

水下无线传感器网络

王静, 陈建峰, 张立杰, 黄建国

(西北工业大学航海学院, 西安 710072)

摘要: 水下无线传感器网络是一种包括声、磁场、静电场等的物理网络, 它在海洋数据采集、污染预测、远洋开采、海洋监测等方面取得了广泛的应用, 将在未来的海军作战中发挥重要的优势。描述了水下无线传感器网络的研究现状, 给出了几种典型的水下无线传感器网络的体系结构, 并针对水下应用的特点, 分析了水下无线传感器网络设计中面临的节点定位、传感器网络能量、目标定位等诸多难题, 最后根据应用需求提出了水下无线传感器网络研究的重点。

关键词: 水下无线传感器网络; 能量; 定位

中图分类号: TN915

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2009)-01-0089-07

Underwater sensor networks

WANG Jing, CHEN Jan-feng, ZHANG Li-jie, HUANG Jian-guo

(College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Underwater sensor networks are physical networks containing acoustic, magnetic, and static electric field. It has got widely application in ocean data acquisition, pollution forecasting, ocean exploitation, and ocean supervision. And in future it will show its advantages in the battlefield. The state-of-the-art underwater wireless sensor networks are overviewed, and several typical structures of underwater wireless sensor networks are also described. Taking account of the requirements of underwater applications several fundamental key aspects in the design of underwater sensor networks, such as node localization, energy, source localization and other challenges are investigated. Finally open issues in underwater sensor networks are discussed.

Key words: underwater wireless sensor networks; energy; localization

1 引言

水下无线传感器网络是使用飞行器、潜艇或水面舰将大量的(数量从几百到几千个)廉价微型传感器节点随机布放到感兴趣水域, 节点通过水声无线通信方式形成的一个多跳的自组织的网络系统, 协作地感知、采集和处理网络覆盖区域中感知对象的信息, 并发送给接收者。近年来, 水下无线传感器网络技术在国内外受到普遍关注, 正在被广泛用于海洋数据采集, 污染预测, 远洋开采, 海难避免, 海洋监测等。

水下无线传感器网络具有传统传感器技术无法比拟的优点^[1]: 传感器网络是由密集型、成本低、随机分布的节点组成的, 自组织性和容错能力使其不会因为某些节点在恶意攻击中的损坏而导致整个系统的崩溃; 分布节点的多角度和多方位的信息

融合可以提高数据收集效率并获得更准确的信息; 传感网络使用与目标近距离的传感器节点, 从而提高了接收信号的信噪比, 因此能提高系统的检测性能; 节点中多种传感器的混合应用使搜集到的信息更加全面地反映目标的特征, 有利于提高系统定位跟踪的性能; 传感器网络扩展了系统的空间和时间的覆盖能力; 借助于个别具有移动能力的节点对网络的拓扑结构的调整能力可以有效地消除探测区域内的阴影和盲点。因此, 传感器网络能够应用于恶劣的战场环境。在军事领域, 通过多传感器系统的密切协调, 形成空-舰-陆基传感器构成的多传感器互补监视网络, 对目标进行捕获、跟踪和识别。

水下无线传感器网络由于其应用环境的特殊性, 要考虑海水盐度、压力、洋流运动、海洋生物、声波衰减等对传感器网络的影响, 使水下无线传感器网络的设计比陆地无线传感器网络更难, 对硬件的要求更高。水下无线传感器网络与陆地无线传感器网络系统的各个模块对比如表1所示。

2 水下无线传感器网络的研究现状

收稿日期: 2008-4-24; 修回日期: 2008-7-14

基金项目: 西北工业大学科研启动基金(07XE0124)

作者简介: 王静(1986-), 女, 河南商丘人, 硕士研究生, 研究方向为信号与信息处理, 水下传感器网络定位技术。

通讯作者: 王静, E-mail: wangjing0407j039@yahoo.com.cn

表 1 水下和陆地无线传感器网络的对比
Table 1 Comparison between underwater and terrestrial wireless sensor networks

