

文章编号: 1001-0920(2013)12-1761-10

水下移动无线传感器网络拓扑

何明¹, 梁文辉^{1,2}, 陈国华¹, 陈秋丽¹

(1. 解放军理工大学 指挥信息系统学院, 南京 210007; 2. 解放军 61345 部队, 西安 710004)

摘要: 水下移动无线传感器网络是当今世界各国的研究热点之一. 水下复杂环境以及传感器节点移动特性使得水下移动无线传感器网络拓扑具备了动态演化性, 同时, 水声通信也对水下移动无线传感器网络的可靠性产生了一定影响. 首先归纳分析水下移动无线传感器网络国内外的研究现状及进展, 并剖析了水声通信对水下移动无线传感器网络拓扑的影响; 然后凝炼出3个科学问题, 重点论述了拓扑生成、拓扑愈合及拓扑优化; 最后对未来研究方向进行了展望, 以期为该领域的深入研究提供清晰的思路.

关键词: 水下移动无线传感器网络; 水下机器人; 自移动节点

中图分类号: TP29

文献标志码: A

Topology of mobile underwater wireless sensor networks

HE Ming¹, LIANG Wen-hui^{1,2}, CHEN Guo-hua¹, CHEN Qiu-li¹

(1. College of Command Information Systems, PLA Science and Technology University, Nanjing 210007, China; 2. 61345 Armies, PLA, Xi'an 710004, China. Correspondent: HE Ming, E-mail: review_paper@126.com)

Abstract: Mobile underwater wireless sensor networks(MUWSNs) has become a research hotspot all over the world. The complex underwater conditions and the mobility of the underwater sensors make MUWSNs evolve dynamically. On the other hand, the underwater acoustic communication effects the reliability of MUWSNs' topology. Firstly, the research status and progress of MUWSNs are clarified. The impact of the underwater acoustic communication on MUWSNs' topology is analysed. Then three scientific problems of MUWSNs' topology are summarized. And topology generation, self-healing and optimization are analysed emphatically. Finally, the future direction of the research is presented, which provides a clear train of thought for the further research in this field.

Key words: mobile underwater wireless sensor networks(MUWSNs); underwater robots; autonomous underwater vehicle

0 引言

在应用无线传感器网络(WSNs)之前, 一般使用有线网络感知、探测和收集水下数据, 这种方式需要大量的工程技术辅助且代价高昂^[1-2]. 随着无线传感器网络的迅速发展, 以及人类对海洋等水下空间环境应用需求的不断提高, 越来越多的人员投入到对水下传感器网络(UWSNs)的研究, 大量适用于水下环境的传感器节点被布置在监测水域, 节点间通过声通信方式协同工作, 表现出了极高的灵活性. 不足之处在于不能动态组网, 受水流等因素影响容易形成监测盲区或网络失效^[3]. 为了解决这些问题, 水下移动无线传感器网络(MUWSNs)^[4-5]应运而生, 它将水下机器人与水下无线传感器网络紧密结合, 由大量普通节点和自移动节点(AUV)自组织构成水下声通信网络, 为

水下环境监测、海洋数据收集、海底资源开采、污染监控、灾害预测、海难搜救等应用提供了良好的技术手段^[6-8].

我国正在制定海洋强国战略, 以MUWSNs为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. 高可靠、低时延、低能耗的MUWSNs能够满足人们对海洋科学研究、商业开发及水下军事活动日益增长的需求, 因此, 对MUWSNs的研究具有重要的理论价值和应用前景.

目前, 国内外学者越来越关注MUWSNs的研究. 文献[7]采用OSI层次结构对水下无线传感器网络各层的内容进行了详细阐述, 为水下无线传感器网络的研究提供了很好的思路, 但没有将移动节点引入其中; 文献[9]提出了MUWSNs的体系架构,

收稿日期: 2013-03-20; 修回日期: 2013-07-04.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61203192); 江苏省自然科学基金项目(BK2011124, BK2012326, BK2010129).

作者简介: 何明(1978-), 男, 副教授, 博士, 从事传感器网络、信息安全等研究; 梁文辉(1986-), 男, 硕士生, 从事水下移动传感器网络、物联网的研究.

对比分析了 MUWSNs 与常规水下传感器网络的区别,但对节点移动特性以及动态组网方法的阐述较少;文献[10]在文献[7,9]的基础上较为充分地考虑了 MUWSNs 的移动特性,以点、线、面的思路分别从水下节点设计、节点互联和动态组网 3 个层次对 MUWSNs 进行了阐述,但没有涉及网络拓扑愈合与优化;文献[11]从安全方面分析了水下无线传感器网络面临的安全问题,讨论了水下传感器网络安全技术,但同样没有引入移动节点及网络拓扑愈合与优化机制。从目前的研究成果看,对 MUWSNs 的研究多侧重于网络能耗、网络协议和路由算法等,而对网络拓扑的研究尚处于起步阶段。由于 MUWSNs 处在水下三维环境中,其网络拓扑受水下复杂环境的影响而具备了动态演化性,为保证 MUWSNs 的高可靠性和鲁棒性,研究其网络拓扑至关重要。

本文着重对 MUWSNs 网络拓扑进行了系统阐述,对于进一步研究 MUWSNs 拓扑控制算法,构建高可靠性的 MUWSNs 具有重要的指导意义。首先介绍国内外研究现状和进展,分析水声通信对 MUWSNs 网络拓扑的影响;然后提炼出 MUWSNs 网络拓扑急需解决的 3 个科学问题,并分别对其进行详细分析;最后对 MUWSNs 的未来研究方向进行了展望。

1 研究现状及进展

1.1 国外研究现状

早在上世纪 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 计划中进行了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提出的 Seaweb 计划,是美国比较成功的水下网络。另外,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,如:1994 年,美国麻省理工学院机器人实验室成功研制了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^[12-13];美国康涅狄格州大学的 Underwater Sensor Network Lab 对水下传感器网络进行了系统研究^[9];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^[8,14]。

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

表 1 欧盟水下声通信网络研究计划

| 计划名称 | 研究内容 |
|----------|---|
| LOTUS | 长距离水声通信网络 ^[15] |
| ROBLINKS | 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 ^[16] |
| SWAN | 浅水域中水声通信网络的通信协议算法 ^[17-18] |
| 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器网络架构^[19-20]。目前,国外学者主要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研究成果^[21-23],并已开发出用于实践验证的 MUWSNs 测试床^[24-25]。

