

文章编号: 1001-0920(2009)06-0801-07

水下移动无线传感器网络研究综述

吕超, 王硕, 谭民

(中国科学院 a. 自动化研究所, b. 复杂系统与智能科学重点实验室, 北京 100190)

摘要: 水下移动传感器网络是水下机器人与水下传感器网络的结合, 解决了传统水下监控网络存在的无法自动实现节点投放与回收, 容易存在监测盲区以及不能动态组网等问题. 按照自下而上的体系结构, 对水下移动传感器网络的研究内容及发展方向进行了归纳阐述, 包括水下节点设计、节点互联和动态组网, 即点、线、面的层次结构; 着重分析了节点移动特性对水下传感器网络的影响及相应的解决方法. 虽然水下移动传感器网络的研究面临很多挑战, 但它必将具有广阔的应用前景.

关键词: 水下移动无线传感器网络; 水声通信; 水下机器人; 自组织网络

中图分类号: TP29 **文献标识码:** A

Survey on mobile underwater wireless sensor networks

LV Chao, WANG Shuo, TAN Min

(a. Institute of Automation, b. Key Laboratory of Complex Systems and Intelligence Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China. Correspondent: LV Chao, E-mail: chao.lv@ia.ac.cn)

Abstract: Mobile underwater wireless sensor networks (MUWSN) combines the research of underwater sensor networks with underwater robotics, which solves many problems existed in stable underwater sensor networks. The research contents and directions of MUWSN are presented with a down-to-up architecture, including underwater sensor nodes design, the connectivity of nodes, the dynamic configuration of networks and point-line-cover architecture. The influence of nodes mobility to underwater sensor networks and the matched solutions are analysed emphatically. Though there are many challenges for the research of MUWSN, the excellent applications are anticipated.

Key words: Mobile underwater wireless sensor networks; Underwater acoustic communication; Underwater robots; Self-organization networks

1 引言

水下移动传感器网络 (MUWSN) 在水环境监测、海洋数据收集、海底探测、灾害预测等方面具有重要的应用^[1,2]. 地面无线传感器网络技术在射频通信、链路控制、路由策略、节能方法等方面已开展了较深入的研究, 而针对水下移动传感器网络开展的研究则相对较少. 水下移动传感器网络具有以下特点^[3]:

1) 网络规模大. 一方面, 传感器节点分布在很大的水下区域内; 另一方面, 在一定的区域内部署很多传感器节点.

2) 自组织性. 在水下传感器网络中, 通常情况下传感器节点被放置在没有基础结构的地方, 传感器节点的位置不能预先设定, 因此传感器节点应具有自组织能力, 能够自动进行配置和管理, 通过拓扑

控制机制和网络协议自动形成转发监测数据的多跳水声网络系统.

3) 动态性. 水声通信网络的拓扑结构可能因为下列因素而改变: 环境因素或电能耗尽造成的传感器节点出现故障或失效, 海洋环境变化可能造成声通信链路时断时通以及节点移动或加入等. 因此水声通信网络应具有适应这种变化的能力, 具有动态的系统可重构性.

4) 可靠性. 水下环境恶劣, 传感器节点容易遭受污垢或腐蚀, 且人为维护困难. 因此, 水下节点应非常坚固, 不宜损坏, 以适应这种恶劣环境.

由于水下环境与地面环境、水介质与空气介质的不同, 水下传感器网络节点的设计要求与地面传感器网络节点的设计要求在通信方式、密封要求、电池续航能力设计等方面存在很大差异; 水声通信与

收稿日期: 2008-09-17; 修回日期: 2009-01-13.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60635010, 60725309).

作者简介: 吕超 (1980—), 男, 山东临清人, 博士生, 从事水下移动传感网络、水下机器人控制的研究; 谭民 (1962—), 男, 广东新会人, 研究员, 从事机器人控制、水下移动传感网络等研究.

电磁波通信在稳定性和速率上的差异,使地面无线传感器网络自组织网络协议方面的研究成果无法直接应用于水下环境.因此,水下无线传感器网络的研究较地面无线传感器网络的研究面临更多的困难.

文献[1]按照 OSI(开放系统互连)分层方法分别对水下传感器网络对应各层的研究内容进行了详细的阐述,为水下传感器网络的研究指出了明确的思路,但对于具有移动节点的网络中的链路控制及路由方法并未涉及.文献[2]提出了水下移动传感器网络的架构,并详细分析了 MUWSN 与常规水下传感器网络的区别,但其对节点的移动特性及移动网络的动态组网方法阐述较少.

