

UASN 拓扑控制研究

刘红日, 孙云霄, 宋佳, 刘扬, 黄俊恒, 王佰玲

(哈尔滨工业大学(威海)网络技术研究所, 山东 威海 264209)

摘要: 首先, 归纳了当前水下声学传感器网络节点、通信结构的研究现状, 分析了时间同步算法、MAC 协议、部署策略对网络拓扑控制的影响; 然后, 按照网络部署的先后过程, 提炼出拓扑结构的部署生成、拓扑动态演化、拓扑愈合 3 个科学问题; 最后, 为未来的研究提出了新的思路。

关键词: 水下声学传感器网络; 网络部署; 动态演化; 拓扑愈合

中图分类号: TP393.0

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-109x.2016.00053

Survey on UASN topology control

LIU Hong-ri, SUN Yun-xiao, SONG Jia, LIU Yang, HUANG Jun-heng, WANG Bai-ling

(Institute of Network Technology, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China)

Abstract: Firstly, the status of current research of water acoustic sensor network nodes and communication structure were summed up, and the impact of the time synchronization, MAC protocol and deployment strategies on network topology control were analyzed. Secondly, following successive process of network deployment, three scientific issues including the deployment generation of topological structure, the dynamic evolution of topology and healing mechanism of topology were extracted. Finally, a new thought for future research was provided.

Key words: underwater acoustic sensor networks, network deployment, dynamic evolve, topology healing

1 引言

地球表面超过 70% 的区域被海洋覆盖, 然而, 超过 95% 的海洋还处于最初的基础研究阶段, 甚至是完全未开发的状态。面对日益枯竭的陆地资源, 海洋资源的开发成为世界各国未来的研究方向。然而对海洋信息的了解才刚刚开始。水下声学传感器网络 (UASN, underwater acoustic sensor

networks) 是由部署在水中携带各种传感器的节点和潜航器组成的自组织通信、感知网络, 能够在部署区域内合作完成信息的采集、监控任务^[1]。UASN 在海洋水文信息调查、海洋资源研究、海洋灾害预警、海洋环境资源调查以及海洋军事活动等方面具有广阔的应用前景, 成为获取海洋信息的重要手段。

无线电波在水下衰减严重, 实验证明不适用

收稿日期: 2016-03-17; 修回日期: 2016-04-27。通信作者: 王佰玲, wbl@hit.edu.cn

基金项目: 哈尔滨工业大学科研创新基金资助项目 (No.HIT.NSRIF.201723); 哈尔滨工业大学(威海)学科建设引导基金资助项目 (No.WH20150211); 国家自然科学基金资助项目 (No.61371177); 山东省科技发展计划基金资助项目 (No.2014GGX101053); 山东省科技重大专项基金资助项目 (No.2015ZDXX0201B04)

Foundation Items: Natural Scientific Research Innovation Foundation in Harbin Institute of Technology (No.HIT.NSRIF.201723), Discipline Construction Guiding Foundation in Harbin Institute of Technology (Weihai) (No.WH20150211), The National Natural Science Foundation of China (No.61371177), Technological Development Program in Shandong Province (No.2014GGX101053), Major Scientific and Technological Special Project in Shandong Province (No.2015ZDXX0201B04)

于水下通信；而激光在水下散射严重，且需要严格对准细激光束，在水下的应用也受到严重的制约^[2]；所以，水下通信主要采用水声通信。声波在水下传播的速度比较慢，一般按 1 500 m/s 进行计算，远低于无线电波的传播速度；受温度、盐度、压力的影响，这个数值还会发生变化。再加上传感节点部署在不同的深度中，UASN 所形成的三维传感器网络与陆上二维无线传感器网络（WSN, wireless sensor networks）有很大的区别。陆上 WSN 中的相关算法，在海洋三维 USAN 里不能直接使用。例如，WSN 中广泛使用的覆盖率和部署策略在 UASN 环境下变成了 NP 问题^[3,4]。

UASN 的各种传感节点在水下的网络中相互合作，完成信息的收集，并通过网络把信息传递到陆地的处理中心，所以，网络的覆盖率和连通性成为数据能否全面收集并正确转发的关键指标。而网络的拓扑控制正是为了保证网络始终处于良好状态。由于水下环境复杂，部署在水下的节点受到潮汐、洋流以及生物附着的影响，节点会发生移动甚至失效，导致网络的拓扑结构被破坏，进而影响网络的性能。针对不同的水下环境，设计高效节能的拓扑控制策略，来保证网络的覆盖率和连通性成为 UASN 研究的一个热点。

本文对 UASN 拓扑控制算法进行了系统研究，对进一步研究 UASN 的拓扑控制理论具有重大的借鉴意义。本文围绕 UASN 网络拓扑控制，首先介绍了网络部署中使用节点的研究现状以及拓扑控制中不可缺少的通信系统结构；然后对网络拓扑形成过程中所需要的时间同步协议、节点定位、MAC 协议以及部署策略的研究现状进行了分析，这些技术影响着网络拓扑控制，也是在进行拓扑控制算法过程中不可忽略的因素；最后，根据网络拓扑控制的研究现状，分析了现有的控制算法的优缺点，并提出了未来的研究方向。