国外一些长期致力于开发水声组网产品的公司,开发了很多 MUWSNs 组网产品。例如,创办于 1998 年的美国 LinkQuest 公司主要从事海洋电子仪器的研发和制造,该公司基于尖端宽带水声扩频技术研制的 UWM 系列水声 Modem,具有高速水声调制解调功能,主要用于载人潜艇、环境检测、AUV 高速数据链和水声数据上传等水下声学通信领域,在世界各地都有广泛应用。该公司的 TrackLink 系列水声定位产品,是集成了高速水声通信系统的 USBL 跟踪系统,为水下传感器节点的定位提供了有效手段。冰岛 Hafmynd 公司自主研发的水下自治机器人(AUV) GAVIA,具有很好的深水工作能力和超远距离水面通信的能力,能够提高水下移动无线传感器网络的可靠性,增强动态组网能力,可用于军事、科研以及商业等领域,该产品已销往澳大利亚、俄罗斯以及北大西洋公约组织成员国。图 1 是一些常见的 AUV 产品样式。

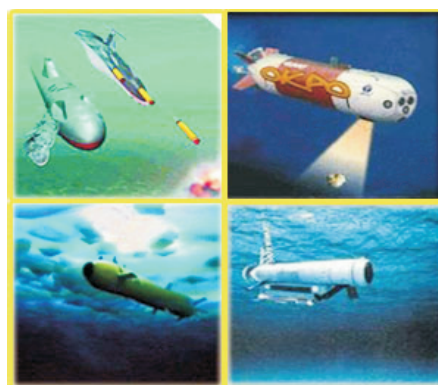


图 1 几种常用的 AUV 节点图示

1.2 国内研究现状

国内对水下传感器网络的研究起步较晚,但目前已有很多机构正在从事该领域的研究,并取得了一定的研究成果(见表 2)。

表 2 国内水下传感器网络研究情况

| 研究单位 | 实验室名称 | 研究内容及成果 |
|----------------|---------------------|---|
| 中国海洋大学 | 物理海洋教育部重点实验室 | OceanSense ^[26] 项目; AUV 水下机器人运动控制系统 |
| 哈尔滨工程大学 | 国家级水声技术重点实验室 | 水声信道仿真; 多频编码; QPSK 调制; 自适应均衡 ^[27-28] |
| 厦门大学 | 水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室 | 基于格型编码调制技术(TCM)的水声通信系统 |
| 香港科技大学 | - | OceanSense ^[26] 项目 |
| 南京大学 | - | 设计了水下声信号的检测模型 |
| 东南大学 | - | 对水声通信网络数据链路传输协议进行了仿真研究 |
| 中国科学院声学所 | - | 多进制相移键控调制解调系统和水下多载波调制通信系统 ^[29-30] |
| 中国科学院自动化所 | - | 水下移动无线传感器网络; 水下多微小型机器鱼群体协作与控制相关研究 ^[31] |
| 中国船舶重工集团 715 所 | - | 亚洲最大的消声水池; 研制了“水下 DGPS 高精度定位系统” |

2006年, 国家自然科学基金将水下移动无线传感器网络列为重大基金项目, 针对传感器节点对水下环境的感知和对监测目标的识别, 重点研究了水下移动传感器节点的设计与运动控制, 水下移动无线传感器网络的通信与信息处理以及拓扑自组织构建与空间分布控制等. 哈尔滨工程大学的蔡绍滨等^[32]提出了水声传感器网络路由算法及其支撑验证系统; 南京邮电大学的刘林峰等^[33]构建了面向海洋监测的无线传感器网络体系结构; 中国人民大学的李德英等申请的 2010 年国家自然科学基金项目对“水下传感器网络设计关键技术”进行了研究; 中国海洋大学的郭忠文等申请的 2011 年国家自然科学基金项目对“水下传感器网络定位算法”进行了研究; 东南大学的李霞等申请的 2011 年国家自然科学基金项目对“基于簇结构的水声通信网络拓扑算法”进行了研究. 这些成果对 MUWSNs 的研究具有很好的指导意义, 但与国外发达国家相比, 国内对 MUWSNs 的研究仍存在很大差距, 主要围绕通信^[34]、网络协议^[35-36]、安全性^[37]、传感器布置^[38-39]、拓扑覆盖^[40-42]等方面所进行的研究以及面向高可靠性的 MUWSNs 拓扑生成、愈合与优化的相关研究尚不完善, 而且国内没有专门致力于生产 MUWSNs 组网产品的公司, 所用到的组网产品基本都是从国外购买, 或由中国科学院声学研究所、西北工业大学航海学院等科研机构自主研发用于实验的产品.

1.3 研究进展

由于水下声学通信的信道带宽低、通信时延高、信号衰减大以及多径效应等因素, 严重影响了无线传感器节点间的通信质量和 MUWSNs 网络可靠性. 为使 MUWSNs 能得到更加广泛的应用, 近几年在水声

通信速率、MAC 层协议以及水下自治机器人(AUV)的研究方面取得了一些进展.

1) 对于水下信号的调制解调, 原有的非相干调制技术受多普勒频散和多径效应影响严重. 在脉冲之间增加一个时间段可以防止干扰, 但会降低通信速率. 相干调制技术虽未增加时间段, 在一定程度上提高了通信速率, 但需采取复杂的信道均衡补偿, 以适应水下通信信道的动态变化. 近几年, 人们对多输入多输出技术(MIMO)^[43]以及正交频分复用(OFDM)技术^[44]进行了研究, 并将其应用于水下信号的调制解调, 使通信速率得到了较大的提高.

2) 根据 OSI 层次结构模型^[7], 数据链路层的 MAC 子层是制约 MUWSNs 网络通信性能的关键环节之一. 通过制定合理的 MAC 协议对有限的水声信道资源进行有效利用, 可以实现在不可靠的通信链路上完成数据的可靠传输. 近几年, 针对水下传感器网络 MAC 协议的研究较为集中, 并取得了一些进展, 如文献[45-47]针对端到端时延、传输误码率、网络吞吐量等性能指标对原有的 MAC 层 ALOHA、CSMA/CA 等协议进行了改进, 使 MUWSNs 网络通信性能得到了一定的提高.

3) 水下自治机器人从上世纪 90 年代中期开始就在海洋勘测及军事领域有所应用, 但由于当时技术水平有限, AUV 在能量携带和耗费、自主移动定位以及下潜深度方面存在很多局限性. 这几年, 各国在 AUV 设计方面有了很大的突破, 目前 AUV 的下潜深度最深可达数千米, 依据不同深度能够提供几种不同的工作模式, 并能够与水面基站进行超远距离通信, 达到完全自治, 易于投放且投放成本较之前降低很多.

