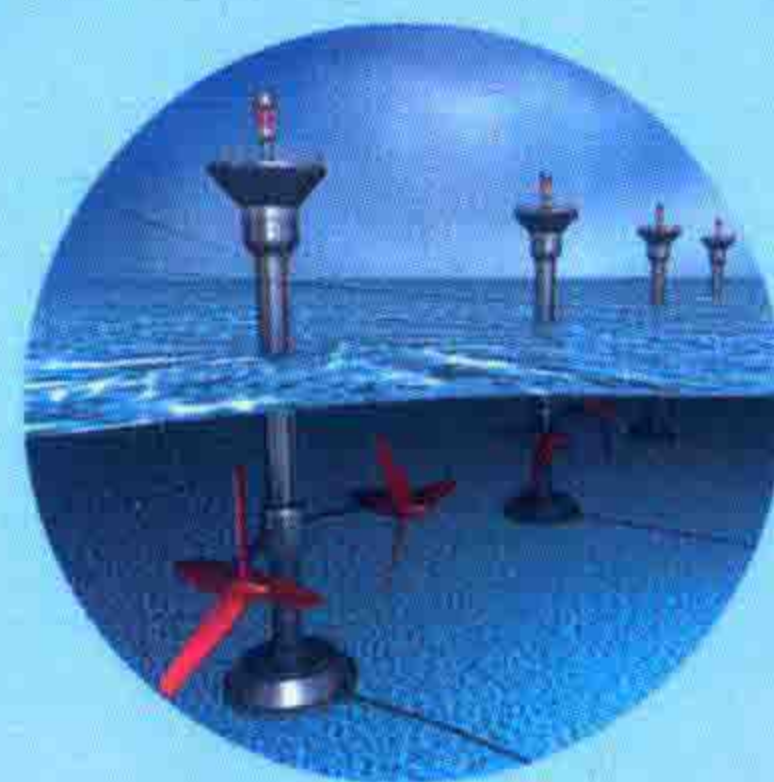




水声传感器网络拓扑

何明 主 编

陈秋丽 刘 勇 沈 剑 副主编

Topology of Underwater
Acoustic Sensor Networks



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

水声传感器网络拓扑

主 编 何 明

副主编 陈秋丽 刘 勇 沈 剑

编 者(按姓氏笔画排序)

仇功达	刘方鑫	闫红伟	张 玮
李春华	李志刚	苗 壮	郑 翔
周 波	祝朝政	柳 强	梁文辉



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

· 南京 ·

内容提要

我国正在制定海洋强国战略,以水声传感网为重要组成部分的海洋环境监测技术已列入国家中长期科技发展纲要,凸显了该领域研究强烈的必要性和紧迫性。作者及其团队按照国家海洋战略发展要求,总结分析了近年来的海洋拓扑构建实践经验,吸纳了水声传感器网络拓扑建设已有成果,参阅了大量翔实的文献资料,浓缩提炼形成本书。本书立足当前水声传感器网络拓扑建设基础,基于源于实践、高于实践的原则,对水声传感器网络拓扑建设的基本概念、生成方法、移动建模、愈合算法、路由协议、优化策略进行理论分析与实验验证。

图书在版编目(CIP)数据

水声传感器网络拓扑 / 何明主编. —南京 : 东南大学出版社, 2017. 3
ISBN 978 - 7 - 5641 - 7041 - 7
I. ①水… II. ①何… III. ①水下通信—传感器—网络拓扑结构—研究 IV. ①TN929.3②TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 029803 号

水声传感器网络拓扑

出版发行 东南大学出版社
出 版 人 江建中
社 址 南京市四牌楼 2 号(邮编 210096)
责任编辑 姜晓乐(joy_supe@126.com)
经 销 全国各地新华书店
印 刷 虎彩印艺股份有限公司
开 本 700 mm×1000 mm 1/16
印 张 10.25
字 数 160 千字
版 次 2017 年 3 月第 1 版
印 次 2017 年 3 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978 - 7 - 5641 - 7041 - 7
定 价 39.00 元

