性知识的认知能力,从数据量大、类型繁杂的感知信息中定性分析得出可靠的决策,同样是本书需要解决的关键问题。

参考文献

- [1] AKYILDIZ I F, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, *et al.* Wireless sensor network: a survey[J]. *Computer Networks*, 2002, 38(4):393-422.
- [2] 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] 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.
- [4] 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.

- [5] 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.
- [6] AKYILDIZ I F, POMPILI D, MELODIA T. Underwater acoustic sensor networks: research challenges[J]. Ad Hoc Networks, 2005, 3(3): 257-279.
- [7] JAWHAR I, MOHAMED N, AGRAWAL D P. Linear wireless sensor networks: classification and applications[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2011, 34(5): 1671-1682.
- [8] HEIDEMANN J, YE W, WILLS J, *et al.* Research challenges and applications for underwater sensor networking[A]. Proc of the 1st ACM international workshop on Underwater networks[C]. New York: ACM press, 2006.33-40.
- [9] TSAI Y R. Sensing coverage for randomly distributed wireless sensor networks in shadowed environments[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(1): 556-564.
- [10] WU C H, CHUNG Y C. Heterogeneous wireless sensor network deployment and topology control based on irregular sensor model[EB/OL]. www.cs.nthu.edu.tw/~ychung/.../GPC2007_Irregular-sensor.pdf.
- [11] ZHOU G, HE T, KRISHNAMURTHY S, *et al.* Models and solutions for radio irregularity in wireless sensor networks[J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2006, 2(2).
- [12] STOJANOVIC M. Acoustic (underwater) Communications. Encyclopedia of Telecommunications[M]. John Wiley and Sons, 2003.
- [13] SALEH I, CUI J H, AMMAR R. Surface-level gateway deployment for underwater sensor networks[A]. Proc of Military Communications Conference