	传感器	能源	通信模块	速率	通信信号	工作方式	硬件配置
水下无线传感器网络	压力、射线、声、磁传感器	电池	声 MODEM	慢	声信号	响应(reactive) ^[2]	高开销
陆地无线传感器网络	光、温度、湿度、振动传感器	太阳能、风能、电	射频模块	快	电磁波、光、射频信号等	响应、主动(proactive) ^[2]	低廉

由于水下无线传感器网络的巨大应用价值,它已经引起世界许多国家军事部门的极大关注。水下传感器网络技术的发展甚至影响到海军军事战略的变革。由于水下传感器网络技术的发展,未来的海战可充分发挥近海空间优势。

最早开展水下无线传感器网络研究的国家是美国,早在上世纪 50 年代,美国就在大西洋和太平洋中耗巨资建设庞大的水声监视系统(SOSUS)。近几年美国水下无线传感器网络的较大的项目有:1999~2004 年美国海军研究办公室的 SeaWeb 计划^[3];2004 年哈佛大学启动的 CodeBlue 平台研究计划^[3];在美国海军潜艇联合会举行的 2006 年潜艇技术论坛上,披露了“近海水下持续监视网”PLUSNet 计划,预计在 2015 年前后具备完全作战能力;洛克希德·马丁公司为美国海军研制能够适应近海海域环境、可以快速布防的先进部署系统(ADS),被用于探测水下敌方潜艇。

随着水下传感器网络技术的成熟,逐渐转向民用。在民用领域主要用于海洋环境和海洋生物监测、海底科学实验等。水下传感器网络主要的民用工程有:MBARI 建立的海洋生化监测系统(LOBO)和海洋监测系统(MOOS)^[4-7]、北太平洋中铺设的有缆绳海洋监测系统 NEPTUNE 工程^[8]和设在纽约西长岛南部的前沿分析观测网络和遥测(FRONT)系统^[9]。

2006 年国家自然科学基金将水下移动传感器网络的关键技术列为重点研究方向。中国科学技术大学、沈阳自动化研究所、中科院计算所等多家高校和研究单位均已开展了无线传感器网络相关领域的研究。2007 年由中科院上海微系统与信息技术研究所等单位联合承担的“无线传感器网络关键技术及其在道路中的应用示范研究”项目通过验收。

随着水下无线传感器网络技术的发展,水下无线传感器网络的节点概念已经由传统的传感器扩大到包括 AUV、蛙人、舰艇、潜艇、鱼雷、水雷和水面浮标等在内的新概念节点形式。新的水下无线传感器网络克服了传统水下无线传感器网络的性能单一、时效差、造价高和布设困难的缺点,具有

布防更灵活、适应环境的能力更强、搜集信息更快捷的特点。

新一代的水下网络不仅仅是水声网络,而是一种包括水声、磁场、静电场等综合性的物理网络。它是集侦察、警戒、指控、通信、导航、定位、目标攻击、综合作战能力的体系。

3 水下传感器网络的基本结构和特征

传感器网络系统通常包括传感器节点、汇聚节点(接收器)和管理节点(服务器)。传感器节点监测的数据沿着传感器骨干节点(簇首)多跳地进行传输,在传输过程中监测数据可能被多个节点处理,经过多跳后路由到汇聚节点,最后通过互联网或卫星到达管理节点。用户通过管理节点对传感器网络进行配置和管理,发布监测任务以及收集监测数据。其体系结构示意图如图 1 所示。

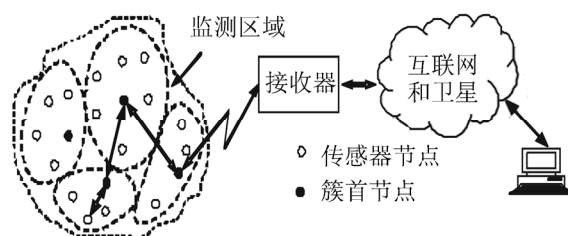


图 1 无线传感器网络结构

Fig.1 The structure of wireless sensor networks

水下传感器节点主要由一个主控制器或 CPU 组成。这个控制器通过接口电路与传感器相连。控制器接收传感器的数据,存储在内存中,然后处理这些数据,并通过声 MODEM 发送给其他网络节点。其内部结构如图 2 所示。