* 本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系,电话:025 - 83791830。

Preface

序

无线传感器网络通常简称为无线传感网,它是大量廉价、微型、同构的传感器节点通过无线通信方式组成的多跳自组织网络。无线传感网技术的兴起可追溯到上世纪 90 年代末,曾被喻为 21 世纪最具影响力的技术之一,该领域的研究一直受到国内外广大学者的青睐与重视。特别是近年来物联网技术的普及,物联网产业的兴起,全面感知、万物互联的信息基础设施成为全社会的共同需求,无线传感网在军事和民生领域都有极其广阔的应用前景。

水声传感器网络是无线传感器网络的一种应用,它由水下特定区域的传感器节点和自主水下航行器节点组成。与地面无线传感网相比,水下无线传感网具有立体部署、拓扑易变、水声通信等特点,因此对传统无线传感器网络技术提出了新的挑战。特别是水下传感器节点能量受限、随机移动性和通信链路时断时通等因素,使水声传感器网络结构具备诸多不确定性和拓扑动态演化性。因此在无线传感网关键技术的研究中,水声传感器网络的拓扑结构是近年来较为活跃的学术领域之一。

党的“十八大”提出建设海洋强国的战略要求,除提高海洋资源的开发能力,发展海洋经济,保护海洋生态环境外,还要坚决维护海洋权益。水声传感器网络是一种全新的海洋测控技术,它集自主数据采集、数据融合和传输应用等功能于一身,在海洋学数据收集、水质污染监测、地震海啸预报、海洋导航和水下军事监视、敌方目标跟踪等方面均具有潜在的应用价值,引起了各国军事和科研部门的高度重视。2016 年底,美军无人潜航器在我南海海域实施抵进侦察和军事测量时被我方捕获就是一例,这种频繁的水下侦

测对我主权和安全构成了严重威胁。从开发、利用、保护、管控海洋的角度看,拥有大量适合水下环境的传感器节点并随机部署于监测水域,对建设海洋强国是十分必要的。

节点部署问题是无线传感器网络的一个基本问题,影响整个网络的性能和寿命。构建水声传感器网络面临诸多困难,如洋流运动、海风扰动、水下生物触动使水下传感器节点很容易产生位移,使通信链路状态发生变化,为避免因节点或链路失效造成拓扑分割或网络瘫痪,水声传感器网络拓扑演化及修复机理至关重要。《水声传感器网络拓扑》一书,立足于我国水声传感器网络建设现状,在总结现有拓扑理论和工程实践的基础上,整理出构建拓扑理论的总体框架,并从拓扑生成、移动建模、拓扑愈合、路由转发、拓扑优化等五个维度,对网络拓扑的连通特性和覆盖特性等问题进行了研究,为水声传感器网络拓扑建设提供了理论与技术指导。

我有幸在第一时间通读了这本专著,受益匪浅。总的来说,全书结构清晰,深入浅出,专业术语使用规范,参考文献丰富。作者及其科研团队长期从事水声传感器网络拓扑领域的科研和设计工作,取得了多项科研成果。本书的出版,是他们多年实践经验的总结和理论的升华。它不仅对水声传感器网络拓扑领域的研究人员具有示范及指导作用,也有助于无线网络、传感器网络的本科生和研究生拓展领域知识。

中国工程院院士

戴 洪

2016 年 12 月

Foreword

前言

近年来,海洋环境监测、海洋资源开发和海洋权益维护都对水声传感网建设和发展提出了一系列的迫切需求。目前,水声传感网在海洋水文数据收集、海洋资源勘测、海水污染监测、海洋灾害预警、船舶辅助导航和军事水下监视等领域具有重要的应用价值,并成为世界各国的研究热点。我国正在制定海洋强国战略,以水声传感网为重要组成部分的海洋环境监测技术已列入国家中长期科技发展纲要,凸显了该领域研究强烈的必要性和紧迫性。作者及其团队按照国家海洋战略发展要求,总结分析了近年来的海洋拓扑构建实践经验,吸纳了水声传感器网络拓扑建设已有成果,参阅了大量翔实的文献资料,浓缩提炼形成本书。

本书立足当前水声传感器网络拓扑建设基础,基于源于实践、高于实践的原则,对水声传感器网络拓扑建设的基本概念、生成方法、移动建模、愈合算法、路由协议、优化策略进行理论分析与实验验证。全书共分为6个章节:

