



综述

水下声学传感器网络研究^{*}

何 明, 陈秋丽, 叶旭光, 权冀川, 陈希亮

(解放军理工大学指挥信息系统学院 南京 210007)

摘 要: 水下声学传感器网络日益成为国内外的研究热点, 而水下环境恶劣及传感器节点移动难以控制等问题的存在, 使得如何确保水下声学传感器网络的效能备受关注。分析了水下声学传感器网络的国内外研究现状, 描述了水下声学传感器网络的层次结构, 对水下声学传感器网络物理层面临的技术挑战进行了研究, 并指明了下一步研究工作的方向。

关键词: 水下声学传感器网络; 网络结构; 能耗; 传输时延

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.11.012

Study on Underwater Acoustic Sensor Network

He Ming, Chen Qiuli, Ye Xuguang, Quan Jichuan, Chen Xiliang

(College of Command Information Systems, PLA Science and Technology University, Nanjing 210007, China)

Abstract: Nowadays, the study of the underwater acoustic sensor network(UASN) becomes the hotspot in the world, but there are some difficulties in controlling underwater conditions and the mobile sensor node. How to ensure the efficiency of underwater acoustic sensor networks is a major concern. Firstly, the research status and development trend of UASN were analyzed. Secondly, the hierarchical structure of the underwater acoustic sensor network was researched. Then technical challenges on the physical layer for underwater acoustic sensor network were studied. Lastly, the next research direction was pointed out.

Key words: underwater acoustic sensor network, network structure, power consumption, time delay

1 引言

随着人们对海洋科学研究、商业开发及水下军事行动等需求的日益增加, 迫切需要能够进行长时间工作、高可靠、低时延、低能耗的水下声学传感器网络(underwater acoustic sensor network, UASN), 以满足人们在海洋水文信息探测、海洋渔业资源调查、海洋矿产资源勘探、水下灾害预警和 underwater 入侵监测等方面的应用需求^[1,2]。

在水下声学传感器网络应用之前, 水下数据的感知和收集工作一般通过有线网络来完成, 这种方式代价高昂并且需要大量工程技术辅助, 灵活性很受限制^[3,4], 而水下声

学传感器网络将大量适合水下环境的传感器节点部署于监测水域, 节点间通过声通信的无线方式自组织构成水下声学传感器网络, 不仅部署代价相对低廉, 且其分布式结构能够在水下监测应用中展现出更高的灵活度, 具有广阔的应用前景。

本文首先针对水下声学传感器网络中传感器节点位置及功能的不同, 提出了水下声学传感器网络系统模型; 接着, 对水下声学传感器网络国内外研究现状及发展动态进行了介绍; 然后, 着重分析了水下声学传感器网络物理层面临的一些技术挑战; 最后, 从 3 个方面对水下声学传感器网络的研究意义进行了总结。

^{*} 江苏省自然科学基金资助项目(No.BK2011124), 江苏省自然科学基金资助项目(No.BK2010129)

2 系统模型

水下声学传感器网络结构是一个开放性的研究领域,对于不同的海洋环境 and 应用要求需采用不同的网络拓扑结构^[5]。但总体来说,根据水下声学传感器网络中节点位置及功能的不同,可以得到水下声学传感器网络的原型系统模型,如图1所示。图中显示了一个与无线陆地和卫星网络相集成的三维水下声学网络,与二维静态拓扑相比,三维动态拓扑中的水下传感器节点具有深度和可变性。