水下传感器网络的拓扑结构是一个开放的研究领域,目前研究的水下无线传感器网络有二维、三维静态网络和带有 AUVs 的三维网络。

图 3 和图 4 分别给出了二维静态网络和基于海底的三维静态网络的示意图。两种结构中传感器节点被布置在海底。二维静态网络中的传感器网络节点被固定在海底,自组形成簇,节点采集的信息直

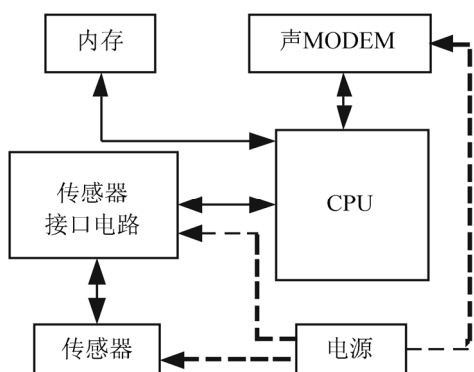


图2 一个水下传感器节点的内部结构
Fig.2 The inner structure of an underwater sensor node

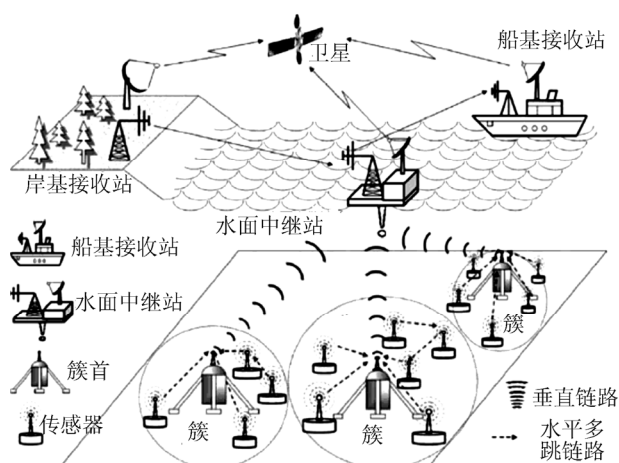


图3 二维静态网络体系结构^[10]
Fig.3 Architecture of 2D underwater sensor network^[10]

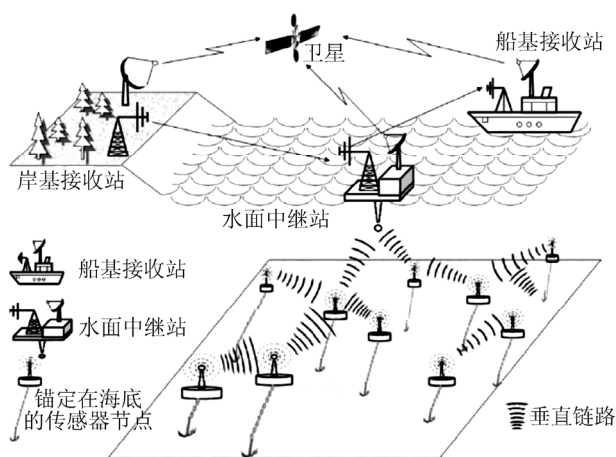


图4 基于海底的三维静态网络体系结构^[10]
Fig.4 Architecture of 3D underwater sensor networks based on seafloor^[10]

接或多跳地传送给簇首，通过簇首传送给水面中继站或船基接收站，然后与岸基接收站通信，到达数据处理中心。三维静态网络的节点通过锚链被锚定在海底，通过调整锚链的长度形成分布在海底的三维网络，每个传感器节点必须能够中继采集的信息到水面汇聚节点，因此要求每个节点到水面中继站至少有一条链路存在，它比二维网络更好的获得水