与以上文献不同,本文将水下传感器网络与水下机器人相关内容结合起来阐述水下移动传感器网络的研究内容和发展方向.按照自下而上的体系结构对各部分研究内容进行阐述,即水下节点设计、节点互联和动态组网,即点、线、面的层次结构.节点设计包括移动机构、水声通信单元、水下传感器及水下姿态和定位导航装置等;节点互联包括节点间通信、链路分配及相对位置和姿态计算等;动态组网,是根据节点连通情况进行路由策略和拓扑控制等研究.

2 国内外研究现状

下面将从 MUWSN 系统架构、水声通信、水声链路控制及路由方法、水下移动机构及定位和导航等几个方面进行阐述.

2.1 国外研究现状

最早提出水下声学网络应用概念的是 1993 年的自主海洋采样网(AOSN)计划.美国海洋研究署和麻省理工学院联合开发的“自主式海洋采样网络”,作为海洋声学局域网,已经得到了初步应用的实践.该网络由若干网络节点组成,每个网络节点由一个系留的水面浮标和若干艘自主式无人潜水器组成.该网络系统具有全向性覆盖范围、自适应采样、控制灵活以及能量可管理等优点.

在文献[2]中,美国康涅狄格大学水声网络实验室对水下传感器网络进行了系统的研究.文献[4]提出了多载波水下通信调制解调器,在通信速率及信道利用率上较传统的单载波通信方法有了较大的提高.[5]提出了一种能量优化的水声链路控制方法.[6]提出了水下传感器网络路由方法.[7]对水下传感器网络定位方法进行了研究.

在文献[8,9]中,美国麻省理工学院机器人实验室结合频移键控和幅移键控调制方式实现了节点间的水声通信和测距,将空气中防水型换能器通过调整工作频带应用到浅水区,实现了低成本低功耗的水下通信系统.在该水下传感器网络系统中,水下近

距离通信采用蓝绿光通信方式,虽然光通信存在通信距离短、指向性强的缺点,但是该系统中移动节点和固定节点的特殊结构设计,使得移动节点与固定节点之间可以实现稳定的短距离光通信.系统配置如图 1 所示.图中的盒子为固定节点;带推进器的柱状机构为传感器网络中的移动节点 AUV(水下自主机器人),负责数据收集、放置与回收传感器节点等任务,同时也可完成固定节点的功能.



图 1 美国麻省理工学院水下传感器网络系统

美国南加利福尼亚大学 John Heidemann 研究组^[10,11]提出了密集型水下传感器网络的概念.根据无线传感器网络节点 MICA2 的设计原则,研究人员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^[11].在无线自组织网络协议方面,该研究组也开展了深入的工作.文献[12]提出的 S-MAC(传感器网络媒体访问控制)协议是在 802.11 协议的基础上具有能量控制和优化的 MAC(媒体访问控制)协议,它通过调配节点的休眠方式有效地分配信道.该研究组近年在水声网络的链路和路由协议方面也进行了相关的研究,提出了 T-Lohi 链路控制协议^[13],并对该协议的信道利用率、链路控制功耗及多跳网络性能进行了仿真验证等.

文献[14,15]中,新加坡国立大学进行了水下传感器网络及多水下无人自主机器人研究,对基于水声的水下多机器人通信和组网方面进行了深入探讨,构建了水下有线网络与无线网络结合、静态节点与水下无人自主机器人结合的水下传感网络架构.

在水下无线传感器网络移动节点的设计中,有很多系统采用成熟的 AUV 技术.近年来,对高效率、高机动性的水下推进系统的研究越来越多.1994 年 MIT 机器人研究组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方式的水下移动平台^[16,17].这些新型水下 AUV 推进技术为建立高效节能、高机动性的传感器网络节点运动平台提供了新思路.