第1章首先从水声传感器网络的基本概念和内涵出发,介绍了水声传感器网络体系结构及面临的挑战,并对影响水声传感器网络研究的一系列不确定性因素进行了介绍,归纳阐述了相关国内外研究现状,为本书后续章节的研究提供了理论支撑。

第2章对水声传感器网络拓扑生成进行了较为详细的阐述。本章首先从传感器节点均匀部署和非均匀部署两方面对水声传感器网络拓扑生成方法进行了分析阐述,随后分别探讨了传感器节点和自主式航行器节点的部署算法,最后通过实验仿真验证了方法的合理性和有效性,为后续拓扑愈合与优化章节的研究奠定了基础。

第3章重点介绍了水声传感器网络移动模型的构建,设计了水下实体移动模型,及自主式航行器节点的运动模型,以降低因自主式航行器节点运动模式的不确定性对网络性能带来的影响。

第4章系统介绍了水声传感器网络拓扑愈合算法,分别提出了基于冗余节点的拓扑修复算法和基于自主式航行器的愈合算法,其针对水下实体移动及节点能量耗尽引起的拓扑失效,能够通过系统的失效感知机制发现并通知相应冗余节点或自主式航行器节点实施快速愈合,极大地提高了网络的可靠性。

第5章结合前期构建的网络拓扑结构,重点分析了网络路由选径问题,提出了基于优化机制的多跳通信方法、基于自主式航行器节点的数据平衡传输算法和基于位置和方向的优先级路由方法,系统地阐述了路由协议设计方案,确保网络生命周期的最大化。

第6章在前期拓扑构建基础上,阐述了拓扑优化的概念与方法。本章提出了鱼群启发的水声传感器网络优化策略,并综合考虑网络连通性、抗毁性、能耗和覆盖度等方面,进一步提出基于复合自主式航行器的拓扑优化机制。研究成果可推动水声传感器网络在海洋监测、军事水下侦察和船舶辅助导航等重要领域的广泛应用,具有一定的理论研究价值和应用推广前景。

本书在编写过程中,力求能够较系统地梳理、凝炼国内外学者的多个水声传感器网络拓扑共识的理论与实践成果,为该领域的科研工作者提供借鉴和指导,为从事海洋科技工作的技术人员提供启发和帮助。力求按照人类思维的自然逻辑谋篇布局,努力做到行文流畅、由浅入深、通俗易懂,以期让各类读者都能清晰地了解水声传感器网络拓扑理论的科学内涵。

水声传感器网络拓扑发展及其应用方兴未艾,拓扑建设的探索与实践尚处于发展阶段。受作者水平所限,对一些问题的阐述可能不够准确,有失偏颇,书中难免会存在不足和疏漏之处,敬请广大读者朋友批评斧正。

本书的出版得到江苏省自然科学基金(BK20140065、BK20150721、BK20161469);中国博士后基金(2015M582786、2016T91017);2015年度江苏省重点研发计划(BE2015728);2014年江苏省科技基础设施建设计划(BM2014391)等项目的资助。同时,感谢孙康、关惠仁对本书文字的编排。最后特别感谢戴浩院士,他以严谨的学术态度认真审阅了书稿,提出了细致且有建设性的指导意见,使本书增色不少。

作者

2016年12月

目录

第1章 水声传感器网络概述

1.1 水声传感器网络概述	1
1.1.1 水声通信对 UASNs 的影响	2
1.1.2 UASNs 体系结构	3
1.1.3 UASNs 面临的挑战	4
1.2 水声传感器网络拓扑的研究现状与发展	5
1.2.1 国外研究现状	5
1.2.2 国内研究现状	7
1.3 UASNs 不确定因素分析	9
1.3.1 拓扑动态结构的不确定性	10
1.3.2 干扰条件下声通信质量的不确定性	10
1.3.3 自主式水下航行器运动模式的不确定性	12
1.3.4 数据传输寻径的不确定性	13
1.3.5 其他不确定性因素	14
1.4 本章小结	16
参考文献	16

第2章 水声传感器网络拓扑生成研究

2.1 UASNs 拓扑生成方法	23
2.1.1 节点均匀部署的拓扑生成方法	24

2.1.2 节点非均匀部署的拓扑生成方法	25
2.2 基于通信量的传感器节点部署策略	26
2.2.1 系统模型	26
2.2.2 算法设计	28
2.2.3 仿真与分析	32
2.3 鱼群启发的 AUVs 部署方案	37
2.3.1 问题描述	38
2.3.2 算法设计	39
2.3.3 仿真与分析	43
2.4 本章总结	47
参考文献	48