下采样。两者的特点是不影响航行，不易被发现，但布置和维护难度大。

图5是基于水面浮标的三维静态网络。该水下无线传感器网络中的每一个传感器节点带有一个水面浮标，与图4中三维静态网络中每个传感器节点带有的浮标不同，开始传感器节点位于漂浮在水面的浮标里，这些浮标被投放后，传感器节点被放置到水下已经计算好的深度，形成三维的传感器节点分布空间。每个传感器节点由一群传感器组成，属于一个传感器节点的传感器在水下同一深度，传感器和浮标通过缆绳通信，传感器节点间通过无线信号通信，数据采集浮标搜集传感器节点的数据。该结构的特点是：便于布置和维护，成本低，容易被发现，对外界的天气变化敏感，传感器节点会流动。

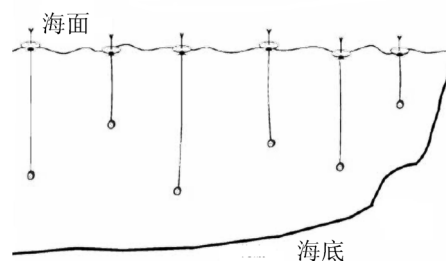


图5 基于水面浮标的三维静态网络体系结构^[11]
Fig.5 Architecture of 3D underwater sensor networks based on the surface buoys^[11]

带AUVs的三维水下通信网络是对静态网络功能的扩展。AUVs可以在没有缆绳、远程控制的情况下进行工作，所以它们在海洋学、环境监测、水下资源开发中有着广泛的应用。使用AUVs可以增强水声通信网络的能力。这种网络通过命令AUVs到网络中的某些节点处完成网络的自适应采样和网络自我配置。

设计AUVs的目标之一是使它们依靠自身的智能，而很少依靠岸上控制中心的在线控制。

在东北太平洋上的NEPTUNE有缆海洋监测系统使用了AUVs，用于扩展海洋中和海底的无线传感器网络^[10]。图6给出了它的示意图。

4 研究中面临的问题

4.1 水下声传播的特点

陆地上的传感器网络主要靠射频(RF)信号传送信息，而在水下，高频的RF信号传播衰减很大，事实上，在水下使用的无线电波的频率仅在低频段(30Hz~300Hz)，而且需要较高的发射功率。光信号