2 相关内容及研究现状

2.1 水下传感器节点

水下传感器节点是进行数据采集和数据转发的个体，除了有水声通信模块以外，还有数据采集模块。与陆地 WSN 传感器节点相比，有以下几点不同。

1) 传感器节点采用的通信方式不同。虽然都是无线信号，但是水声的传播速度要比无线射频信号的传播速度低 5 个数量级，导致水下通信有很大的延迟性^[2]。

2) 部署的环境不同。恶劣的水下环境对水下传感器节点提出了更多的要求，也导致成本要比陆上节点高出许多。由于水下环境比较复杂、噪音比较多，水下传感器节点的换能器把侦听到的水声信号经过声学调制解调器复杂算法的处理，得到微处理器能够直接处理的数字电信号，调制解调过程采用的处理器为高性能的数字信号处理器（DSP, digital signal processor）^[5]。在发送数据时，需要使用水下载调器将电信号编码，经过水下换能器将电信号转成水声信号发射出去。水下信号的接收、转换和发射过程中的延时是网络拓扑控制不可忽略的因素。

根据采用不同的水声调制解调器，通信频率可以从数千赫兹至数百千赫兹，传输的距离为数十米到数千米^[6]，数据的传输率为数百比特每秒到数千比特每秒。所以，在研究网络拓扑控制策略的过程中，要充分考虑到网络的通信距离。

3) 水下传感器的成本比较高。水下传感器节点由于部署在水下几米甚至是几千米，且需要进行复杂的处理，导致水下传感器节点的成本相当高^[7]，要监控一片广阔的立体海域，在没有解决节点的成本问题之前，以稀疏部署为主。

4) 水下传感器的节点部署方式比较多，可以分成以下几类^[8]。

①静态部署：节点被固定在不移动的物体上，如船坞、海底锚点以及海床。

②半移动部署：节点连接到水上漂浮物后下垂至水中，适用于短期部署。

③移动部署：节点安装在无缆水下机器（AUV, autonomous underwater vehicle）、低功率的水下滑翔机以及无动力的漂浮物上。移动部署可以用有限的硬件资源最大化节点的覆盖率。移动节点的加入，给拓扑结构的控制带来新的挑战。

由于以上的不同，在研究 UASN 拓扑控制时，需要考虑实际的节点性能，研究高效健壮的算法。由于节点的成本比较高，进行实际水下部署的成本也很高，所以，在进行海试之前，需要在实验

室进行相关的测试。

目前,在海试中测试过的节点包括 AquaNodes 以及简单的移动节点 AMOUR^[9]等;专用的测试床及仿真工具有美国康涅狄格州大学开发的 Aqua-Lab^[10]、Aqua-Sim^[11]等。在 AUV 方面,各国都展开了研究,重量在 500 kg 以上,续航时间为 24 h 以上,如美国的蓝鳍金枪鱼、中科院自动化所的潜龙一号等,以及天津大学的海燕滑翔机。图 1 为 MIT 的研究者设计制作的移动节点 AMOUR^[9],这些节点可以部署在水下不超过 100 m 的水域。



图1 水下移动节点 AMOUR

2.2 UASN 的通信系统结构

UASN 是由水面上的无线网络和水下传感器网络构成的立体网络^[12]。水上部分包括定位和时钟同步用的参考点、通信中继的网关等;水下通信网络研究方向覆盖时间同步、节点定位、MAC 通信协议以及路由控制等多个方面。水下采集信息中的时间和位置信息保证了信息的时效性和相关性。由于声波在空气中的速度比较慢,因此,水下的信息传到陆地的处理中心后,在水面以上须采用无线电波的方式进行传播,即需要在水面上部署网关,进行信号的转换,同样也可以接受地面处理中心发送的指令。典型的通信系统结构如图 2 所示。

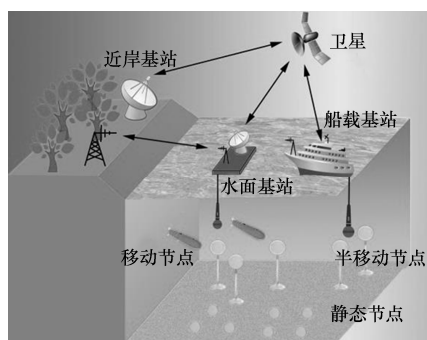


图2 通信系统结构

2.3 UASN 的时间同步

传感器网络的分布式特点决定应用任务必须通过节点间的细粒度协同与合作完成^[13]。时间同步为协议和应用服务提供基本的支持^[14],例如,为了保证数据的新鲜度,需要在采集的数据中加入时间戳。水下的节点无法从 GPS 等统一时钟源获取精确时间,只能通过携带的晶振计数来计算本地时间。物理性质决定晶振周期存在微小的波动,这种波动的长期积累,会造成整个网络的时间不一致,将会影响一系列应用,如多个节点同时从休眠状态转到工作状态。由于水下通信存在较大的延迟,节点本身能量有限且具有一定的移动性,所以,对水下时间同步提出了很高的要求。Liu 等^[15]为水下移动传感网络设计了一个成对的跨层时间同步方案——DA_Sync。该方案评估了节点移动性带来的多普勒漂移,使用卡尔曼滤波算法提高了时间同步的精度,通过运行 2 个线性回归方程来校准时间的偏斜和漂移。

2.4 UASN 的水下节点定位

水下节点的位置用来标记所收集的信息位置,如果没有采集信息的具体位置,该信息就失去了意义。通过节点的定位信息,结合节点的通信距离和感知距离,能够计算出当前网络的覆盖率和连通性。