第3章 水声传感器网络拓扑移动建模研究

3.1 移动建模方法概述	50
3.2 水下实体移动建模	52
3.2.1 模型概述	52
3.2.2 仿真与分析	53
3.3 鱼群启发的 AUVs 运动模式不确定性建模	56
3.3.1 问题描述与模型建立	56
3.3.2 鱼群启发的排斥运动	63
3.3.3 仿真与分析	65
3.4 本章小结	70
参考文献	71

第4章 水声传感器网络拓扑愈合研究

4.1 拓扑愈合方法概述	73
4.2 基于随机游走机制的愈合算法	75

4.2.1	模型构建	75
4.2.2	算法设计	77
4.2.3	仿真与分析	80
4.3	基于冗余节点修复的 UASNs 愈合算法	82
4.3.1	预备工作	83
4.3.2	算法设计	85
4.3.3	仿真与分析	89
4.4	基于 AUVs 的 UASNs 愈合算法	92
4.4.1	模型建立及问题描述	92
4.4.2	算法设计	95
4.4.3	仿真与分析	102
4.5	本章小结	107
	参考文献	107

第 5 章 水声传感器网络路由转发研究

5.1	路由转发方法概述	110
5.2	基于优化机制的 UASNs 多跳通信方法	112
5.2.1	问题描述	112
5.2.2	模型建立	114
5.2.3	算法设计	115
5.2.4	仿真与分析	116
5.3	基于 AUV 节点的数据平衡传输算法	119
5.3.1	算法设计	120
5.3.2	仿真与分析	123
5.4	基于位置和方向的优先级路由方法	125
5.4.1	算法设计	125
5.4.2	仿真与分析	127
5.5	本章小结	130

参考文献	130
------------	-----

第 6 章 水声传感器网络拓扑优化研究

6.1 拓扑优化方法概述	133
6.2 鱼群启发的 UASNs 优化策略	135
6.2.1 网络模型及问题描述	135
6.2.2 算法设计	136
6.2.3 仿真与分析	138
6.3 基于复合 AUVs 的水声传感器网络拓扑优化机制	142
6.3.1 网络模型及问题描述	142
6.3.2 算法设计	143
6.3.3 仿真与分析	147
6.4 本章小结	151
参考文献	151

第1章 水声传感器网络概述

无线传感器网络代表了一种新的远程监控技术。在近几年,随着传感器技术的迅猛发展,无线传感器网络已被引入水下环境监测领域,作为该领域一项新兴技术,有着巨大的发展潜力。应用于水下的无线传感器网络主要通过声波通信,且会受水流影响发生动态变化,可能成为具备自主移动能力的高智能传感器。因此,可将这种网络称为水声传感器网络(Underwater Acoustic Sensor Networks, UASNs)^[1-2]。UASNs 能够对水下环境进行实时、精确、有效的监控,在水下军事目标监视、海洋数据收集、水质监测、海底矿产资源探测等领域都有着非常广泛的应用前景,吸引了越来越多研究人员的目光。

水声技术的广泛应用,使得 UASNs 中的不确定性因素的研究更加受到重视。声信号在水中的快速衰减,极大地影响了节点的有效通信半径;水下洋流及生物运动,造成传感器节点位置信息时刻变化;环境的多变提升了任务的复杂性,导致更多数量的传感器节点以更大的能耗为代价维持网络性能的稳定。因此,为构建可靠的网络移动模型,首先需要解决的问题是探索影响 UASNs 性能的各类不确定性因素。

本章首先阐述了 UASNs 体系结构及其面临的挑战;在此基础上,归纳了当前国内外对 UASNs 的研究现状;最后,着重分析了 UASNs 不确定性因素产生的原因及影响,指明了未来的发展方向。