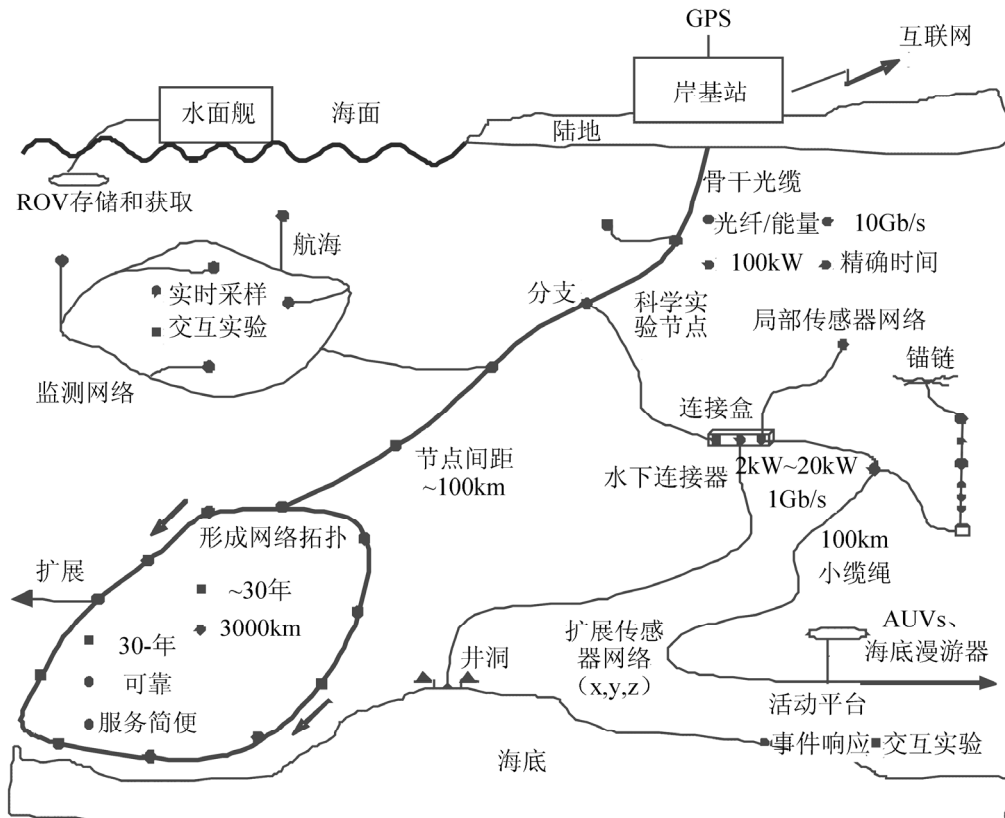


图6 有缆水下监测系统的基本元素^[12]
Fig.6 Essential elements of a cabled observatory^[12]

不像 RF 信号那样有较高的传播衰减，但是有较大的散射。因此，水下无线传感器网络是基于声信号的无线通信。

水下声信道的限制带宽和各种延迟要求新的可靠的通信协议。水声无线网络的设计中存在的主要困难是^[10]：

- (1) 水声信号可实现的带宽被严格的限制；
- (2) 水下信道由于多通道导致严重的衰落，而且水下的衰减是多变的；
- (3) 由于传感器节点的流动性和能量消耗殆尽导致节点“死亡”，可能造成通信连接的不可靠，比特率出错高和暂时的通信中断可能会出现；
- (4) 节点的通信范围小，导致网络不能实时处理数据；
- (5) 在水下不能使用太阳能，电池的能量有限并且不可被更换；
- (6) 水下无线传感器网络的实时性和能量问题是一对矛盾，信息处理结构的变化使软件必须重新设计；
- (7) 水下传感器节点会由于密度大而拥塞出现错误。

基于水下声信号传播的特点列出水下无线传

感器网络中的设计中存在的主要问题。

4.2 水下无线传感器网络设计中的问题

4.2.1 传感器节点定位问题

水下传感器网络节点是随机放置的，因为数目众多，节点体积很小和费用上的考虑，每个节点都有 GPS 定位系统是不可能的，另外，布放后每个节点位置不是固定的，可能随洋流漂流，给节点的自身定位提出了挑战。

定位是军事应用的基础。定位问题包括两部分：节点自身定位和外部目标定位，前者是后者的基础。

基于参考节点的节点自身定位问题，很多学者提出了很多定位的方法，这些算法的目的在于使得传感器节点能够被随机地布置在一个给定的区域，并能根据一些参考节点而自动检测它们的自身位置。

无线传感器网络中需要定位的节点称为未知节点(unknown node)，通过人工部署或 GPS 系统已知位置的节点称为锚节点(anchor)。节点的定位包括：绝对定位和相对定位、集中式定位和分布式定位、基于测距的定位和无需测距的定位。绝对定位的结果是一个标准的坐标位置，如经纬度。相对定

位通常是以网络中部分节点为参考,建立整个网络的相对坐标系统。集中式定位是把信息传送到某个中心节点进行定位计算的方式,便于从全局角度统筹规划,获得相对精确的位置估计。分布式定位是尽量将计算量分摊到网络中的各个节点上,以减小对中心节点的计算能力的要求。

无线传感器网络中绝大多数现有的定位方法都包含两个基本步骤:距离(或角度)测量和定位计算。目前的定位方法有^[3,13,14]:基于接收信号能量的RSSI定位算法;基于信号到达时间的TOA定位算法;基于信号到达时间差的TDOA定位算法;基于邻节点发送信号角度的技术AOA算法。计算节点位置的方法有:三角测量法、三边测量法、多边测量法、质心定位算法、多跳定位算法APS、APIT定位算法、极大似然估计法、Hop-Euclidean定位算法和多维定位算法MSD等。