2.2 国内研究现状

我国水下传感器网络的研究刚刚起步,哈尔滨工程大学、东南大学、中国科学院自动化所、中国科学院声学所和中国科学院沈阳自动化所是我国进行

此项研究较早的单位。

哈尔滨工程大学对水声信道仿真技术, MFSK, QPSK 调制、多频编码, 自适应均衡等技术均有较深入的研究^[3,18], 并且在湖上和海洋进行了长距离数据和图像传输实验。另外, 在水声通信网络链路层和网络层协议、水下定位和导航、水下机器人等方面也进行了深入研究。

中国船舶重工集团 715 所在水声通信、水声网络等方面具有深入的研究和应用开发, 建有亚洲最大的消声水池, 为水声设备的开发和实验提供了良好的环境。

中国科学院声学所在水声传播理论、水下远距离通信、水声信号处理及水声网络等方面均有深入的研究。该所对水下通信系统, 特别是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进行了深入的理论和实验研究^[19,20]。

东南大学对水声通信网络中数据链路传输协议等也进行了相关的仿真研究。

中国科学院自动化所对水下移动传感器网络进行了较为系统的研究^[21,22]。图 2 为其近期开发的水下传感器网络节点, 具有低功耗、低成本、体积小等特点。而且, 该所对基于水声的水下链路控制和路由控制也展开了初步研究, 提出了自适应时间片分配的基于时分多路复用技术的水声链路控制方法。

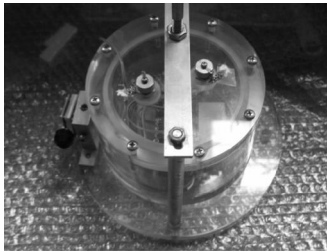


图 2 中国科学院自动化所研制的水下传感网络节点

在水下定位和导航方面, 中国测绘科学研究院和中国船舶重工集团合作研制的“水下 DGPS 高精度定位系统”, 具有较高的水下三维定位精度, 被评为中国 2004 年度中国十大科技进展新闻。

水下运动平台的研究在国内也非常活跃, 如哈尔滨工程大学和中国科学院沈阳自动化所在 AUV 方面开展的相关研究, 北京航空航天大学和中国科学院自动化所在进行水下机器鱼方面开展的相关研究等。同时, 中国科学院自动化所和北京航空航天大学机器人所联合开展的多微小型机器鱼群体协作与控制研究, 对水下移动无线传感器网络的研究也具有良好的借鉴作用。

3 研究内容及发展方向

由于工作环境和通信媒介的巨大差异, 与地面

无线传感器网络相比, 水下移动传感器网络研究面临的困难可归纳为以下几点:

1) 物理层数据传输带宽窄, 通信速率低。水声通信存在传播延迟大、传播损失大、易发生多径干扰以及误码率高等缺点^[20]。

2) 能源管理更严格。水下网络节点电池无法充电, 也无法应用太阳能电池, 而水声通信较电磁波通信发射功率大许多。

3) 成本控制。专用水声通信设备都在几万元以上, 这也是水下传感器网络无法大规模应用的瓶颈。

4) 计算和存储能力有限。水下传感器节点是一种嵌入式设备, 要求其价格低、功耗小。这些限制必然导致其携带的处理器能力较弱, 且存储器容量也较小。

5) 维护困难。水下环境复杂, 水下传感器容易损坏和腐蚀, 这使传感器网络的维护更加困难。

6) 高延迟的水声通信使得水声网络的链路控制更加困难, 基于电磁波的射频通信链路路由控制方法无法直接应用于水声通信中。

7) 水下移动节点运动与姿态保持控制。水声通信具有方向性, 为保证数据通信的连贯性和节省网络通信能量, 水下移动节点需要在水下进行比较精确的定位与姿态保持, 这也是目前水下机器人研究面临的挑战之一。

8) 水下节点三维定位方法。目前地面传感器网络定位方法大多都是基于二维环境的, 而 MUWSN 节点位置受水下环境的限制和移动节点移动特性的影响, 需要对其进行三维环境的定位。

MUWSN 是水下传感器网络与水下机器人的结合, 是基于水声的水下传感器网络物理层、链路层、网络层与水下移动机构的姿态、定位、运动和导航功能的结合。本文按照自下而上的结构, 对 MUWSN 的主要研究内容进行归纳阐述, 即移动节点、节点互联、动态组网, 如图 3 所示。

1) 移动节点。移动节点上布置了检测传感器、水声通信模块、运动控制和姿态保持模块、电源管理模块及中央处理器。

2) 节点互联。节点互联过程可完成网络内节点间水声信道的分配、节点间互相发现及相对测距, 并根据节点本身的姿态和位置信息进行网络内节点的相对定位。

3) 动态组网。多个节点进入网络后, 如何进行网络配置和拓扑构建, 从而实现传感器节点的数据回收是网络层的主要任务。同时为了实现网络通信的能量最小化, 有时需要根据节点的位置及姿态信息将转发节点移动到合适的地点。这种利用节点导