1.1 水声传感器网络概述

传统的无线传感器网络一般部署在陆地上,具有以下特点:一是由于网

络部署区域的高度远远小于长度和宽度,一般情况下将其网络拓扑看作二维进行研究;二是在地面上部署无线传感器网络,传感器节点位置相对固定,网络拓扑不具备动态演化性,在研究其网络拓扑时不需考虑节点受外力作用产生移动这个因素;三是传感器节点在陆地上一般采用电磁波进行通信,其通信带宽、时延和误码率等性能指标比水下传感器节点间通信性能要好很多。

而对于 UASNs 来说,以上三个特点并不适用,它在很多方面与传统的无线传感器网络存在差异^[3-4],要对水声传感器网络进行深入研究,首先必须准确掌握水声通信对网络特性的影响。

1.1.1 水声通信对 UASNs 的影响

(1) 水声通信会受船舶航行产生的环境噪声等物理属性和水介质密度、温度、盐碱度等化学属性的影响;另外,水声信道的多普勒效应也会使声信道产生时-空变化,影响通信性能的稳定,为水下传感器组网及网络拓扑性能维持增加了难度。

(2) 水声通信的高时延特性严重影响了 UASNs 网络的通信效率,由于水下传感器节点携带能量有限,并且很难进行二次补给,因此,一般通过设计高效、合理的路由算法来降低 UASNs 通信能耗,可将 UASNs 看作一个多跳网络,当信息经过多跳路径从源节点传输到目的节点时,通信能耗会大幅度减小^[5]。但是,多跳网络的局限性在于等待、传播、处理等各类时延,而水声通信本身带来的时延就比较高,在研究 UASNs 组网时必须仔细考虑。

(3) 采用水声通信方式,其通信信道会产生路径损耗,节点发射功率受收发节点信号频率和距离长短的影响,损耗随频率、距离的增长而提高,带宽也会受到严格限制。UASNs 网络连通性与可承受跳数相关,当节点密度太小时,网络连通性会因覆盖范围受到影响;当节点密度太大时,网络连通性又会因干扰受到影响。因此,为了既能达到一定的覆盖范围又能保证网络连通性,节点密度范围的设置应依赖于节点发射功率和

工作频率的选取。

(4) 介质访问控制(Medium Access Control, MAC)协议作为水声通信系统链路层的一项重要协议,是 UASNs 的一项关键技术。其主要实现对共享信道接入的控制,从而确保 UASNs 高效通信。适用于水下通信环境的 MAC 协议,作为 UASNs 通信系统的底层结构,确保了通信链路的存在,为 UASNs 拓扑生成提供了通信保证。它将有限的水声信道资源分配给水下传感器节点,使传感器节点间能够占用水声信道进行通信,并确保节点对信道资源的公平竞争,从而构成网络。并且使 UASNs 能量耗费、信道时延尽可能得到降低,使网络吞吐量得到提高。因此,MAC 协议是生成并维护 UASNs 网络拓扑的基础协议。

1.1.2 UASNs 体系结构

不同的海洋环境及应用需求,对 UASNs 体系结构也提出了不同要求。Akyildiz 等^[5]在分析多种海洋应用后,最早提出并展现了二维静态水声传感器网络和三维静态水声传感器网络两种体系结构。这两种结构中节点均不能随意移动,要么被固定在海底,要么被锚定在水中,只能监测节点周围的信息,无法适应复杂多变的海洋环境,实现空间大规模的覆盖。Melike^[6]利用可自由浮动的传感器节点组成网络,并设计了浮动节点的运动方式 DNR(Dive“N”Rise)。它的优点是结构灵活,由于能够随洋流的运动而运动,所以相较于锚定节点组网结构,它覆盖的空间更大,缺点是对于硬件的要求较高。为了更好地实现三维监测,研究者们利用 AUVs 节点组成水声传感器网络。节点携带有 GPS,可以准确知道自己的位置信息,有较高的计算能力且能够分析水流速度,根据网络需求变化调整自己的位置与运动速度,结构比较灵活,但成本太高,不适合大面积部署。

经过对上述研究成果的归纳与分析,综合多种水下传感器节点,按其位置的不同,本节将 UASNs 的体系结构分为如下 3 层:水面监测层、水中监测层和水底监测层,如图 1-1 所示。该体系结构融合了海底有线传感器节点、声通信无线传感器节点、锚定传感器节点、自主式水下航行器节点、水面