在水下无线传感器网络中,通常由于传感器放置于水下,网络节点无法获知确定的位置信息,要求可实现分布式无锚节点的WSN节点定位机制^[15]。

针对水下WSN会存在很多移动的传感器节点,如AUV、移动机器人等,目前出现了许多移动节点的定位方法^[16,17]。

WSN定位算法的性能直接影响其可用性。评价定位算法的标准主要有:定位精度、规模、锚节点密度、节点密度、覆盖率、容错性和自适应性、功耗和代价。

4.2.2 系统能源问题

由于水下无线传感器网络的应用特点,使得更换水下节点电池非常困难,因此无线传感器网络的能耗一直是研究人员关注的焦点。传感器网络节点的能源主要消耗在信息传输和数据处理,而且传输信息比数据处理更消耗电能。软件上采用好的拓扑控制算法、高效的通信协议和路由协议,硬件上节点内部结构的合理设计、采用低功耗的芯片和改进电池性能是节省能源的关键。

目前关于传感器在实时应用的能量有效计算问题形成了很多拓扑算法。例如,最小能量途径的算法(LBMER)、HCAN、CDS(Connected Dominating Set)、JSD、蚁群算法等^[18-22]。所有的这些算法都是基于节约能量的算法。

在无线传感器网络中,介质访问控制(MAC)协议决定无线信道的使用方式,在传感器节点之间分配有限的无线通信资源,用来构建传感器网络系统的底层基础结构。根据传感器节点无线通信模块发送、接收、侦听和睡眠四个状态消耗能量顺序依次

减少的特点,传感器网络MAC协议为了减少能量的消耗,通常采用“侦听/睡眠”交替的无线信道使用策略。采用简单高效节能的MAC协议是无线传感器网络设计应考虑的问题。

与传统网络的路由协议不同,无线传感器网络的路由协议是基于能量优先的。路由协议的设计目标是,应尽可能地降低能耗,提高能量使用的有效性,避免过度使用低能量节点,从而延长网络生命周期。同时路由协议不能占用大量的存储空间,尽量减少计算量。

在硬件上,针对传感器节点传输能力有限和传输距离有限,往往需要布设大量节点,廉价和低功耗的传感器节点正在被不断设计出来。设计新的试验平台减小能耗是研究者研究的方案,出现了Mica2和MicaDot2,以及NASA JPL实验室的Sensor Web。Mica2选配了新的微处理器和射频芯片,修正Mica的一些技术缺陷。Mote系列的第四代节点Telos设计上出现了很大改进,通过选用新的微处理器减小休眠工作电流和系统唤醒时间,能耗显著降低。国内也有许多研究机构根据各自应用的需要开发出了新的节点。电池技术的进步已逐步在减轻传感器网络的能源瓶颈。加州大学洛杉矶分校、佛罗里达大学、犹它大学和海军研究实验室用微机电系统(MEMS)技术开发三维形状的微型电池,有望突破这一限制。水下无线传感器网络中使用风能和太阳能也并非不可能,MBARI已经设计出了通过水面浮标搜集风能和太阳能,并通过水下缆绳传输给每一个网络节点^[23]。

4.2.3 目标定位跟踪

声信号目标定位方法从物理处理角度大致分为几大类:AOA、TDOA、DOA和RSSI(或SRP)。基于AOA技术定位不仅能确定目标的坐标,而且能够确定目标的角度信息,但是AOA测距技术容易受外界环境的影响,而且AOA需要额外硬件,在硬件尺寸和功耗上不适用于大规模的传感器网络^[14]。目前常用的声源定位方法主要是TDOA、DOA和RSSI。该三类定位方法的综合对比如表2所示。

水下目标的跟踪往往涉及数据融合,融合就是将来自多个传感器或多源的信息进行综合处理,从而得出更准确可信的结论。目标的跟踪包括几个阶段:探测、分类、定位、预测和跟踪。目标的探测需要建立合适的门限,超过门限,判有目标,否则无目标;分类是判断目标的有无及目标个数;定位最常用的方法是极大似然估计(ML)定位算法,可以