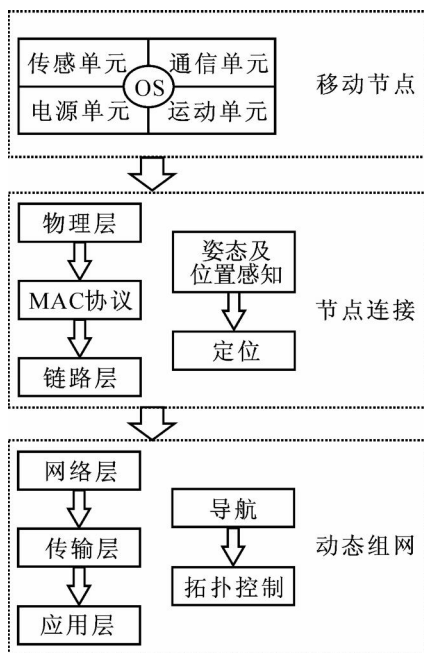


图3 水下移动传感器网络研究内容

航进行网络拓扑控制是水下移动传感器网络实现网络性能优化的重要手段。

3.1 水下移动节点

水下移动节点主要完成以下功能:水声通信、环境信息监测(传感器)、运动控制、电源管理、简单的信息处理等。

3.1.1 水声通信

水声通信的研究包括水声传播模型、水声通信模式和水声换能器等。

水声通信主要受路径损失、噪声、多途、多普勒扩展、传播延时长和延时易变的影响。这些因素决定了水声信道的时变和空变特性,使得水声信道可用的带宽有限,且取决于距离和频率,其关系如表1所示。

表1 水声传播距离与频带对应关系^[2]

	距离/km	带宽/kHz
超长	1000	< 1
长	10~100	2~5
中长	1~10	10
短	0.1~1	20~50
超短	< 0.1	> 100

水下移动传感器网络需要低功耗短距离的水声通信技术。自20世纪70年代以来,随着电子技术和信息科学的发展,水声通信技术也得到了迅速发展,新一代的水声通信系统大都采用数字调制技术。采用数字技术的重要性在于:首先,它可以利用纠错编码技术来提高数据传输的可靠性;其次,它能对时域和频域上的信号畸变(多途、多普勒扩展等)进行各

种补偿。随着处理器技术的提高,各种快速解调算法也随之发展起来。数字调制技术主要包括幅移键控、频移键控和相移键控。自20世纪90年代中后期以来,又出现了水下多载波调制技术、码分多址扩频技术以及空间分集技术等^[22]。

水声换能器是将电信号转换为可在水下远距离传播声音信号的专用设备,其性能和效率的好坏直接影响到水声通信的距离和误码率。绝大部分用于空气中的超声换能器,因封装、耐水压和阻抗匹配等参数影响而无法直接应用于水下。因此,低成本、低功耗的水声换能器是水下传感器网络研究与应用需要解决的问题之一。

针对MUWSN的应用要求,其使用的水声通信模块与专用水声调制解调器相比具有以下特点:

1) 低成本。低成本是传感器网络大规模应用的前提,整个节点的成本应控制在100 \$以内;而专用水声调制解调器价格都在10000 \$以上^[4-6]。

2) 低功耗。水下传感器网络节点采用电池供电,而且一般要求工作几个月甚至几年的时间;而专用水声调制解调器在通信过程中功耗至少在几十瓦以上。

3) 小体积。为实现水下灵活移动,移动节点设计必须灵巧,缩小水声通信部分的体积可以使其更加方便地布置、安装在小型移动节点上;而专用的水声调制解调器体积较大,在低成本的微小型移动节点上使用时相对困难。

3.1.2 水下节点运动与姿态控制

水下机器人是近年来机器人领域研究的热点问题,主要包括水下运动机构与机理的研究、水动力学研究等内容。其中低功耗、高稳定性、具有水下三维环境定位及导航功能的水下机器人是MUWSN移动节点设计的主要目标。

在MUWSN中,水下移动平台与常规水下机器人有以下几点不同:

1) 功耗低。节点采用电池供电,而且需要在水下长时间工作,移动机构是节点功耗较大的单元,因此低功耗设计是节点设计的关键。

2) 具有网络定位和导航功能。可根据数据回收或监测任务的需要进行动态组网。

3) 稳定性高。在MUWSN中,移动节点不要求很高的运动速度,但要求节点在某一区域或位置上能长时间且安全可靠地停留。

3.2 节点互联

节点互联主要完成以下功能:水声链路控制、节点间通信质量的保证、节点间相对位置和姿态信息的确定等。

3.2.1 水声信道的链路控制

在传感器网络中,MAC 协议要解决的问题包括链路控制、网络能量控制、网络扩展性以及网络效率等. 无线传感器网络与无线网络在 MAC 协议设计上的最大不同在于,前者更着重于能量控制问题的解决^[1].