2 水声通信对 MUWSNs 网络拓扑的影响

MUWSNs 不同于传统的无线传感器网络^[48-50], 基于应用环境及通信方式的不同, 具有应用环境复杂

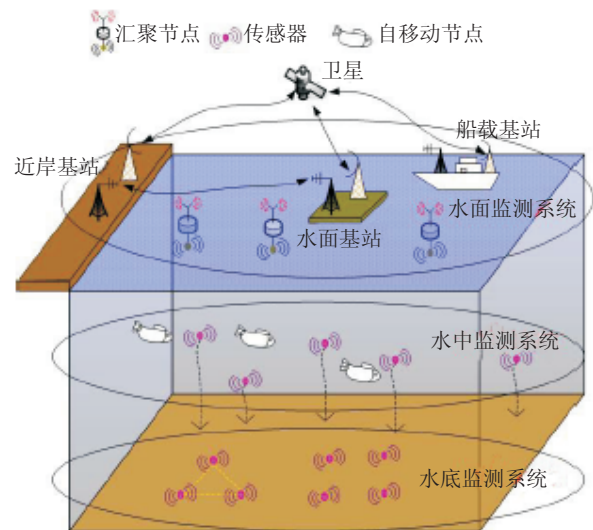


图 2 水下移动无线传感器网络体系结构

性、节点能量有限性、通信方式低效性、网络拓扑动态性等特点. 图 2 为 MUWSNs 通信系统结构, 可分为水底监测系统、水中监测系统和水面监测系统 3 层.

2.1 水下环境的影响

1) 水下环境复杂恶劣, 传感器节点很容易被腐蚀或因污垢而影响其灵敏度, 从而导致传感器节点感知范围及通信范围缩小, 甚至出现节点失效, 影响网络拓扑的连通性, 造成拓扑分割及局部拓扑失效, 而水下环境也不利于对传感器节点进行维护. 因此, 为适应复杂恶劣的水下环境, 水下传感器节点必须更加坚固, 不易损坏.

2) 洋流及水下生物会对 MUWSNs 网络拓扑产生作用力, 使传感器节点位置发生变化, 从而导致 MUWSNs 拓扑动态演化, 可能出现声通信链路时断时通, 局部拓扑失效等现象, 严重影响网络拓扑的可靠性.

2.2 水声通信的影响

1) 水声通信会受水媒介的温度、盐碱度、密度等化学属性和船舶航行所产生的环境噪声等物理属性的影响, 连同水声信道的多普勒效应, 产生声学信道的时-空变化, 使通信性能不稳定, 为水下传感器节点的组网和拓扑稳定性维持增加了难度.

2) 由于水下传感器节点所携带能量有限且能量补给困难, 采用合适的路由算法是降低 MUWSNs 网络节点间通信能耗的主要办法. MUWSNs 也是一种多跳网络, 当信息通过多跳路径从源节点到目的节点传输时, 通信能耗会大幅度减小^[51]. 但是, 多跳网络的局限性在于处理、等待、传播等各类时延, 水声通信的高时延特性为 MUWSNs 网络通信造成了严重影响, 是 MUWSNs 网络组网时必须考虑的问题.

3) 在水声通信系统中, 水声信道具有路径损耗的特点, 功率受收发节点间距离长短和信号频率的影响, 吸收损耗随着频率、距离的增长而增多, 带宽也受到严格限制. MUWSNs 网络连通性与可承受跳数相关, 若节点密度太小, 则网络连通性会因覆盖范围受到影响; 若节点密度太大, 则网络连通性又会因干扰受到影响. 能够支持完全互连的节点密度范围依赖于节点发射功率和工作频率的选取.

2.3 MAC 层协议的重要性

介质访问控制 (MAC) 协议是水声通信系统链路层的一项重要协议, 也是 MUWSNs 的一项关键技术. 主要任务是控制共享信道的接入, 保证 MUWSNs 高效通信, 对 MUWSNs 网络性能会产生较大影响.

适合水下通信环境的 MAC 协议, 为 MUWSNs 网络拓扑的生成提供了通信保证, 确保了通信链路的存

在, 是其通信系统的底层结构. 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, 确保节点对信道资源的公平竞争, 从而构成网络, 并尽可能地降低 MUWSNs 信道时延、能量耗费, 提高网络吞吐量. 因此, MAC 协议是 MUWSNs 拓扑生成的基础协议.

3 MUWSNs 网络拓扑研究内容

MUWSNs 网络拓扑是一个开放性的研究领域, 水下环境的特殊性不仅为传感器节点布放、网络拓扑生成造成很大困难, 而且导致 MUWSNs 拓扑动态演化, 严重地影响了网络的可靠性. 因此, 网络拓扑是 MUWSNs 研究的关键^[52-55].

地面无线传感器网络较 MUWSNs 具有如下特点: 1) 由于网络部署区域的高度远远小于长度和宽度, 一般情况下主要对二维拓扑进行研究; 2) 地面无线传感器网络部署好后节点位置相对固定, 在研究其网络拓扑时不考虑外力作用产生的节点移动; 3) 通信带宽、时延和误码率等网络性能较 MUWSNs 好很多. 因此, MUWSNs 拓扑生成算法要充分考虑洋流和生物对网络拓扑带来的动态演化性, 地面传感器网络的节点随机部署算法无法应用于 MUWSNs; 在水下环境中节点通信能耗大、能量补充及节点更换困难, MUWSNs 的拓扑愈合与优化算法也远比地面传感器网络复杂.

通过以上分析, 提炼出 MUWSNs 网络拓扑亟待研究解决的 3 个科学问题: 如何生成 MUWSNs 三维拓扑结构; 如何愈合 MUWSNs 网络拓扑失效; 如何进行 MUWSNs 网络拓扑优化. 下面分别对这 3 个科学问题进行阐述.

3.1 拓扑生成方法

将传感器投放到在水中形成有效覆盖网络的整个过程称为 MUWSNs 拓扑生成过程. 在这个过程中, 每个节点的初始能耗、节点间的通信链路以及整个网络的覆盖范围已经确定, 对网络覆盖效率和生存时间会产生重要影响. 文献 [56] 在能耗优化方面进行了拓扑控制研究, 但没有考虑节点失效等因素; 文献 [57] 引入类似于 AUV 的特殊节点 Mules 来优化网络拓扑, 试图提高连通性和覆盖率; Pompili 等^[48]对水下传感器节点的三维布置进行研究, 提出 Bottom-grid 算法, Akkaya 等^[58]在该算法的基础上提出 Self-deployment 算法, 通过持续调整节点深度, 进一步减少了相邻节点之间的重复覆盖, 提高了对监测区域的覆盖率, 但这两种算法都需掌握节点全局信息; Golen 等^[59]通过求解极小极大博弈矩阵, 依据水下各子区域内事件发生概率来计算各区域内应分配的节点数, 但该方法并

未涉及具体的节点部署方案. 因此, 如何合理部署传感器节点, 生成 MUWSNs 三维拓扑, 并达到用最少的水下传感器节点对监测区域的无缝覆盖, 是首先要解决的关键问题. 下面从 3 个方面对 MUWSNs 拓扑生成理论进行研究.