表 2 三种定位方法总结
Table 2 Summary of three localization methods

	TDOA	DOA	RSSI(或 SRP)
信号类型	宽带信号	窄带自相关信号	宽带、窄带信号
典型信号	声信号、地震波信号	红外线、磁信号	声信号、电磁波
适用范围	近程或远程	近程或远程	近程
算法性能	GCC-PHAT ^[24] 降低由于混响产生的跃变 SRP-PHAT ^[25] 鲁棒性强、计算复杂 GCC-SI/ML ^[25] 容错性强、收敛快、实时性好	仅可判断目标方位,不能给目标定位	NLS ^[26] 估计精度高、信号带宽窄、不稳定 基于 LS ^[27] 的算法计算量小 ML ^[28] 算法处理多目标、精度高、计算复杂
对硬件的要求	高精度设备	设备复杂	适中

得到很好的定位结果,但对参数变化敏感,且在多目标跟踪环境下实现复杂度较高;预测是根据采集数据,建立目标的运动方程,预测目标的运动轨迹。

4.2.4 其 它

(1)水下无线传感器网络的安全性问题。在军事应用中,传感器网络的安全问题不可忽视,对数据的采样传输和物理节点的分布都有很高的要求。由于传感器网络的自身特点使得传感器网络安全问题的解决思路和方法与传统网络安全问题不同。主要表现在:有限的存储空间和计算能力;缺乏后期节点布置的先验知识;布置区域的物理安全无法保证;有限的带宽和通信能量;整个网络的安全问题和应用相关性。传感器网络的安全问题是一个开放的、活跃的研究领域。

(2)网络的实时性。由于在军事上被用于目标跟踪,要求传感器网络能实时地反映目标的运动信息。

(3)固定区域内布置传感器节点的最佳数量。要找出不同类型和位置的传感器,使覆盖面(Coverage)最大,代价(Cost)最小,这是一个 NP 问题。一种办法是找到一种覆盖路径,使路径到各节点的距离之和最大,也就是覆盖面最大,同时使这条路径距离最近传感器节点的距离最小。

5 结 论

水下无线传感器网络是一个大的系统,其中的硬件、软件的技术问题很多。本文总结了水下传感器网络中已有的研究,重点阐述了传感器网络节点自定位、系统的能源问题和基于声信号的目标定位方法,对影响传感器网络性能的一些重要因素进行了阐释。今后要做的是,考虑所有对传感器网络的性能有较大影响的因素,在运算量和定位精度之间有一个折中时,寻求一种目标定位跟踪方法,达到

最好的定位效果。

参 考 文 献

- [1] 丁晋俊,李志刚. 传感器网络在战场目标定位跟踪中的应用[J]. 电子对抗, 2006, (3): 22-25.
DING Jinjun, LI Zhigang. Application of sensor network in target localization and track in battlefield[J]. Electronic Warfare, 2006, (3): 22-25.
- [2] Arati Manjeshwar and Dharma P. Agrawal, TEEN: A routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks[R]. International Proceedings of 15th Parallel and Distributed Processing Symposium, 2001: 23-27.
- [3] 胡荣春. 无线传感器网络中的节点定位方法研究[D]. 中国科学技术大学硕士学位论文, 2007.5.
HU Rongchun. Research on methods of wireless sensor networks node localization [D]. University of Science and Technology of China. 2007.5.
- [4] T. O'Reilly, R.A. Herlien, et al. Satellite link management for an ocean observing network[A]. MTS 2007[C].
- [5] Walter Paul, Mark Chaffey, et al. The use of snubbers as strain limiters in ocean moorings[R]. Proceedings of MTS/IEEE, September 2005.
- [6] Andrew Hamilton, Mark Chaffey. Use of an electro-optical-mechanical mooring cable for oceanographic buoys: Modeling and validation[A]. 2005 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering[C]. 2005: 12-16.
- [7] Luke J. Coletti, Steve E. Fitzwater. Wireless network allows monitoring of a dynamic coastal resource. monterey bay aquarium research institute[R]. OS45D-25.
- [8] CHAN Ting, LIU Chen-Ching, Bruce M. Howe, et al. Optimization based load management for the NEPTUNE power system[A]. IEEE Power Engineering Society General Meeting[C]. 2007: 1-6.
- [9] James O'Donnell1, Dan Codiga1, Christopher Edwards, et al. Front resolving observational network with telemetry (FRONT) [P]. A National Oceanographic Partnership Program Award, Award Number: N00014-99-1-1020.
- [10] Ian F. Akyildiz , Dario Pompili, Tommaso Melodia. Underwater acoustic sensor networks: research challenges[J]. Ad Hoc Networks, 2005, (3): 257-279.
- [11] Erdal Cayirci, Hakan Tezcan, et al. Wireless sensor networks for underwater surveillance systems[J]. Ad Hoc Networks, 2004, 4(4): 431-446.
- [12] Bruce M. HOWE and Timothy MCGINNIS. Sensor networks for cabled ocean observatories[A]. IEEE 2003[C]. 216-221.
- [13] 王焱欣. 无线传感器网络中的自定位研究[D]. 中国科学技术大学硕士学位论文, 2007.5.
WANG Yanxin. Research on wireless sensor networks source localization [D]. University of Science and Technology of China. 2007.5
- [14] 孙利民, 李建中, 陈渝, 等. 无线传感器网络[M]. 清华大学出版