目前,MAC 协议在降低功耗方面主要采用的方法有减少数据流量、增加通信模块休眠时间和冲突避免等. S-MAC 协议采用周期性侦听/睡眠的低占空比工作方式降低节点能量的消耗;邻近节点通过协商的一致性睡眠调度机制形成虚拟簇,减少节点的空闲侦听时间;通过流量自适应的侦听机制,减少消息在网络中的传输延迟;采用带内信令来减少重传和避免侦听不必要的数据. 在 MUWSN 中,MAC 层协议首先要考虑节省能量和可扩展性,其次才考虑公平性、利用率和实时性等. 在 MAC 层的能量浪费主要表现在空闲侦听、接收不必要数据和碰撞重传等.

信道占用分为共享和竞争两种方式. 基于竞争的信道占用方式主要有两种方法:

1) 载波侦听技术目前在有线或无线网络中大量应用,具有信道利用率高的特点. 但在水声通信中,由于水声传播速度较空气中电磁波信号传播速度低 5 个数量级,易引起信道冲突.

2) 基于握手信号(如 RTS/CTS)的冲突避免技术具有通信可靠性高等优点. 但这种方法也不适用于水声网络,主要有以下几方面的原因:

由于水声传播速度与通信速度的限制,RTS/CTS 信号的交替增加了网络的延迟,很大程度上影响了网络数据的传输,降低了网络吞吐量;

由于水声信号传播延迟长和不确定性,在 RTS/CTS 互换过程中有可能引起信号到达终端前节点已进入休眠,因此带来信道的浪费;

由于水声传播的延迟长和不确定性,不能预测通信节点数据包的起始时间和结束时间,由此带来了信道的浪费,也易引起信道冲突.

基于共享的信道占用方式主要有 3 种方法:

1) 信道频分复用(FDMA)采用调频的多址技术,业务信道在不同的频段分配给不同用户. 水声带宽窄,水声换能器发射频带受限,使得 FDMA 无法应用于水声通信中.

2) 信道时分复用(TDMA)采用时分的多址技术,业务信道在不同的时间分配给不同用户. 该技术要求各节点间精确地时钟同步,在高延迟的水声网络里,要求节点时间片间的保护时间段更长,因此 TDMA 在水声网络应用中存在信道利用率和网络

吞吐量低的缺点. 然而,近期对时分复用技术中时间片重新分配和网络时序重新规划的研究也取得了进展^[23],由此可提高 TDMA 的信道利用率.

3) 信道码分复用(CDMA)采用扩频的码分多址技术. 所有用户在同一时间、同一频段上,根据不同的编码获得业务信道. CDMA 系统最大的好处在于所有节点可以异步地共享整个频带资源,即不同用户码元发送信号的时间并不要求同步. 码分多址是水声通信最佳的方式,但其设计与实现较为复杂.

在水声通信这一特殊的应用环境中,TDMA 方案与 FDMA,CDMA 以及随机接入等其他多址方案相比,除了简单且技术成熟外,其主要优点是:1) 由于数据只在分配给自己的时间片瞬时发送,大部分时间内发射机可以停机,这样可减少水环境中宝贵的能量消耗;2) 由于 TDMA 方案中各节点所用的调制解调器可采用同样的硬件结构,在每个发射周期内分配给不同节点的时间片可根据实际情况进行调整. 因此,TDMA 已成为当前水声网络链路控制的主要方法之一. 但是,TDMA 用于长延迟的水声网络时存在效率低、网络吞吐量低的缺点. 文献[23, 24]分别提出了 TDMA 时间片分配的优化方法,结合了 CSMA 和 TDMA 在网络繁忙和空闲时的各自优势,提高了 TDMA 网络的信道利用率.

3.2.2 链路层协议

受传播损失和多途干扰的影响,水声信道的误码率高达 $10^{-2} \sim 10^{-5}$. 如何提高通信效率并降低误码率不仅与水声通信调制方式有关,而且与信源编码也有直接关系. 信源编码的目的是通过在数据发送前增加一些校验或纠错位,接收端根据这些校验或纠错码对数据进行纠错,以此来改正传输过程中部分比特的错误,减少重发,从而降低误码率. 由于水声信道的高延迟和低速率,以太网或无线网络中采用的 ARQ(自动重传请求)技术不适用于 MUWSN. 前向纠错技术可以应用到 MUWSN 中,但如何解决冗余位长度与信道效率的矛盾是其主要问题,即增加冗余位虽然可以减小通信的误码率,但却降低了通信的效率,同时还增加了通信功耗.