汇聚节点等多种节点,构建了以声通信为主的互联互通的三维动态体系结构。

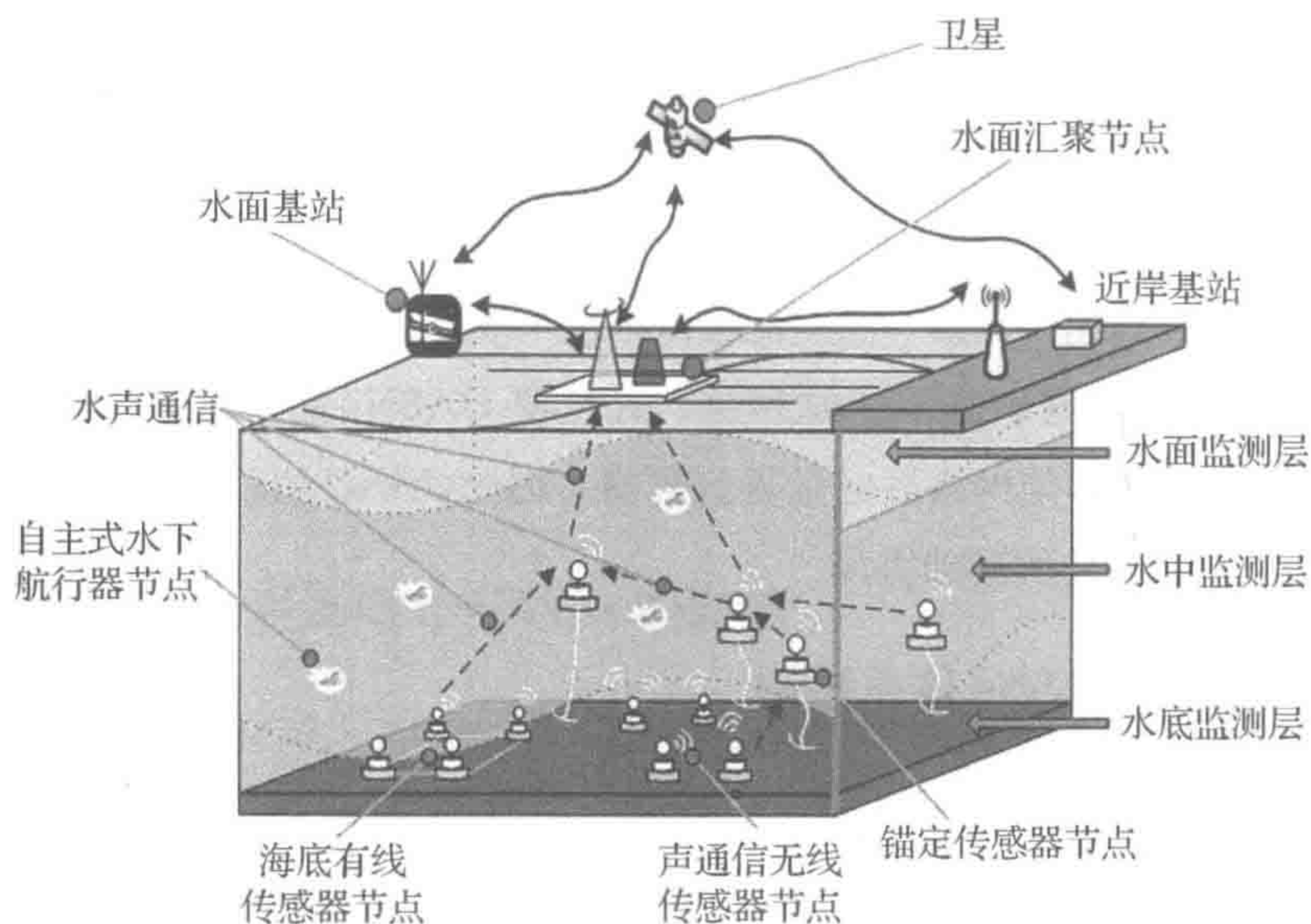


图 1-1 UASNs 体系结构

1.1.3 UASNs 面临的挑战

目前,陆地上的无线自组网和传感器网络已经取得较为丰硕的研究成果。但相关成果并不能很好地应用在水下环境中,UASNs 的发展仍面临着诸多挑战。

1. 通信速度慢且质量较低

声信道比无线电信道的传播速率要低 5 个数量级^[7]。较长的传播时延大大减小了系统的吞吐率。水声信道中衰减严重,传输距离短,采用多路径传输后,还会面临由波阵面的扩展引起声能的扩散,导致高错误率和高丢包率。而水中的人为噪声、环境噪声和多普勒频移进一步降低了水声信道的通信质量。