在定位方法中,测边法是一种广泛使用的定位方法。多变测量是经典的三边测距法的一般化,即由非共面的 $n+1$ 个点确定 n 维坐标信息^[16]。

水下声学定位一般可分为长基线、短基线和超短基线定位。依据水声信号在节点间的传播延时或相位差,可计算节点间的相对距离。不论哪一种定位方式,都需要采用多个参考点,根据已知参考点的位置信息和其他节点与这些节点的相对距离进行相对定位。通常采用 TOA (到达时间)、TDOA (到达时间差) 等来计算两点之间的距离。

UASN 的时间同步和节点定位并不是孤立的,两者具有相互依赖性。Liu 等^[17]提出水下定位和时间同步问题的联合解决方案 JSL。该方案针对水下信号时延长、带宽低、能量受限和移动性等问题,考虑到水下实际分层的效果,经过 4 个阶段的时间同步和定位迭代,再补偿假设声波

在水下环境以直线方式传播所带来的范围评估偏差,提高了节点定位和时间同步的精度,极大地减少了水下通信的信息交换量。

2.5 UASN 的 MAC 协议

目前,水下水声通信几乎全都采用半双工的通信方式^[7],MAC 协议的效率对水下通信网络的形成、拓扑的控制有着巨大的影响。MAC 协议是水下网络拓扑生成的基础协议^[18]。适用于水下的 MAC 协议可以分为竞争协议(如 CSMA)和调度协议(如 TDMA)2 类。TDMA 的效率比较高,但需要比较严格的时间同步^[1,15],节点的数量变化灵活性比较低。CSMA 协议对节点数量变化的灵活性比较高,但水下信号传输的长延时导致基于竞争的协议效率比较低^[19]。

大部分 MAC 协议的测试是通过模拟实验^[20, 21]或者人工水池^[22]来进行的。Le 等^[23]提出基于调度的 MAC 协议——PMAC。它是一个在海洋环境下测试过的通信协议,该协议采用独特的直线拓扑结构,网络节点轮流发送数据,距离 3 跳距离的节点可以同时发送数据,一个节点在一个指定的时间槽内发送数据,一个数据在一个时间槽内完成传输。如果该节点侦听到数据分组被转发或者收到一个明确的应答,则进行下一个数据分组的发送,否则,等待下一个时间槽的分配。实验中还采用该拓扑结构测试了 SASHA、UW-aloha 协议,实验证明,PMAC 在这样的拓扑结构下性能比其他 2 个好。Zhu 等^[24]通过多次海洋实验,发现由水声调制解调器特征引起的 2 个不可忽视的问题:传输速率和长分组的有效性。高传输速率和长分组都会造成大的分组丢失率。针对这个问题,提出分布式的基于聚簇的按需分时共享的 MAC 解决方案——COD-TS,采用分时协议能够避免发送过程中数据分组的碰撞问题,因此,有希望解决上述的 2 个问题,在单跳网络中,COD-TS 使用 Bandyopadhyay 等^[25]提出的聚簇方法,簇头根据成员的请求为它们分配发送数据的时间槽,一轮通信的持续时间是固定的,而是按照需求,除非总的被调度数据分组的传输时间长度超过了阈值,这样保证了各簇的公平。文章还将 COD-TS 协议扩展到了多跳网络中。

2.6 UASN 的部署

UASN 的拓扑研究应结合节点的部署策略,拓扑控制从节点部署开始。

UASN 节点的部署可以认为是其生命周期的开始,UASN 的部署需要结合海洋环境考虑部署的类型^[8]、网关的布置^[26-28]、拓扑结构、时间同步和节点定位等服务。在水下环境中必须考虑到节点长时间工作所带来的问题,可能的风险包括海流、潮汐、水下渔具、节点的能量耗尽、生物的侵蚀和附着作用以及防水的失败等。所以,一些学者提到了节点的冗余部署^[19],另外,为了考虑将来破损的网络拓扑愈合,理论上可以考虑移动节点部署和二次部署。

成本问题成为制约 UASN 实际部署的一个重要原因。由于目前使用的市场不大,水下传感器节点的成本相当高。例如,一个有耐压外壳的水下调制解调器大约是 3 000 美元。相比陆上传感器节点 100 美元的成本,水下传感器节点的成本高达 10 000 美元^[19]。经济上的考虑驱使水下传感器网络稀疏部署^[7,19,29]。部署的成本也非常高,海洋调查船用的海岸艇的成本是每天 5 000 美元,大型远洋船是每天 25 000 美元。所以,给定一片海域及拓扑要求,如何进行快速高效的部署是在实际部署之前需要解决的课题。

按照网络最终的体系结构来分,部署可以分为二维部署和三维部署。二维部署是指节点被固定在海底上,对海底附近信息进行收集;而三维部署是节点被部署在海洋的不同深度,能够监控整个海域空间。三维部署对节点提出了新的要求,即节点能够通过压力传感器来计算所在的深度并进行水面垂直方向的调整。

目前,大部分部署算法都假设所要部署的网络为同构网络^[4],即网络中的每个节点的感知半径和通信半径分别都是相同的,且通信半径大于感知半径。最佳的部署策略是用数量最少的节点完全覆盖某个二维或者三维空间。所以,一部分学者从几何的角度出发^[4,30-33],研究网络的最大覆盖率和连通性。