3.2.3 姿态及定位方法

MUWSN 水下环境定位相比于地面传感网络定位,其主要区别在于三维环境中的节点姿态控制和相对定位,因为水流或周围环境会使节点在水中晃动或上下浮动. 节点根据自身的姿态信息和目标位置的定位信息,可进行较精确的水下环境导航,由此实现动态拓扑控制,提高网络通信效率和监测密度.

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.

目前,水下定位普遍采用 GPS 和水深测量定位、水下长基线定位、超短基线定位、多波束探测定位等技术.这些定位技术的定位精度都在几十米,无法满足水下移动传感器网络的要求.基于差分 GPS 技术的水下定位导航系统可将陆地的 GPS 功能扩展到水下,实现水下精密定位导航.

根据已知节点位置信息和其他节点与这些节点的相对距离进行网络内的相对定位也是目前较常使用的方法^[25],如 TOA(到达时间),TDOA(到达时间差)等.

在 MUWSN 的节点互联中,目前主要工作集中在以下几方面:

1) 高效的水声链路控制方法.水声传播速度慢、通信速率低,如何在水声网络中高效地利用水声信道是目前研究的重点问题.目前应用较多的 TDMA 协议存在效率低、易引起通道冲突等问题.如何改进 TDMA 时间片分配方法以提高信道利用率,是目前研究的热点问题之一.

2) 短距离水声通信编码方法.水声信号短距离传播易受多途信号或其他噪声信号干扰.脉冲位置调制技术可减小短距离通信的多途干扰,但这种方法以降低通信速率为代价^[4,5].

3) 节点姿态计算方法.根据节点的多个姿态或位置传感器进行数据融合,计算当前节点的姿态信息,以便得出节点在网络内的坐标并进行导航.

4) 三维环境定位方法.节点处理器资源有限,为节省能耗,节点无法处理复杂的数学运算.根据与相邻节点的距离和自身的姿态信息进行坐标变换以确定节点网络内的位置,是目前 MUWSN 研究的热点问题之一.

3.3 动态组网方法

节点移动或链路状态变化会引起网络拓扑改变,这时节点需要根据连通状况进行动态组网.动态组网涉及的内容包括:基于水声链路的路由方法、水下环境导航及拓扑控制研究等.

3.3.1 动态路由方法

由于衰落和多途传输特性,水声链路质量是不可预测的,此时,可靠的具有容错能力的路由算法对于 MUWSN 是非常重要的.路由算法应能检测和处理由节点失效、节点移动或节点能源耗尽所引起的链路中断.基于地理位置的路由协议,还需要与有效的水下定位技术相结合.

在 MUWSN 中,路由协议需要高效利用能量,同时由于节点数目较多,每个节点只能获取局部拓

扑结构信息.路由策略应能在局部网络信息的基础上选择合适的路径.在水下移动传感器网络中,路由机制还应与节点的定位及姿态信息进行融合,通过减少通信量来节省能量.

针对 MUWSN 的上述特点,在具体应用设计路由协议时,应满足以下要求:

1) 能量高效.水声通信网络的资源有限,网络路由协议应能简单且高效地实现信息传输.

2) 可扩展性.在 MUWSN 中,监测区域范围或节点密度不同,造成网络规模大小不同;节点失败、新加入节点或节点移动等,都会使网络拓扑结构动态发生变化,这就要求路由协议应具有可扩展性,能够适应网络结构的变化.

3) 稳定性.水下环境复杂,通信链路不稳定,路由协议应具有一定的容错能力.

4) 快速收敛性.水下节点能量和通信能力有限,要求路由协议应能快速收敛,以适应网络拓扑的动态变化,减少通信协议开销,提高信息传输的效率.

3.3.2 动态拓扑控制

网络拓扑在网络能量消耗、网络容量和可靠性方面起着决定性的作用.为了避免单个节点或多个节点失效而导致整个监视任务失败,传感器网络的高可靠性是非常重要的.由于水声信道的容量有限,设计网络拓扑时应避免产生通信瓶颈.