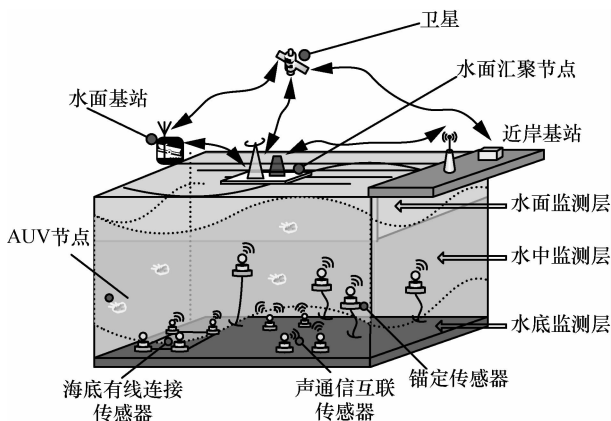


图1 水下声学传感器网络系统模型

- 水面监测层:由水面上的无线传感器节点构成。主要包括汇聚(sink)节点,用于收集水下传感器节点以及AUV(autonomous underwater vehicle)节点收集到的监测信息,并将收集到的信息通过卫星、船舶或近岸基站传送给用户。
- 水中监测层:由悬浮在水中的传感器节点构成。这些节点包括两类:一类是不能自主移动的普通传感器节点,这类节点带有气囊,由锁链牵引被锚定在水底,利用海面浮标将节点下降到水中不同深度,用于监测水中空间内的信息;另一类是AUV节点,其实质是一种水下机器人,这类节点能够自主移动,体现了水下声学传感器网络的移动性,主要用于定位固定节点,通过近距离光通信的方式与固定节点通信,实现命令的传达与数据的回收。当固定节点发生节点失效或网络分割时,自移动到失效位置帮助网络拓扑愈合。
- 水底监测层:由被锚定在水底的传感器节点构成。可能存在通过水声通信的无线传感器节点,也可能存在相互间用有线方式连接的传感器节点,传感器节点监测到的信息或通过自移动节点(AUV节点)

定时收集,或传送给水中的汇聚节点,再由sink节点发往水面基站,然后通过无线电与卫星、船舶或近岸基站通信,最终实现用户对水底信息的实时掌握。

3 研究现状与发展动态

(1) 研究现状

美国最早开始水下声学传感器网络的研究,20世纪50年代,美国就将水声监视系统(SOSUS)运用于太平洋和大西洋的海域中。美国麻省理工学院研发了水下机器人AUV,可进行自主式移动,构建了移动节点与固定节点相结合的水下传感网络(AOSN)^[6]。美国南加利福尼亚大学对水下移动传感网络的水声通信与网络协议进行了研究,提出了密集型水下传感器网络的概念,为更适应水下工作环境,研发了具备检测接收信号能量和控制功耗等功能的水声通信系统^[7,8]。另外,水声网络的通信模式及传感器节点的定位算法领域也收获了一些研究成果^[9,10]。随后欧盟、日本、加拿大等地区和国家也投入水下通信网络领域的研究中,人类对深海领域的监测成果有了新的进展。

我国从“八五”期间就开始水声通信的研究,自2006年起,水下声学传感器网络被列为国家自然科学基金重大项目。在水下声学传感器网络的通信、水下声学传感器节点部署设计、网络拓扑自组织构建等方面有显著成果。各知名大学也纷纷组建项目组,提出关于水声传感网络各项技术的研究课题,国家“863”计划也多次在相关领域立项,水下声学传感器网络的研究更加系统。具体计划见表1。

建立水下传感网络,在近海、公海和海底等位置观测诸如气候变异、海洋环流、海洋酸化等复杂的海洋过程。

(2) 发展动态

与国外发达国家相比,国内的研究起步较晚,大部分还仅处在理论探索阶段,在水声通信^[13]、协议安全^[14,15]、节点布置^[16,17]等方面有了一定进展,然而,针对UASN存在的链接时延较长且多变、带宽较低、节点能量有限、误码率高等问题,国内的研究尚不完善。因此,水下声学传感器网络的研究仍面临着许多技术挑战。

4 物理层技术挑战

高品质的通信是成功实现监测、探测及预警系统面临的关键问题,这对于陆地和卫星通信技术来说已经取得了显著的进步,但对于水下通信来说,仍存在许多瓶颈需要解决,见表2。复杂的水下环境以及随之产生的高能耗使