3.1.1 定义 MUWSNs 有效覆盖性能评价指标

MUWSNs 拓扑应覆盖所需要的感知范围和通信范围, 然而, 在实际情况中由于水流影响以及声通信的限制, MUWSNs 拓扑有效覆盖范围会产生变化, 从而产生监测盲区. 为此, 应首先制定一套 MUWSNs 有效覆盖性能评价指标, 对 MUWSNs 拓扑生成效能进行评价.

现有的 MUWSNs 有效覆盖性能评价指标采用了连通性、覆盖率等^[60], 但对环境敏感的 MUWSNs 拓扑而言, 环境中任意事件都可能促使网络拓扑发生变化, 影响网络的有效覆盖范围, 因此仅用连通性、覆盖率并不能完全准确地评价 MUWSNs 的网络覆盖性能. 近年来, 学术界用“熵”来度量网络可靠性, 我国学者谭跃进等^[61]引入了网络结构熵的概念, 并将其作为测度网络异构性的指标, 其定义为

$$E = - \sum_{i=1}^n I_i \ln I_i.$$

其中: $I_i = d_i / \sum_{i=1}^n d_i$, d_i 表示第 i 个节点的度. 对于 MUWSNs 拓扑的改变, 当减少网络边时, 新的网络连通可靠性不变或者减弱; 当增加网络边时, 新的网络连通可靠性不变或者增强. 因此, 网络结构熵同样适用于 MUWSNs, 将网络结构熵与网络连通性、覆盖率一起作为 MUWSNs 有效覆盖性能评价指标, 可有效反映 MUWSNs 拓扑生成效能.

3.1.2 建立三维 MUWSNs 网络演化模型

针对 MUWSNs 工作环境的复杂性, 建立水下传感器网络的移动演化模型应综合考虑海浪冲击、洋流以及海水的不规则运动等多种移动因素. 通过采集到的海洋水流数据模拟出的洋流模型来改进传感器节点部署, 利用建模仿真技术研究 MUWSNs 网络演化模型, 预测网络移动演化情况. MUWSNs 网络演化模型主要包括以下 3 个子模型.

1) 节点部署模型. 三维空间覆盖最优部署方式为体心部署, 普通节点采用在垂直方向以锚固定的方式部署, 形成体心立方格结构; 移动节点部署在体心位置, 对移动节点的部署应考虑移动节点移动后的覆盖补偿问题, 即节点移走后邻居节点应迅速覆盖移动节点的原覆盖区域, 同时要考虑能量消耗均衡因素.

2) 节点移动能量消耗模型. 水平移动时节点的能量消耗与节点移动速度、介质密度、移动距离及阻

力等因素相关, 利用洋流模型能够有效降低能耗. 节点在垂直方向的移动可以利用重力和浮力两个有利因素, 从而使节点在垂直方向的移动消耗能量与水平移动不同, 垂直移动消耗能量的计算主要根据节点及网络特性进行计算.

3) AUV 节点移动状态模型. AUV 节点在水下共有 3 种移动状态, 分别是利用水流的随水流运动、重力方向和水平面方向的移动以及 AUV 节点在获得洋流等环境信息后受虚拟力牵引进行移动. 根据 AUV 节点受力情况对移动状态进行建模, 得到 AUV 节点适当的布放位置, 掌握 AUV 节点运动信息, 方便网络拓扑改变时对 AUV 节点的选取, 从而及时调整网络拓扑结构, 保证 MUWSNs 有效覆盖范围.

3.1.3 MUWSNs 三维拓扑生成算法

传感器节点被投放到预定水域后, 利用自身搭载的定位终端完成自身位置的定位, 并回传位置信息到控制中心; 控制中心收到各个传感器节点的平面位置信息后, 根据任务需求利用三维拓扑生成算法确定各个传感器节点需要下潜的深度; 将各个传感器节点需要下潜的深度信息广播给各个传感器节点, 后者收到深度信息后下潜到预定深度. 因此, MUWSNs 三维拓扑生成算法是 MUWSNs 网络拓扑生成的关键. 合理、高效的拓扑生成算法应具有如下特性.

1) 节点移动能耗低. 水下传感器节点所带能量有限, 且不利于进行能量补充, 因此, 在拓扑生成的过程中应尽量降低节点移动产生的能耗, 延长传感器节点寿命.

2) 链路通信延迟小. 由于水声通信带宽等因素的限制, 通信距离较短, 延迟较长, 采用三维拓扑生成算法生成的网络拓扑应尽可能缩短两传感器节点间的通信距离或路由, 降低通信延迟.

3) 覆盖网络效能高. 由于监测覆盖区域是有要求的, 三维拓扑生成算法应采用最少的传感器节点覆盖所有要求的感知范围和通信范围, 不能留有监测死角.

4) 网络拓扑可靠性高. 水下的复杂环境会对 MUWSNs 产生很多影响, 使 MUWSNs 动态变化, 采用三维拓扑生成算法所生成的 MUWSNs 应尽可能具有高可靠性, 能够及时应对网络拓扑发生的改变.

3.2 拓扑愈合机制

MUWSNs 处于复杂环境中, 水流、水下生物触动等各种外力因素的影响很容易使传感器节点位置发生迁移, 从而改变原有网络拓扑, 可能造成局部网络失效, 出现网络分割, 甚至导致网络瘫痪. 因此, 当出现局部拓扑失效时, 如何及时高效地进行拓扑愈合是

MUWSNs 拓扑研究的又一关键问题. 下面分 3 个方面对 MUWSNs 拓扑愈合理论进行研究.