目前水声通信网络拓扑控制主要研究的问题是,在满足网络覆盖度和连通度的前提下,通过概率控制和骨干网节点的选择,剔出节点间不必要的链路,生成一个高效的数据转发的网络拓扑结构.

拓扑结构可以分为节点功率控制和层次性拓扑结构两个方面.功率机制调节网络中每个节点的发射功率,在满足网络连通度的前提下,减少节点的发射功率,以均衡节点单跳可达的邻居数目.层次性的拓扑控制利用分簇机制,让一些节点作为簇头节点,由簇头节点形成一个处理并发数据的骨干网,其他非骨干网节点可以暂时关闭通信模块,进入休眠状态以节省能量.

除了传统的功率控制和层次型拓扑控制,人们还提出了启发式的节点唤醒和休眠机制.该机制能使节点在没有事件发生时设置通信模块为睡眠状态;而在有事件发生时能及时自动醒来并唤醒邻居节点,形成数据转发的拓扑结构.这种机制的重点在于解决节点在睡眠状态和活动状态之间的转换问题,而不能独立作为一种拓扑结构的控制机制,因此需要与其他拓扑控制算法结合使用.

拓扑控制的目标有 3 个:

1) 提高网络数据回收的效率,使节点分布更有利于数据通信;

2) 提高节点利用率,在保证通信和监测要求下,减小单位面积内节点的个数;

3) 增强移动节点作为监测节点或中转节点的功能,降低系统通信功耗,延长网络寿命。

4 应用前景

水下移动无线传感器网络的结构特点,使其具有广泛的应用空间.主要体现在以下几个方面:

1) 环境监测.通过在河流、浅海、湖泊中布置传感器网络,可以完成水域 3D 环境重构,实时水质监测等任务^[20].通过对洋流和风向数据的监测,可以对天气预报提供有效的参考数据;通过监测海洋气候的变化,可以了解并预测渔业对海洋生态系统的影响。

2) 灾害预测.监测水下地震活动的传感器网络可以向海岸区域提供海啸预警信号,或研究海底地震活动规律。

3) 辅助导航.水下移动传感器网络也可以用来识别海床的障碍物、定位浅海的岩石、漂浮物的位置、失事船只位置等。

4) 海洋资源探测.装备了水声和光传感器的多 AUVs 联合形成水下移动传感器网络,能够实现快速的水下油气或煤炭资源勘探。

5) 侦察预警.在关键航道和港口等附近布置传感器网络,以监测外部变化,对可能的危险或威胁发出预警。

5 结 论

水下移动传感器网络集成了水下机器人的机动特性和水下传感器网络组网能力,解决了传统水下监控系统的诸多问题,例如,无法实现节点投放与回收、容易存在监测盲区、不能动态组网等.本文在归纳总结国内外关于水下移动传感器网络相关研究现状的基础上,按照自下而上的体系结构,对水下移动传感器网络研究内容进行了分类归纳,为水下移动传感器网络进行深入的研究提供了较清晰的思路。

尽管 MUWSN 的研究面临着许多挑战,但它可以解决传统水下监控网络的众多弊端,实现动态的水下组网.我国海岸线广阔、河道纵横、湖泊广布,这为水下移动无线传感器网络的应用提供了巨大空间.相信水下移动无线传感器网络的研究和应用必将有助于我国的经济、技术发展和国防建设。

参考文献(References)

[1] Ian F Akyildiz, Dario Pompili, Tommaso Melodia. Underwater acoustic sensor network: Research challenges[J]. *Ad Hoc Networks*, 2005, 3(3): 257-

279.