Pompili 等^[32]分别提出了 UASN 下二维环境和三维体环境的节点部署算法。在二维环境中,提出了三角网格部署方法,目标是用数量最少的

节点覆盖一个矩形区域,具体的策略是使用聚集节点,使每个节点成为等边三角形的每一个顶点,通过调整三角形的边长(2个节点之间的距离)来达到100%的覆盖率。文章还研究了节点在下沉过程中的动力学,来研究节点在水面部署时的位置。在二维部署的基础上,提出三维的底部网格随机策略。节点都下沉到海底,然后调整与固定在海底的锚点的连线长度形成三维网络。节点的深度通过水上工作站计算得到,锚点的位置是通过二维环境下的三角网格部署策略来计算的。本文所提出的部署策略适合在单跳网络环境中,为了达到好的覆盖率,要在掌握部署海域的水文情况后,才能进行精确部署。

针对定点部署的弊端,Senel^[3,34]提出UASN中节点自动部署算法,该算法的思想是在水面上随机部署二维传感器网络,通过节点合作计算并各自调整自己的深度,形成一个能够在保证连通性的同时达到最大覆盖的三维UASN。首先,采用启发式算法确定水面二维网络的连通支配节点的集合,这些支配者形成未来三维网络的骨干节点。维持支配者连通,并选出一个节点作为头节点,从头节点开始,以令环的方式顺序计算出该支配节点下的被支配节点和相邻的支配节点的深度,直到所有的节点都完成深度计算。最后,各个节点各自下沉到计算的深度。该方法是通过减少覆盖的重叠来达到最大覆盖率的,缺点是在整个网络形成过程中节点之间需多次交换数,数据通信量大。

为了形成一个完整的通信网络,水面部分的网关是必不可少的。水面网关可以将水下节点发送的水声信号转为无线电信号,并转发到控制中心。Ibrahim等^[27,35]提出水面网关位置的计算方法,假设已经存在一个水下网络的部署,计算出给定数量的水面网关节点最优部署位置。文章把水面划分成若干个相等的网格,用一个二进制数来标志某个网格是否部署水面网关节点。限制条件分为部署限制、流量守恒限制和冲突限制。文章把该问题归纳为CFLP(固定容量设备选址)问题,通过互换贪婪算法求得近似最优解。文章还把这种节点部署方法扩展为动态部署方法,即通过定期地使用该算法来调整网络的水面网关节

点的位置,达到网络寿命的最大化。该算法能够在理论上达到接近最优解,但没有考虑水下节点的拓扑演化性,忽略了网关节点从开始移动到新的拓扑形成过程中需要的通信量的大小。

UASN的节点部署研究算法不是很多,原因之一是很难取得真实的实验数据。在大部分的研究文献里,都假定UASN已经部署完毕。实际上,UASN从部署到最终通信网络的形成过程涉及时间同步、节点定位问题和MAC协议问题,而这3个问题又相互依赖。例如,节点的定点部署需要节点精确定位,而节点在使用TOA方式定位时,不仅需要解决时间同步问题,还需要解决参考节点和网关部署的问题等。另外,由于节点的成本比较高,在稀疏部署条件下,如何对某个区域实行有效监控成为未来的研究方向。

3 UASN 拓扑控制理论研究内容

UASN的网络拓扑控制覆盖了节点的部署、拓扑形成、网络拓扑维护等各个环节。

3.1 UASN 的特点

UASN的拓扑控制理论研究是建立在时间同步、水下节点定位以及MAC协议等理论基础之上的,控制具有复杂性,而复杂多变的水下环境也给网络的拓扑控制带来了新的挑战。

UASN的网络有以下几个特点。

1) UASN是复杂的三维网络。由于单纯的海底二维部署不能有效地监控整个立体海域,而且二维的海底部署要求充分掌握海底地形。当监控的对象为广阔的深水水域时,由于节点感知范围的限制,需要在水深部署节点,形成一个多跳网络。在整个网络中,还需要一类部署在水面的节点,能够把水声信号转为电信号并发送到处理中心。所以,UASN的拓扑研究^[4, 30, 31, 33, 36]大都集中在三维网络拓扑。

2) UASN的数据吞吐率比较低。由于水声信道具有路径损耗,特别是受浅海域信号反射和折射的影响,误码率高,再加上信号频率低,导致整个网络的吞吐率比较低。另外,为了延长网络的寿命,节点在部署以后,大部分时间都处在休眠状态,节点的处理能力与通信能力严重不匹配。

3) UASN的拓扑具有动态演化性。首先,由于

水下节点能量使用的不均衡,对于多跳聚簇网络而言,靠近簇头的节点由于较高的转发频率会导致节点能量消耗快而过早死亡;其次,由于洋流和潮汐的影响,悬浮在水中的节点也会随之运动,导致节点的位置动态发生变化;最后,长时间的生物侵蚀和附着作用,会使节点失去感知能力,悬浮的节点会沉入海底,导致网络的拓扑发生变化。

4) 作为感知和通信主体的传感器节点的能量不容易补充,再部署比较困难。节点的有限能量严重影响了水下传感器节点的寿命。但是,一般认为,AUV 和水下滑翔机等移动节点可以到对接处进行能量补充和信息传输^[37],这给设计具有健壮性和长寿命的网络带来方便。

以上几个因素影响了网络拓扑的健壮性和网络的寿命,同时也影响了网络拓扑控制的策略。

网络拓扑是 UASN 研究的关键问题,水下传感器拓扑控制的目标为在保证网络高连通性、感知的高覆盖率的前提下减少时延^[38]、节省能量^[31]、延长网络寿命^[39]。