3.2.1 选择最佳网络自愈机制

传统 WSNs 拓扑愈合方法通常采用调整失效区域周围节点的通信功率, 实现路由更新, 愈合网络拓扑. 这种方法并没有改变节点位置, 但调大传感器功率会导致传感器节点能耗增大, 寿命缩短, 而且不能从根本上改善拓扑性质, 因此对于 MUWSNs 而言, 该方法只适用于一些简单的失效情况. 目前, 越来越多的研究是基于 AUV 节点的拓扑愈合^[62]. 由于 MUWSNs 中的 AUV 节点具有移动性, 可以为其设计移动策略, 使它在拓扑发生局部失效时自主迁移到指定位置, 替代失效节点, 完成感知和通信任务, 使网络拓扑快速愈合, 恢复全局连通性. 但是, AUV 节点智能化程度较高、价格昂贵, 且在水下环境中, 其数量及所带能量有限, 所以, 对于一些简单的失效情况仍可采用调大传感器节点功率的方式进行拓扑愈合. 为此, 在网络失效时, 必须根据节点和环境的具体情况选择最佳的网络自愈机制.

3.2.2 AUV 节点的位置选择算法

传感器节点或链路失效后, 拓扑结构可能不再满足全局连通性, 若采用 AUV 节点进行拓扑愈合, 则应由 AUV 节点取代失效节点, 与其邻居节点连接, 从而愈合拓扑. 但是, AUV 节点愈合位置的选择至关重要, 不仅要愈合失效网络, 还要降低局部拓扑的通信时延和能耗. 因此, 不能简单地将 AUV 节点迁移至失效节点原来位置, 而要选取通信时延和能耗更优的位置, 为此, AUV 节点的位置选择算法是 MUWSNs 拓扑愈合的关键. 目前, 有关 AUV 节点位置选择算法的研究还比较少, 大多侧重于对 AUV 节点的设计^[63-64]. 文献 [65] 给出了一种基于满 Steiner 树问题的水下无线传感器网络拓扑愈合算法, 为选择最优的 AUV 节点移动位置, 将此问题转化成求解斯坦纳最小树问题. 但是, 在三维水下环境中, 存在节点信号覆盖范围为不规则图形等复杂情况, 此时斯坦纳最小树问题难以获得解析解. 文献 [66] 提出了一种近似的拓扑愈合算法 TCS-CA, 通过恢复失效节点的单跳邻居间可达性来实现拓扑的自愈, 这种方法未引入 AUV 节点, 在水下环境并不适用.

3.2.3 AUV 节点移动作用力

通过 AUV 节点位置选择算法计算出迁移位置后, 采用什么样的方式促使 AUV 节点能够移动到准确位置, 并尽可能减少运动中的能耗, 这是要解决的另一个重要问题. 由于水下环境会对 AUV 节点产生多个作用力, 例如重力、浮力、水流产生的力和节点间的引

力等, 合理利用这些作用力间的关系形成对 AUV 节点的合力, 促使 AUV 节点在这些力的作用下耗费最少的能耗到达迁移位置. 文献 [67] 提出了 4 种虚拟力, AUV 节点在 4 种虚拟力的作用下迁移至拓扑失效位置, 文中所涉及的虚拟力理论上能够求解, 但在实际环境中计算难度较大. 水下环境中节点能耗补给困难, 合理的驱动力是 AUV 节点节省能耗、延长寿命的关键.

3.3 拓扑优化策略

拓扑优化是指在确保网络覆盖整个监测区域的同时, 网络通信时延、能耗达到最小, 且具有很强的抗毁性和鲁棒性. 对于传统的无线传感器网络而言, 已有很多的拓扑优化算法, 文献 [68] 针对地面传感器网络中感知节点分布优化问题, 给出了一种量子遗传算法; 文献 [69] 给出了一种基于概率测量模型的粒子群优化策略, 提高了网络有效覆盖率; 文献 [70] 考虑节点的移动性给出了一种基于并行粒子群算法的优化策略; 文献 [71] 针对无线传感器网络的特点, 建立了基于带宽约束的能量和时延多目标优化模型, 提出了一种改进的理想点多目标优化路由选择算法. 这些拓扑优化策略主要用于传统的地面传感器网络, 对于三维水下环境并不适用. MUWSNs 拓扑优化是一个 NP 问题, 目前研究成果仍比较少.

MUWSNs 受水下复杂环境的影响, 网络拓扑会经常发生变化, 通信时延和能耗也会受到很大的影响. 为保证 MUWSNs 的高效能和高可靠性, 必须进行拓扑优化. 拓扑优化触发方式可分为两种: 事件触发优化和预防性优化.

1) 事件触发优化是指监测到 MUWSNs 拓扑发生改变或产生拓扑失效时, 触发优化算法开始对网络拓扑进行优化. 这种优化方式与拓扑愈合策略结合应用, 大多采用通过局部优化来实现全局优化的近似优化算法, 在网络节点失效造成拓扑改变的情况下, 愈合算法修复失效局部网络, 同时进行拓扑优化. 由于这种优化方式建立在发现网络拓扑改变才触发, 时效性相对较低.

2) 预防性优化是指不论 MUWSNs 拓扑是否发生变化, 定期采取优化策略对网络拓扑进行优化. MUWSNs 中存在很多关键节点, 这些关键节点的度数相对较大, 若这些节点发生故障会给整个网络带来很大的麻烦, 甚至导致整个网络瘫痪, 因此, 避免这些节点长期存在是提高 MUWSNs 网络可靠性和抗毁性的关键因素. 采用预防性优化方式, 通过改变路由, 定期对 MUWSNs 中关键节点进行变换, 减少关键节点的固定性和长期存在性, 能在很大程度上优化 MUWSNs 网络效能. 预防性优化能够保证网络实时

连通,但属于全局优化策略,需要掌握大量的网络信息,会耗费很多的网络资源。

4 未来研究展望

MUWSNs 具有重要的应用价值,也是物联网水下感知的一种典型样式^[72],已列入世界各国的发展战略,成为世界范围的研究热点。随着水下重点领域应用的不断深入^[73],未来还需在以下几个方面进行深入研究。

1) 由于实际中 MUWSNs 所部属的环境复杂,监测区域和节点信号覆盖范围很可能是不规则的空间区域,在研究 MUWSNs 拓扑生成方法时应尽可能与实际部署环境相结合,以保证研究成果具有更高的应用价值。

2) 洋流使 MUWSNs 具备了动态演化性,为了更准确地模拟传感器节点的移动性,需对其所处环境的洋流模型进行研究。虽然目前已有一些有关洋流模型的研究成果^[50],但这些模型没有考虑节点的移动对其他节点产生的影响。在现实情况下, MUWSNs 中某一节点随洋流发生移动必然导致相邻节点原有的路径受到影响,因此应进一步研究更符合现实环境的洋流模型。