- 社, 2005, 135-155.
- SUN Limin, LI Jianzhong, CHEN Yu, et al. Wireless sensor networks [M]. TsingHua University Press. 2005. 135-155.
- [15] Adel Youssef and Ashok Agrawala. Accurate anchor-free node localization in wireless sensor networks[A]. 24th IEEE International IPCCC2005[C]. 2005, 4: 465-470.
- [16] YUAN Liang, CHEN Weidong, et al. A review of control and localization for mobile sensor networks[R]. Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, Dalian, China, IEEE 2006, 6: 21-23.
- [17] Petter Ogern, Edward Fiorelli, et al. Cooperative control of mobile sensor networks: Adaptive gradient climbing in a distributed environment[J]. IEEE Automatic Control, August 2004, **49**(8): 1292-1302.
- [18] CAO Yong tao, HE Chen, JIANG Lingge. A distributed virtual backbone formation for wireless Ad Hoc and sensor networks [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2007, **E-12**(1): 23-28.
- [19] CAI Wenyu, JIN Xinyu, ZHANG Yu, et al. A load-balanced minimum energy routing algorithm for wireless Ad Hoc sensor networks[J]. Journal of Zhejiang University SCIENCE A, 2006, **7**(4): 502-506.
- [20] WANG Yufeng, WANG Wendong. A novel interest coverage method based on Jensen-Shannon divergence in sensor networks [J]. Journal of Electronics (China), July 2007, **24**(4): 484-489.
- [21] ZHANG Shi, LU Qiannan, ZHANG Zhe, et al. Low-energy routing based on ant colony algorithm genetic algorithm in wireless sensor networks[J]. Proc. Of SPIE, 2006, 6357.635756(1-8).
- [22] ZHU Qiuming, Stuart L. Aldridge, Tomas N.Resha. Hierarchical collective agent network (HCAN) for efficient fusion and management of multiple networked sensors[J]. Information Fusion, 2007, **8**(3): 266-280.
- [23] Mark Chaffey, Larry Bird, Jon Erickson, et al. MBARI's buoy based seafloor observatory design[C]. MTTS/IEEE Techno-Ocean'04[C], 9-12 Nov.2004, 4: 1975-1984.
- [24] Brandstein M, Silverman H. A robust method for speech signal time-delay estimation in reverberant rooms[R]. Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP '97), April 21-24, 1997, 375-378.
- [25] Tan Kok Sin Stephen. Source localization using wireless sensor networks[D]. Naval Postgraduate School, Master of Science in Electrical Engineering, 2006, 6.
- [26] D. Li and Y. H. Hu. Energy based acoustic source localization [J]. ISPN 2003, LNCS 2634, 2003: 285-300.
- [27] D. Li and Y. H. Hu. Least square solutions of energy based acoustic source localization problems[J]. IEEE ICPPW'04, 15-18 2004, **8**: 443-446.
- [28] SHENG Xiaohong, HU Yuhen. Maximum likelihood multiple -source localization using acoustic energy measurements with wireless sensor networks[J]. IEEE Trans of Signal Processing, January 2005, **53**(1): 44-93.