- [2] Jur-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.
- [3] 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, 2006.
(Sun G Z, Research on routing protocol of underwater acoustic networks [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006.)
- [4] Lanbo Liu, Shengli Zhou, Jur-Hong Cui. Prospects and problems of wireless communications for underwater sensor networks [J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2008, 8(8): 977-994.
- [5] 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.
- [6] Pen Xie, Jur-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.
- [7] Zheng Guo, Goele Colombi, Bing Wang, et al. Adaptive routing in underwater delay/disruption tolerant sensor networks[C]. *Proc of the 5th IEEE/IFIP Annual Conf on Wireless on Demand Network Systems and Services*. Germany, 2008: 31-39.
- [8] Vasilescu, Kotay K, Rus D, et al. Data collection, storage, and retrieval with an underwater sensor network[C]. *Proc of ACM SenSys 2005*. San Diego, 2005: 154-165.
- [9] Carrick Detweiler, Iuliu Vasilescu, Daniela Rus. An underwater sensor network with dual communications, sensing, and mobility[C]. *Proc of ACM SenSys 2007*. Sydney, 2007: 154-165.
- [10] John Heidemann, Wei Ye, Jack Wills, et al. Research challenges and applications for underwater sensor networking [C]. *Proc of IEEE Wireless Communications and Networking Conf*. Las Vegas, 2006: 228-235.
- [11] Jack Wills, Wei Ye, John Heidemann. Low-power acoustic modem for dense underwater sensor networks [C]. *Proc of the First ACM Int Workshop on Underwater Networks*. Los Angeles, 2006: 79-85.
- [12] Wei Ye. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks [J]. *IEEE Trans on Networks*, 2004, 12(3): 493-506.
- [13] Affan A Syed, Wei Ye, John Heidemann. T-Lohi: A new class of MAC protocol for underwater acoustic sensor networks[C]. *Proc of 27th IEEE Int Conf on Computer Communications*. Anchorage, 2008: 231-235.

(下转第 812 页)

- vector machine[J]. Control and Decision, 2004, 19(5), 481-485.)
- [9] 陈爱玲, 杨根科, 吴智铭. 一种混合模型在 30MnSi 钢变形抗力预测中的应用[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(10): 1723-1726.
(Chen A L, Yang G K, Wu Z M. Application of a hybrid model in the prediction of the flow stress of 30MnSi steel [J]. J of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40(10): 1723-1726.)
- [10] 袁小芳, 王耀南. 基于混沌优化算法的支持向量机参数选取方法[J]. 控制与决策, 2006, 21(1): 111-114.
(Yuan X F, Wang Y N. Selection of SVM parameters using chaos optimization algorithms [J]. Control and Decision, 2006, 21(1): 111-114.)
- [11] 张彤, 王宏伟, 王子才. 变尺度混沌优化方法及其应用[J]. 控制与决策, 1999, 14(3): 285-288.
(Zhang T, Wang H W, Wang Z C. Mutative scale chaos optimization algorithm and its application [J]. Control and Decision, 1999, 14(3): 285-288.)
- [12] 李亚东, 李少远. 一种新的遗传混沌优化组合方法[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(1): 143-145.
(Li Y D, Li S Y. A new genetic chaos optimization combination method [J]. Control Theory and Applications, 2002, 19(1): 143-145.)
- [13] Suykens Johan A K, Gestel Tony Van, Brabanter Jos De. Least squares support vector machines [M]. Singapore: World Scientific Publishers, 2003.

(上接第 807 页)

- [14] 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.
- [15] Winston K G Seah, Hwee-Xian Tan. Multipath virtual sink architecture for underwater sensor networks [C]. OCEANS 2006 — Asia Pacific. Singapore, 2006: 1-6.
- [16] Ayers J. Underwater walking [J]. Arthropod Structure and Development, 2004, 33(3): 347-360.
- [17] Zhizhong Shen, Shuo Wang, Min Tan, et al. Robotfish-based underwater mobile sensor networks for environmental monitoring [C]. Proc of the 15th (2005) Int Offshore and Polar Engineering Conf. Seoul, 2005: 551-556.
- [18] 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.)
- [19] 蔡惠智, 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.)
- [20] 李淑秋, 李启虎, 张春华. 水下声学传感网络的发展和
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.)
- [21] Shuo Wang, Min Tan. Research on architecture for reconfigurable underwater sensor networks [C]. Proc of IEEE Conf on Networking, Sensing and Control. Arizona, 2005: 831-834.
- [22] Chao Lu, Shuo Wang, Min Tan. Design and realization of sensor nodes for dense underwater wireless sensor networks [C]. Proc of the 17th World Congress of the Int Federation of Automatic Control. Seoul, 2008: 12819-12824.
- [23] Injong Rhee, Ajit Warrier, Jeongki Min, et al. DRAND: Distributed randomized TDMA scheduling for wireless ad-hoc networks [C]. Proc of MobiHoc '06. Florence, 2006: 190-201.
- [24] Ajit Warrier, Mahesh Aia, Jeongki Min, et al. Z-MAC: A hybrid MAC for wireless sensor networks [J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 2008, 16(3): 511-524.
- [25] 孙利民, 李建中, 陈渝, 等. 无线传感网络 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
(Sun L M, Li J Z, Chen Y, et al. Wireless sensor networks [M]. Beijing: Publishing House of Tsinghua University, 2005.)