3) 深入研究 MUWSNs 拓扑愈合优化算法,提高 MUWSNs 网络可靠性。目前已有算法均在理论上存在很多假设前提,例如文献 [65] 就提出了汇聚节点能量为正无穷等 6 个假设,文献 [67] 也提出了节点在交换信息时能准确获知彼此方向的假设。这些都与实际应用场景有区别,应尽可能研究基于一般环境下的 MUWSNs 拓扑愈合优化算法。

4) 对仿真平台进行研究。由于 MUWSNs 海上试验在资金与工程量上耗费巨大,仿真方法已成为验证算法性能的主要手段。目前用来仿真无线传感器网络的主要有 OPNET、OMNET++ 和 NS2 等软件,但对于 MUWSNs 的研究才刚刚兴起,信道模型和洋流模型很缺乏,AUV 节点模型也缺乏支持现有仿真软件的接口,因此需要进一步研究适合 OPNET、OMNET++ 和 NS2 等仿真平台的模型,以便更好地对 MUWSNs 研究成果进行验证。

5 结 论

MUWSNs 研究正处于发展阶段,本文首先在归纳阐述 MUWSNs 国内外研究现状及进展的基础上,分析了水下复杂环境及水声通信对 MUWSNs 网络拓扑的影响;然后从拓扑生成、拓扑愈合、拓扑优化 3 个方面重点对 MUWSNs 网络拓扑进行了详细分析;最后展望了未来研究方向,以期为 MUWSNs 的进一步研究提供思路。MUWSNs 具有非常广阔的应用前景,

将在科研、商业以及军事领域发挥重要作用。

参考文献(References)

- [1] Jaffe J, Schurgers C. Sensor networks of freely drifting autonomous underwater explorers[C]. Proc of the 1st ACM Int Workshop on Underwater Networks. New York: ACM, 2006: 93-96.
- [2] Cayirci E, Tezcan H, Dogan Y, et al. Wireless sensor networks for underwater surveillance systems[J]. Ad Hoc Networks, 2006, 4(4): 431-446.
- [3] Partan J, Kurose J, Levine B N. A survey of practical issues in underwater networks[C]. Proc of the 1st ACM Int Workshop on Underwater Networks. New York: ACM, 2006: 17-24.
- [4] Casari P, Zorzi M. Protocol design issues in underwater acoustic networks[J]. Computer Communications, 2011, 1(34): 2013-2025.
- [5] Shusta J. Acoustic network architecture[C]. Proc of the 5th ACM Int Workshop on Underwater Networks(WUWNet). Woods Hole: ACM, 2010: 28-34.
- [6] Cui Jun-hong, Kong Jiejun, Mario Gerla, et al. Challenges: Building scalable and distributed underwater wireless sensor networks(UWSNs) for aquatic applications[J]. IEEE Network, Special Issue on Wireless Sensor Networking, 2006, 20(2): 12-18.
- [7] Akyildiz I F, Pompili D, Melodia T. Underwater acoustic sensor networks: Research challenges[J]. Ad Hoc Networks, 2005, 3(3): 257-279.
- [8] Heideman J, Ye W, Wills J, et al. Research challenges and applications for underwater sensor networking[C]. Proc of the Wireless Communications and Networking Conf. Las Vegas, 2006, 1: 228-235.
- [9] Jun-hong Cui, Jiejun Kong, Mario Gerla, et al. Challenges: Building scalable mobile underwater wireless sensor networks for aquatic applications[J]. IEEE Network, Special Issue on Wireless Sensor Networking, 2006, 20(3): 12-18.
- [10] 吕超,王硕,谭民.水下移动无线传感器网络研究综述[J].控制与决策,2009,24(6):801-812.
(Lv C, Wang S, Tan M. Survey on mobile underwater wireless sensor networks[J]. Control and Decision, 2009, 24(6): 801-812.)
- [11] 魏志强,杨光,丛艳平.水下传感器网络安全研究[J].计算机学报,2012,35(8):1594-1606.
(Wei Z Q, Yang G, Cong Y P. Security of underwater sensor networks[J]. Chinese J of Computers, 2012, 35(8): 1594-1606.)
- [12] Ayers J. Underwater walking[J]. Arthropod Structure and Development, 2004, 33(3): 347-360.