3.2 UASN 拓扑控制的研究内容

目前,学术界针对 UASN 拓扑控制理论的研究主要围绕以下几点。

1) 拓扑结构的部署、生成算法

考虑到不同的水深、水下地形(海床不平整)等因素,设计合理的网络拓扑结构是进行拓扑研究的首要问题。Senel 等^[3,34]提出在水面上计算各节点的深度后再各自下沉到指定的深度的控制算法。该算法控制简单,但是骨干节点与其他节点的计算量大、通信量也很大,导致骨干节点的能量损耗比较快。何明等^[40]提出使用鱼群启发算法研究 AUV 节点和传感器节点的部署,最终完成两者的分布密度相匹配部署。对传感器节点分组编号,发现失效节点以后,AUV 进行愈合。把传感器节点作为人工鱼,目标检测区域内的事件作为食物,再次使用鱼群启发算法,进行网络拓扑的愈合。模拟在 $800\text{ m}\times 800\text{ m}\times 800\text{ m}$ 的水下检测区域内,部署 100 个目标事件、50 个传感器节点和 10 个 AUV 节点进行 100 轮仿真,事件覆盖度基本在 90%以上。但该算法要求 AUV 与传感器节点一起部署,并且传感器节点在死亡之前,AUV 一直不工作,在愈合过程中,AUV 需要降

低功率使用,没有充分发挥 AUV 的功能,不适用于实际的网络部署和拓扑控制中。

为了方便研究,水下传感器节点一般都认为是同构的。Wang 等^[41]研究了同构网络下的聚簇控制算法,根据当前的网络情况,可以周期性地重新选择能量大且距离中心点近的节点作为簇头节点,该算法理论上能够均衡网络节点的能量、延长网络寿命。但簇头的全局选举需要进行大量的通信,在这个过程中会消耗节点的大量能量。

网络拓扑的部署生成算法的目标是在某一海洋环境下,使用少量的节点达到最大的覆盖区域。大部分部署策略都是以牺牲通信量来达到或者接近最优,而忽略了水下通信的低效率和高能量损耗对整个网络的影响。

2) 拓扑的动态演化性研究

Caruso 等^[42]分析了自由漂流的节点在海流中的漫流(meandering current)和涡流(vortices)的运动,提出节点水下环境的移动模型—meandering current mobility,得出了覆盖率和连通性是时间函数的结论。Mandal 等^[43]研究了水下传感器节点在海洋中的受力情况,提出了节点的物理移动模型——海洋力量移动模型(oceanic forces mobility model),分析了在三维环境下,节点在该模型下的运动对网络的离散和定位方面的影响。仿真结果表明,在海洋力量的影响下,定位覆盖率降低 36.70%、错误率增加 21.14%、平均能量消耗增加大于 3%。Liu 等^[38,44,45]进行了半移动部署的节点(水下节点通过连线与固定在海床的锚点连接)在洋流作用下的网络演化性研究。文章指出这样的节点在水下的移动轨迹为球冠结构,研究目标是找到一个能够在维持覆盖和连通的同时,尽可能减少能量消耗的网络拓扑控制算法。

目前,网络拓扑的性能评价指标一般采用连通性和覆盖率,但是水下网络的特殊性还应该有其他指标,如节点的平均通信距离等。研究合理且全面地评价当前的网络状况的性能评价指标是拓扑控制要解决的问题之一。

3) 拓扑的愈合机制研究

水下节点的移动性和复杂的水下环境使网络的拓扑发生变化。为保证网络能够不间断地工作,需要对网络的性能进行评价,当性能达到某个阈

值时, 进行网络拓扑愈合。愈合方法包括节点的冗余部署、二次部署以及移动节点辅助修补等。

Liu 等^[46]认为重新部署的关键点是解决覆盖率问题, 通过把监控水域分成大小相同的立方体来研究网络的覆盖率。文章提出通过增加新的节点和移动休眠的冗余节点 2 个算法来修复网络的拓扑结构。使用一个随机游走模型来模拟洋流环境, 并在这个模型研究覆盖率的变化。模拟在 $50\text{ m} \times 50\text{ m} \times 50\text{ m}$ 的水域里部署 100 个节点, 使用部署新节点的算法后, 网络的覆盖率可以达到 95%。随着时间的推移, 网络中的节点逐渐减少, 使用移动冗余节点的算法, 可以减缓覆盖率降低的速度。该算法虽然能够减缓网络覆盖率的衰减, 但并没有考虑到冗余节点的具体位置, 也没有考虑到当前网络节点的状态, 愈合以后的拓扑结构不一定是最优的。

在 UASN 中, 以水下滑翔机为代表的节点有不可控的移动性, 又有一定的自主运动性。这样的节点为网络拓扑愈合提供了解决方法。Luo 等^[39]提出了 SSC (sea surface coverage) 解决方案。文章把节点的移动分成不可控的移动和可控的移动 2 类, 每一个节点的感知区域是一块固定的感知区域, 通过一个分布式算法。首先, 计算不可控运动性下的节点移动距离; 然后, 为了补偿这个距离, 计算可控移动性下节点需要移动的距离; 最后, 多个节点相互合作, 交换感知区域, 来弥补节点的移动所产生的感知漏洞。该解决方案与每一个节点都回到原来初始位置 (back-to-origin) 的算法相比, 能够节省能量, 减缓节点的能量衰减。适用于随机环流 (random-ring) 的洋流模型, 而对于常见的漫流 (meandering current) 模型, 该算法退化成 back-to-origin, 效率显著降低。