2. 节点能耗大且能量有限

水下传感器节点为完成感知与探测任务,通常含有多个感知单元,用于实时监测海域的温度、盐度、水质、压力等信息。除此之外,在执行特殊任务时,需要感知更多的化学物质(如甲烷气体、硫酸盐等)信息,无疑增加了节点的工作负担。由于声信号较无线信号的处理更为复杂,因此对节点能量提出了更高要求。同时,水下节点部署后很难再更换电池或补充能量,因此能量十分有限,一旦耗尽,会影响网络性能,甚至造成网络瘫痪。

3. 拓扑易受损且恢复困难

洋流运动、海风扰动、水下生物触动等一系列的影响容易造成水下传感器节点的位置迁移,使得通信链路易发生变化,增加了局部网络失效的可能性,拓扑易受损。且除 AUVs 外,传感器节点无法自主调控自身位置,被迫迁移后的节点很难快速回至原始位置。目前,大部分失效拓扑主要靠 AUVs 节点进行修复^[8],虽然能够暂时弥补受损拓扑,但是由于 AUVs 节点造价高,水下部署数量有限,此方法并不是维持网络整体性能的长久之计。

4. 应用领域广且任务繁复

水下传感器节点随机散落在既定目标区域,各司其职,相互之间互联互通,并伴有少量 AUVs 节点自主移动维护网络稳定。具备自组织能力的 UASNs 在海洋数据采集、环境监测、海底资源勘探、灾难预警、辅助导航等多个应用领域起到至关重要的作用。因此,UASNs 的任务十分繁重,经常需要同时执行多个应用,而按需切换应用的随机性,增加了 UASNs 执行任务的复杂程度。

1.2 水声传感器网络拓扑的研究现状与发展

1.2.1 国外研究现状

早在 20 世纪 50 年代,美国就在太平洋和大西洋中耗巨资建设了庞大

的水声监视系统(SOSUS),该系统于1991年在美国太平洋海洋环境实验室的 VENTS 计划中进行海洋环境的持续监测;1993年,美国海洋研究署和麻省理工学院最早提出了水下声学网络应用概念,联合开发了一个以自主式水下航行器 AUVs 作为移动传感器平台的智能水下采集网络——自主海洋采样网(AOSNs);1999—2004年美国海军研究办公室的 Seaweb 计划^[9],是美国比较成功的水下网络计划。美国多所大学成立了课题组专门进行水下传感器网络相关研究,1994年美国麻省理工学院机器人实验室成功研制出世界上第一条真正意义上采用仿生推进系统的机器金枪鱼,此后出现了许多采用仿生推进系统的水下移动平台^[10];美国康涅狄格州大学的水下传感器网络实验室(Underwater Sensor Network Lab)对水下传感器网络进行了系统研究^[11];美国南加利福尼亚大学 John Heidemann 研究组提出了密集型水下传感器网络的概念,设计了具有接收信号能量检测和功耗控制功能的水声通信系统^[12]。

欧盟在海洋科学技术项目(MAST)Ⅲ计划的支持下,拓展了一系列水下声通信网络研究的计划和工程,见表1-1。

表 1-1 欧盟水下声通信网络研究计划表

计划名称	研究内容
LOTUS	研究长距离水声通信网络 ^[13]
ROBLINKS	研究浅水域中水声通信网络长距离、高数据率并具有鲁棒性的通信算法 ^[14]
SWAN	研究浅水域中水声通信网络的通信协议算法 ^[15,16]
ESONET	通过海洋观测传感器网络实现海洋多学科、多要素的综合研究

此外,新加坡国立大学对采用水声通信的多机器人交互及水下组网进行了研究,构建了有线网络与无线网络结合、静态节点与自主机器人结合的水下传感网络架构^[17-18]。目前,国外学者在水下无线传感器网络的路由策略和节能效率等方面取得了一定的研究成果^[19-21],并已开发出用于实践验