- [13] Lu F, Mirza D, Schurgers C. 2010 D-sync doppler-based time synchronization for mobile underwater sensor networks[C]. Proc of the 5th ACM Int Workshop on Underwater Networks(WUWNet). Woods Hole, 2010, 3: 1-3.
- [14] Jack Wills, Wei Ye, John Heidemann. Low-power acoustic modem for dense underwater sensor networks[C]. Proc of the 1st ACM Int Workshop on Underwater Networks. Los Angeles, 2006: 79-85.
- [15] Baosheng Li, Shengli Zhou, Stojanovic M, et al. Multi-carrier communication over underwater acoustic channels with non-uniform doppler shifts[J]. IEEE J of Oceanic Engineering, 2008, 33(2): 198-209.
- [16] Lanbo Liu, Shengli Zhou, Jun-hong Cui. Prospects and problems of wireless communications for underwater sensor networks[J]. Wireless Communication and Mobile Computing, 2008, 8(8): 977-994.
- [17] Pen Xie, Jun-hong Cui. R-MAC: An energy-efficient MAC Protocol for underwater sensor networks[C]. Proc of Int Conf on Wireless Algorithms, Systems, and Application. Chicago, 2007: 187-198.
- [18] Ruzzelli A G, O'Hare G, Jurdak. MERLIN R: Cross-layer integration of MAC and routing for low duty-cycle sensor networks[J]. Ad Hoc Networks, 2008, 6(8): 1238-1257.
- [19] Winston K G Seah, Hwee-Xian Tan, Zheng Liu, et al. Multiple-UUV approach for enhancing connectivity in underwater ad-hoc sensor networks[C]. OCEANS 2005 MTS/IEEE. Washington, 2005: 2263-2268.
- [20] Winston K G Seah, Hwee-Xian Tan. Multipath virtual sink architecture for underwater sensor networks[C]. OCEANS 2006-Asia Pacific. Singapore, 2006: 1-6.
- [21] Hwee-Pink Tana, Roe Diamant, Winston K G Seah, et al. A survey of techniques and challenges in underwater localization[J]. Ocean Engineering, 2011, 38(14): 1663-1676.
- [22] Melike Erol-Kantarci, Hussein T Mouftah, Sema Oktug. A survey of architectures and localization techniques for underwater acoustic sensor networks[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials—COMSUR, 2011, 13(3): 487-502.
- [23] Antonio Sanchez, Sara Blanc, Pedro Yuste, et al. Advanced acoustic wake-up system for underwater sensor networks[J]. Communications in Information Science and Management Engineering, 2012, 2(2): 1-10.
- [24] Goodney A, Cho Y, Heidemann J, et al. 2010 an underwater communication and sensing testbed in marina del Rey(posters abstract)[C]. Proc of the 5th ACM Int Workshop on Underwater Networks(WUWNet). Woods Hole, 2010: 514-516.
- [25] Abdulrahman Alkandari, Meshal Alnasheet, Yousef Alabduljader. Wireless sensor network(WSN) for water monitoring system: Case study of Kuwait beaches[J]. Int J of Digital Information and Wireless Communications (IJDIWC), 2011, 1(4): 709-717.
- [26] Liu K, Yang Z, Li M, et al. Oceansense: Monitoring the sea with wireless sensor networks[J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2010, 14(2): 7-9.
- [27] 孙桂芝. 水声通信网络路由协议研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学水声工程学院, 2006.
(Sun G Z. Research on routing protocol of underwater acoustic networks[D]. Harbin: College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, 2006.)
- [28] 孙桂芝, 桑恩方, 王开玉. 水声通信网数据链路层协议仿真研究[J]. 声学技术, 2006, 25(2): 150-153.
(Sun G Z, Sang E F, Wang K Y. The protocol simulation of data link layer of underwater acoustic networks[J]. J of Acoustic Technology, 2006, 25(2): 150-153.)
- [29] 蔡慧智, 刘云涛. 水声通信及其研究进展[J]. 物理, 2006, 35(12): 1038-1043.
(Cai H Z, Liu Y T. Research improvement of underwater acoustic communication[J]. J of Physics, 2006, 35(12): 1038-1043.)
- [30] 李淑秋, 李启虎, 张春华. 水下声学传感器网络的发展和应用[J]. 物理, 2006, 35(11): 945-952.
(Li S Q, Li Q H, Zhang C H. Improvement and applications of underwater acoustic sensor networks[J]. J of Physics, 2006, 35(11): 945-952.)
- [31] Shen Zhizhong, Wang Shuo, Tan Min, et al. Robot fish-based underwater mobile sensor networks for environmental monitoring[C]. Proc of the 15th Int Offshore and Polar Engineering Conf. Piscataway: IEEE, 2005: 11-15.
- [32] 蔡绍滨, 李希, 田鹰, 等. 基于圆形选择技术的循环三边组合测量法的研究[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(2): 238-244.
(Cai S B, Li X, Tian Y, et al. Alternating combination triangulation based on circle-selection[J]. J of Computer Research and Development, 2010, 47(2): 238-244.)
- [33] 刘林峰, 刘业. 面向海洋场景的无线传感器网络体系结构模型研究[J]. 计算机科学, 2010, 37(10): 74-77.
(Liu L F, Liu Y. Research on wireless sensor network architecture model in ocean scene[J]. Computer Science, 2010, 37(10): 74-77.)
- [34] Junfeng Xu, Keqiu Li, Geyong Min. Reliable and energy-efficient multipath communications in underwater sensor

- networks[J]. *IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems*, 2012, 23(7): 1326-1335.
- [35] Zeng Bin, Zhong De-Huan, Yao Lu. Research of underwater mobile sensor network algorithm based on water flow[J]. *Application Research of Computers*, 2010, 27(10): 3926-3928.
- [36] Xie Peng, Cui Jun-hong. An FEC-based reliable data transport protocol for underwater sensor networks[C]. *Proc of the 16th Int Conf on Computer Communication and Networks*. Piscataway: IEEE, 2007: 747-753.
- [37] Lopez Javier, Roman Rodrigo, Alcaraz Cristina. Analysis of security threats, requirement, technologies and standards in wireless sensor networks[C]. *Foundations of Security Analysis and Design V*. Berlin: Springer-Verlag, 2009: 289-338.
- [38] Xia N, Vu K, Zheng R. Sensor placement for minimum exposure in distributed active sensing networks[C]. *Proc of the IEEE Global Telecommunications Conf*. Miami: IEEE, 2010: 1-6.
- [39] 夏娜, 王长生, 郑榕, 等. 鱼群启发的水下传感器节点布置[J]. *自动化学报*, 2012, 38(2): 295-302.
(Xia N, Wang C S, Zheng R, et al. Fish swarm inspired underwater sensor deployment[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(2): 295-302.)
- [40] 韩志杰, 吴志斌, 王汝传, 等. 新的无线传感器网络覆盖控制算法[J]. *通信学报*, 2011, 32(10): 174-185.
(Han Z J, Wu Z B, Wang R C, et al. Novel coverage control algorithm for wireless sensor networks[J]. *J on Communications*, 2011, 32(10): 174-185.)
- [41] Liu F. A QoS-based topology control algorithm for underwater wireless sensor networks[J]. *Int J of Distributed Sensor Networks*, 2010, 1(10): 1-12.
- [42] 陈锦铭, 陈贵海, 严允培, 等. 水下无线传感器网络研究现状[J]. *计算机科学*, 2007, 34(9): 303-307.
(Chen J M, Chen G H, Yan Y P, et al. Research status on underwater wireless sensor networks[J]. *Computer Science*, 2007, 34(9): 303-307.)
- [43] Stojanovic M, Preisig J. Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2009, 47(1): 85-89.
- [44] Courses E, Surveys T. OFDM for underwater acoustic communications: Adaptive synchronization and sparse channel estimation[C]. *Proc of IEEE Int Conf on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP 2008*. Washington, 2008: 5288-5291.
- [45] 于香亮. 水声通信网络MAC层协议研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学水声工程学院, 2009.
(Yu X L. Research on MAC protocol of underwater acoustic networks[D]. Harbin: College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, 2009.)
- [46] 樊光辉. MAC协议的研究与OPNET仿真[D]. 厦门: 厦门大学通信工程系, 2008.
(Fan G H. Research on MAC protocol and OPNET simulation[D]. Xiamen: Communication Engineering Department, Xiamen University, 2008.)
- [47] 尹成. 水声传感器网络MAC协议研究[D]. 青岛: 中国海洋大学海洋环境学院, 2009.
(Yin C. Research on MAC protocol of underwater acoustic sensor networks[D]. Tsingtao: College of Physical and Environmental Oceanography, Ocean University of China, 2009.)
- [48] Pompili Dario, Melodia Tommaso, Akyildiz Ian F. Three-dimensional and two-dimensional deployment analysis for underwater acoustic sensor networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2009, 7(4): 778-790.
- [49] Luo H, Guo Z, Dong W, et al. LDB: Localization with directional beacons for sparse 3D underwater acoustic sensor networks[J]. *J of Networks*, 2010, 5(1): 28-38.
- [50] Caruso Antonio, Paparella Francesco, Vieira Luiz F M, et al. The meandering current mobility model and its impact on underwater mobile sensor networks[C]. *Proc of the 27th Conf on Computer Communication*. Piscataway: IEEE, 2008, 4: 13-18.
- [51] Erol-Kantarci, Mouftah Oktug S. A survey of architectures and localization techniques for underwater acoustic sensor networks[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2011, 13(3): 487-502.
- [52] Vasilescu I, Kotay K, Rus D, et al. Data collection, storage, and retrieval with an underwater sensor networks[C]. *Proc of the ACM SenSys05*. New York, 2005: 154-165.
- [53] Robert Zhong Zhou, James Zheng Peng, Jun-Hong Cui, et al. Scalable localization with mobility prediction for underwater sensor networks[J]. *IEEE Trans on Mobile Computing-TMC*, 2011, 10(3): 335-348.
- [54] Salvador Climent, Juan Vincente Capella, Nirvana Meratnia, et al. Underwater sensor networks: A new energy efficient and robust architecture[J]. *Sensors*, 2012, 12(1): 704-731.
- [55] John Heidemann, Milica Stojanovic, Michele Zorzi. Underwater sensor networks: Applications, advances and challenges[C]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2012, 1(370): 158-175.
- [56] Sandra Sendra, Jaime Lloret, Miguel García, et al. Power saving and energy optimization techniques for wireless sensor networks[J]. *J of Communications*, 2011, 6(6): 439-459.