目前的研究都假设网络需要拓扑愈合, 进而研究拓扑愈合控制算法。但是没有提及网络拓扑愈合的先决条件, 即当前网络的某个或某几个性能指标到达什么值时, 需要进行愈合。在研究愈合机制中, 因为通信的延时等因素, 从网络拓扑愈合开始到结束这一个过程所需要的时间是不能忽略的, 所以, 周期对网络的拓扑性能指标进行采样后对网络的可用状态进行评价、进而预警等相关理论研究是进行拓扑控制

理论研究的方向之一。

网络拓扑的愈合问题在本质上是系统优化问题, 在获取当前系统参数的条件下, 新加入的节点部署在什么位置上能够使愈合后的网络性能达到最优或接近最优。

4 未来研究展望

UASN 拓扑控制是未来进行大规模部署的关键技术之一, 围绕未来的实际大规模部署, UASN 网络拓扑研究可从以下几个方面进行深入。

1) OWSN 部署阶段的网络性能评测模型。在研究 UASN 网络拓扑时, 一般都假设通信距离大于感知距离, 所以, 拓扑控制的目标首先是保证覆盖率。但实际上的部署由于水文影响或者成本因素, 很难达到 100%。在这种背景下, 如何评价网络拓扑的性能以及对愈合的策略做出性能评估是亟需解决的理论问题。

2) 自主移动网络的拓扑研究。水下多个自主移动节点 (如 AUV) 的编队拓扑控制也是目前的一个研究热点方向, 特别是利用移动节点监控重要价值的基础设施 (如海岛、钻井平台等)。例如, Zou 等^[47,48]使用 3D-PSO (粒子群优化) 的拓扑控制算法, 用多个 AUV 来联合保卫港口和舰船的周边安全。

3) 拓扑愈合的策略。好的网络愈合策略不能简单地用新节点代替原来的某一个或几个死亡节点或者临近死亡节点, 而是要考虑到网络当前的状态 (节点的能量剩余量、网络通信的瓶颈等), 选择最佳的愈合位置。例如, 在获得当前多个网络节点状态的基础上确定重新部署策略, 重构网络的部分拓扑, 从而达到优化整个网络拓扑的目的。

4) 拓扑愈合中的安全问题。网络拓扑愈合过程中加入新的同构或者异构节点所导致的安全问题不能忽视。例如, 如何对新加入的节点进行密钥管理和身份认证来阻止女巫攻击、虫洞攻击等恶意攻击行为的生效。

5) 网络拓扑结构演化预测模型。在建立的性能评估模型下, 通过节点的状态变化来预测拓扑结构的性能变化, 为拓扑的愈合提供决策。

6) 三维仿真平台的研究。目前的网络仿真工

具,如 NS2^[49]、OMNeT^[50]、NS3^[51]都不能很好地支持 UASN 的网络仿真。WOSS (world ocean simulation system)^[52]是海洋环境下的水声信道仿真工具,输入海洋环境数据,能够对海洋水声信道进行仿真,无缝支持 NS3 的仿真。目前的仿真平台缺少像水下滑翔机、AUV 等移动节点模型,更不能对洋流模型、海底地形等进行建模。所以,UASN 下的三维仿真平台作为网络拓扑控制理论研究的支撑平台,也是未来的研究方向之一。

5 结束语

UASN 的研究目前还处于发展阶段,由于实际部署难度较大、成本昂贵,大部分的拓扑控制研究仍处于浅层次的理论研究阶段。本文围绕 UASN 的拓扑控制理论研究,首先,分析了水下传感器节点、时间同步、MAC 协议、节点定位及部署等各方面对拓扑控制理论的影响;然后,分析了网络拓扑控制理论的研究内容以及学术界现有的控制算法及其局限性;最后,提出了未来的研究方向,为更深入地研究拓扑研究控制理论提供了新的研究点。解决 UASN 成本,才会有更多实际的水下部署,促进网络拓扑控制理论的研究。不可预见的复杂海洋环境,对拓扑控制算法在可用性、顽健性等方面提出了更高的要求。

参考文献:

- [1] AKYILDIZ I F, POMPILI D, MELODIA T. Underwater acoustic sensor networks: research challenges[J]. *Ad Hoc Networks*, 2005, 3(3): 257-279.
- [2] AKYILDIZ I F, POMPILI D, MELODIA T. State-of-the-art in protocol research for underwater acoustic sensor networks[C]//The 1st ACM international workshop on Underwater networks (WU-WNet), Los Angeles. c2006: 7-16.
- [3] SENEL F, AKKAYA K, EROL-KANTARCI M, et al. Self-deployment of mobile under- water acoustic sensor networks for maximized coverage and guaranteed connectivity[J]. *Ad Hoc Networks*, 2015, 34: 170-183.
- [4] ALAM S M N, HAAS Z J. Coverage and connectivity in three-dimensional networkswith random node deployment[J]. *Ad Hoc Networks*, 2015, 34: 157-169.
- [5] RICE J, GREEN D. Underwater acoustic communications and networks for the US navy's seaweb program[C]//The IEEE 2008 Sensor Technologies and Applications. c2008: 715-722.
- [6] LANBO L, SHENGLI Z, JUNHONG C. Prospects and problems of wireless communication for underwater sensor networks[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2008, 8(8): 977-994.
- [7] PARTAN J, KUROSE J, LEVINE B N. A survey of practical issues in underwater networks[J]. *ACM Sigmobile Mobile Computing and Communications Review*, 2007, 11(4): 23-33.
- [8] HEIDEMANN J, STOJANOVIC M, ZORZI M. Underwater sensor networks: applications, advances and challenges[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2011, (11): 158-175.
- [9] DETWEILLER C, VASILESCU J, RUS D. An underwater sensor network with dual communications, sensing, and mobility[C]//Oceans, IEEE. c2007: 1-6.
- [10] PENG Z, CUI J H, WANG B, et al. An underwater network testbed: design, implementation and measurement[C]//The 2nd Workshop on Underwater networks, ACM, New York. c2007: 65-72.
- [11] XIE P, ZHOU Z, PENG Z, et al. Aqua-sim: an NS-2 based simulator for underwater sensor networks[C]//Oceans, MTS/IEEE Biloxi-Marine Technology for our Future: Global and Local Challenges. c2009: 1-7.
- [12] 郭忠文, 罗汉江, 洪锋, 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.
- [12] GUO Z W, LUO H J, HONG F, et al. The research progress of underwater wireless sensor networks [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2010, 47 (3): 377-389.
- [13] 洪锋, 张玉亮, 杨博真, 等. 水下传感器网络时间同步技术综述[J]. *电子学报*, 2012, 41(5): 960-965.
- [13] HONG F, ZHANG Y L, YANG B Z, et al. Review of underwater sensor network time synchronization technology[J]. *Journal of Electronics*, 2012, 41(5): 960-965.
- [14] LIU J, ZHOU Z, PENG Z, et al. Mobi-sync: efficient time synchronization for mobile underwater sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2013, 24(2): 406-416.
- [15] LIU J, WANG Z, ZUBA M, et al. DA-sync: a doppler-assisted time-synchronization scheme for mobile underwater sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2014, 13(3): 582-595.
- [16] EROL-KANTARCI M, MOUFTAH H T, OKTUG S. A survey of architectures and localization techniques for underwater acoustic sensor networks[J]. *Communications Surveys & Tutorials*, 2011, 13(3): 487-502.
- [17] LIU J, WANG Z, CUI J H, et al. A joint time synchronization and localization design for mobile underwater sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2015,15(4):530-543.
- [18] 何明, 梁文辉, 陈国华, 等. 水下移动无线传感器网络拓扑[J]. *控制与决策*, 2013, 28(12): 1761-1770.
- [18] HE M, LIANG W H, CHEN G H, et al. Underwater mobile wireless sensor network topology[J]. *Control and Decision*, 2013, 28 (12): 1761-1770.

- [19] HEIDEMANN J, YE W, WILLS J, et al. Research challenges and applications for underwater sensor networking[C]//The Wireless Communications and Networking Conference(WCNC), IEEE, Las Vegas. c2006: 228-235.
- [20] YU Y, SHI J, HE K. A multichannel MAC protocol for underwater acoustic sensor networks[C]//The International Conference on Underwater Networks & Systems(WUWNet), ACM, Rome. c2014:1-5.
- [21] YANG M, GAO M, FOH C H, et al. Hybrid collision-free medium access(HCFMA) protocol for underwater acoustic networks: design and performance evaluation[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2015, 40(2): 292-302.
- [22] SUN Z X, QIAO G, YU Y. Mary code shift keying direct sequence spread spectrum with gold sequence using in underwater acoustic communication[C]//The ACM International Conference on Underwater Networks & Systems(WUWNet), Rome. c2014: 19.
- [23] LE S N, ZHU Y, PENG Z, et al. PMAC: a real-world case study of underwater MAC[C]//The 8th ACM International Conference on Underwater Networks and Systems(WUWNet). c2013: 1-8.
- [24] ZHU Y, PENG Z, CUI J H, et al. Toward practical MAC design for underwater acoustic networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2015, 14(4): 872-886.
- [25] BANDYOPADHYAY S, COYLE E J. An energy efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks[C]//The 22th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications(Infocom), San Francisco. c2003: 1713-1723.
- [26] IBRAHIM S, AL-BZOR M, LIU J, et al. General optimization framework for surface gateway deployment problem in underwater sensor networks[J]. Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking, 2013, 2013(1): 1551-1558.
- [27] IBRAHIM S, LIU J, AL-BZOR M, ET AL. Towards efficient dynamic surface gateway deployment for underwater network[J]. Ad Hoc Networks, 2013, 11(8): 2301-2312.
- [28] IBRAHIM S, CUI J H, AMMAR R. Surface-level gateway deployment for underwater sensor networks[C]//The IEEE Military Communications Conference, Orlando. c2007: 1-7.
- [29] AL-BZOR M, ZHU Y, LIU J, et al. An adaptive surface sink redeployment strategy for underwater Sensor Networks[C]//The IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC). c2013: 801-806.
- [30] ALAM S M, HAAS Z J. Coverage and connectivity in three-dimensional networks[C]//The 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom), Los Angeles. c2006: 346-357.
- [31] WANG Y, LI F, DAHLBERG T A. Energy-efficient topology control for three-dimensional sensor networks[J]. International Journal of Sensor Networks, 2008, 4(1/2): 68-78.
- [32] POMILI D, MELODIA T, AKYILDIZ I F. Three-dimensional and two-dimensional deployment analysis for underwater acoustic sensor networks[J]. Ad Hoc Networks, 2009, 7(4): 778-790.
- [33] 刘华峰, 金士尧. 基于体心立方格的三维传感器网络部署与组织[J]. 计算机工程与科学, 2008, 30(4): 109-112.
- LIU H F, JIN S Y. Body heart state grid based 3 d sensor network deployment and organization [J]. Computer Engineering And Science, 2008, 30 (4) : 109-112.
- [34] SENEL F, AKKAYA K, YILMAZ T. Autonomous deployment of sensors for maximized coverage and guaranteed connectivity in underwater acoustic sensor networks[C]//The IEEE 38th Conference on Local Computer Networks(LCN), Sydney. c2013: 211-218.
- [35] IBRAHIM S, CUI L H, AMMAR R. Efficient surface gateway deployment for underwater sensor networks[C]//The IEEE Symposium on Computers and Communications(ISCC). c2008: 1177-1182.
- [36] ZHANG C, BAI X, TENG J, et al. Constructing low-connectivity and full-coverage three dimensional sensor networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2010, 28(7): 984-993.
- [37] SOTIROPOULOS P, GROSSET D, GIANOPOULOS G, et al. AUV docking system for existing underwater control panel[C]//The IEEE Oceans ,Bremen. c2009: 1-5.
- [38] LIU L, ZHANG N, LIU Y. Topology control models and solutions for signal irregularity in mobile underwater wireless sensor networks[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2015, 51: 68-90.
- [39] LUO J, WANG D, ZHANG Q. On the double mobility problem for water surface coverage with mobile sensor networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2012, 23(1): 146-159.
- [40] 何明, 梁文辉, 陈秋丽, 等. 水下移动无线传感器网络拓扑愈合与优化[J]. 控制与决策, 2015, 30(2): 251-255.
- HE M, LIANG W H, CHEN Q L, et al. Underwater mobile wireless sensor network topology healing and optimization [J]. Control and Decision, 2015, 30 (2) : 251-255.
- [41] WANG F, WANG L, HAN Y, et al. A study on the clustering technology of underwater isomorphic sensor networks based on energy balance[J]. Sensors, 2014, 14(7): 12523-12532.
- [42] CARUSO A, PAPARELLA F, VIEIRA L F M, et al. The meandering current mobility model and its impact on underwater mobile sensor networks[C]//The IEEE 27th Conference on Computer Communications (Infocom), Phoenix. c2008:221-225.
- [43] MANDAL A K, MISRA S, OJHA T, et al. Oceanic forces and their impact on the performance of mobile underwater acoustic sensor networks[J]. International Journal of Communication Systems, 2014.
- [44] LIU B, WNAG R, XIAO F. Topology control algorithm for underwater wireless sensor networks using GPS-free mobile sensor nodes[J]. Journal of Network & Computer Applications, 2012, 35(6): 1953-1963.
- [45] LIU L, LIU Y, ZHANG N. A complex network approach to topology control problem in underwater acoustic sensor networks[J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, 2014, 25(12): 3046-3055.
- [46] LIU B, REN F, LIN C, et al. The redeployment issue in underwater

sensor networks[C]//The IEEE 2008 Global Telecommunications Conference (Glo-Becom), New Orleans. c2008: 1-6.

[47] ZOU J, GUNDRY S, KUSYK J, et al. Particle swarm optimization based topology control mechanism for holonomic unmanned vehicles operating in three-dimensional space[C]//The IEEE 35th Sarnoff Symposium (Sarnoff), Newark. c2012: 1-5.

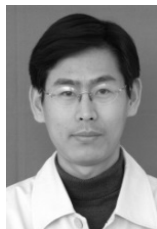
[48] ZOU J, GUNDRY S, KUSYK J, et al. Bio-inspired topology control mechanism for autonomous underwater vehicles used in maritime surveillance[C]//The IEEE 2013 International Conference on Technologies for Homeland Security (HST), Waltham. c2013: 201-206.

[49] NS2[EB/OL]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.

[50] OMNeT[EB/OL]. <https://omnetpp.org/>.

[51] NS3[EB/OL]. <https://www.nsnam.org/>.

[52] WOSS[EB/OL]. <http://telecom.dei.unipd.it/ns/woss/>.



宋佳 (1978-), 男, 山东青岛人, 博士, 哈尔滨工业大学 (威海) 高级工程师, 主要研究方向为传感器网络和工业物联网。



刘扬 (1972-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 哈尔滨工业大学 (威海) 副教授、硕士生导师, 主要研究方向为网络攻防技术、信息对抗技术、物联网安全技术、网络传播机制及舆情分析。

作者简介:



刘红日 (1982-), 男, 山东烟台人, 哈尔滨工业大学 (威海) 博士生, 主要研究方向为海洋传感器网络及安全。



黄俊恒 (1966-), 男, 河南长垣人, 哈尔滨工业大学 (威海) 副教授, 主要研究方向为数据挖掘、人工智能。



孙云霄 (1989-), 男, 山东潍坊人, 哈尔滨工业大学 (威海) 工程师, 主要研究方向为网络安全通信协议。



王佰玲 (1978-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 哈尔滨工业大学 (威海) 教授、博士生导师, 主要研究方向为网络与信息安全。