- [57] Seokhoon Yoon, Abul K Azad, Hoon Oh, et al. AURP: An AUV-aided underwater routing protocol for underwater acoustic sensor networks[J]. *Sensors*, 2012, 12: 1827-1845.
- [58] Akkaya K, Newell A. Self-deployment of sensors for maximized coverage in underwater acoustic sensor networks[J]. *Computer Communications*, 2009, 32(7-10): 1233-1244.
- [59] Golen E F, Mishra S, Shenoy N. An underwater sensor allocation scheme for a range dependent environment[J]. *Computer Networks*, 2010, 54(3): 404-415.
- [60] Wei Zhiqiang, Yang Guang, Cong Yanping, et al. Analysis of security and threat of underwater wireless sensor network topology[C]. *Proc of the ICCEE 2010*. Chengdu, 2010, 5: 506-510.
- [61] 谭跃进, 吴俊. 网络结构熵及其在非标度网络中的应用[J]. *系统工程理论与实践*, 2004, 24(6): 1-3.
(Tan Y J, Wu J. Network structure entropy and its application to scale-free networks[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2004, 24(6): 1-3.)
- [62] Erol M, Vieira L F M, Gerla M. Auv-aided localization for underwater sensor networks[C]. *Proc of the Int Conf on Wireless Algorithms Systems and Applications (WASA2007)*. Piscataway: IEEE, 2007: 44-54.
- [63] Chryssostomidis C. AUV laboratory at MIT sea grant [EB/OL]. (2012-10-08)[2013-03-19]. <http://auvlab.mit.edu/vehicles/vehiclespec3.html>.
- [64] Peter O, Edward F, Naomi E L. Cooperative control of mobile sensor networks: Adaptive gradient climbing in a distributed environment[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2004, 49(8): 1292-1302.
- [65] 刘林峰, 刘业. 基于满Steiner树问题的水下无线传感器网络拓扑愈合算法研究[J]. *通信学报*, 2010, 31(9): 30-37.
(Liu L F, Liu Y. Study of topology recovery algorithm based on full Steiner minimum tree problem in underwater wireless sensor networks[J]. *J on Communications*, 2010, 31(9): 30-37.)
- [66] 刘林峰, 吴家皋, 邹志强, 等. 面向节点失效问题的无线传感器网络拓扑自愈算法[J]. *东南大学学报*, 2009, 39(4): 695-699.
(Liu L F, Wu J G, Zou Z Q, et al. Topology self-cure algorithm aiming at node failure problem in wireless sensor networks[J]. *J of Southeast University*, 2009, 39(4): 695-699.)
- [67] 刘军, 于耕, 张慧鹏. 基于节点控制的空间信息拓扑重构算法[J]. *电子学报*, 2011, 39(8): 1837-1844.
(Liu J, Yu G, Zhang H P. A topology reconfiguration algorithm through node position control for space information networks[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(8): 1837-1844.)
- [68] 付华, 韩爽. 基于新量子遗传算法的无线传感器网络感知节点的分布优化[J]. *传感技术学报*, 2008, 21(7): 1259-1263.
(Fu H, Han S. Optimal sensor node distribution based on the new quantum genetic algorithm[J]. *Chinese J of Sensor and Actuators*, 2008, 21(7): 1259-1263.)
- [69] 林祝亮, 冯远静. 基于粒子群算法的无线传感网络覆盖优化策略[J]. *计算机仿真*, 2009, 26(4): 190-193.
(Lin Z L, Feng Y J. Optimization strategy of wireless sensor networks coverage based on particle swarm algorithm[J]. *Computer Simulation*, 2009, 26(4): 190-193.)
- [70] 王雪, 王晟, 马俊杰. 无线传感网络移动节点位置并行微粒群优化策略[J]. *计算机学报*, 2007, 30(4): 563-568.
(Wang X, Wang S, Ma J J. Parallel particle swarm optimization based mobile sensor node deployment in wireless sensor networks[J]. *Chinese J of Computers*, 2007, 30(4): 563-568.)
- [71] 米志超, 周建江. 带约束的多目标优化的无线传感器网络路由算法[J]. *应用科学学报*, 2008, 26(3): 239-243.
(Mi Z C, Zhou J J. A multi-object optimization routing algorithm with constraint for wireless sensor networks[J]. *J of Applied Sciences-Electronics and Information Engineering*, 2008, 26(3): 239-243.)
- [72] Yuxi Liu, Guohui Zhou. Key technologies and applications of internet of things[C]. *The 5th Int Conf on Intelligent Computation Technology and Automation(ICICTA)*. Zhangjiajie: IEEE Computer Society, 2012: 197-200.
- [73] 郭文忠, 罗汉江, 洪峰, 等. 水下无线传感器网络的研究进展[J]. *计算机研究与发展*, 2010, 47(3): 377-389.
(Guo W Z, Luo H J, Hong F, et al. Current progress and research issue in underwater sensor networks[J]. *J of Computer Research and Development*, 2010, 47(3): 377-389.)