表 1 各国水下声通信网络研究计划

相关研究及项目	国家和地区	时间	研究内容
AOSN	美国	1993 年	提出水下声学网络应用概念 ^[1]
SEAWEB	美国	1999 年	进行沿海区域军事监控及反潜作战系统的规划
ROBLINKS	欧盟	1998 年	对浅水域中长距离、高数据率并具有稳定性的水声通信网络通信算法进行研究 ^[2]
NEPTUE	美国	1998 年	通过区域内长期、实时的交互式深海观测,在几秒到几十年的不同时间尺度、几微米到几千米的的不同空间尺度上进行多学科的研究
APENA	日本	2003 年	实现研究室与海底直接联系,在保证系统低成本、高效率、高抗故障能力、高可靠性的前提下研究水声通信及海洋观测
ESONET	欧盟	2004 年	以海洋观测传感器网络为基础,对海洋中融入的多要素、多学科进行综合研究
VENUS	加拿大	2006 年	实现温度及盐度传感器、照相机、录像、高分辨率声纳系统、遥控潜水器(ROV)等设备的海底连接,对水下无线传感器网络进行组建与运维
海底长期观测网络试验节点关键技术	中国	2007 年	研究开发输能通信技术、原位海底动力环境和化学监测技术、深海网络组网标准技术和系统集成、布放及试验技术等若干深海观测网络组网的关键技术
水声通信网络节点及组网关键技术研究	中国	2009 年	对可运行的水声通信网络进行组建,开发水声通信网技术研究发展平台
OOI	美国	2010 年	建立水下传感网络,在近海、公海和海底等位置观测诸如气候变异、海洋环流、海洋酸化等复杂的海洋过程

表 2 水下声学传感器网络特点与侧重关注点

水下声学传感器网络特点	侧重关注点
节点易失效	拓扑自愈合问题
节点易移动	拓扑的修复和优化问题
声波通信	传输时延减小
信号不规则	通信和覆盖概率保障
误码率高	误码率降低
能耗更高	能耗降低

得传感器网络在水下环境中的应用受到很大限制,尤其是由于多通道信号的传播以及媒介的时变性,使得声学通信能力受到了较为严重的限制,造成声学通信链路质量较低、信道波动较大等问题。

为提高水下声学传感器网络通信质量,功率和能量最优化非常重要,这是因为声学通信比其他无线通信耗能更多,且水下环境中能量补给更加困难。水下传感器节点一般是由电池驱动的,通过降低传输功率可以延长网络寿命,但同时又会使得误码率增加。这些促使水下声学传感器网络设计要求低功耗,并在最小复杂度的情况下有尽可能低的误码率。而要实现这一目的,需要从物理层着手对传感器节点及水声通信网络进行分析设计,主要解决如下几个技术挑战。

(1)多普勒传播

多普勒频率传播在水下声通信信道中尤为重要,特别

是在受到自然干扰、数字通信性能退化的时候。高数据速率的传输会产生很多邻近的符号来干扰接收器,因此需要成熟的信号处理机制来对产生的内部符号干扰进行处理。

多普勒传播产生:一个简单的频率转化,使接收器对其补偿相对简单;一个连续的频率传播,构成了一个不可转变的信号,使接收器的补偿变得更加困难。如果一个信道有 B 带宽的多普勒传播以及一个信号的符号持续时间为 T ,那么在它复杂的封装中大约有 $B \times T$ 个不相关采样。这取决于所考虑的海洋环境,大多数被描述的因素都是由水媒介的化学—物理属性引起的,如温度、盐碱度、密度以及因素的空间—时间变化,这些变化连同信道的波动引导特性,一起产生了声学信道时间和空间的变化。目前,不管在深水还是浅水中,水平信道比垂直信道的变化速度更快。

(2)路由方法

陆地传感器网络应用普遍采用设计路由算法来使通信能耗最小,最终增加传感器寿命。这种思想同样适用于水下及空间的应用,所以 Friis 无约束的太空传播模型必须被考虑在内。这种模型对接收到的以及传输的能量之间的关系进行了定义,并且声明当信息是通过多跳路径从源点到目的地传输时,通信能耗大幅度减少。

然而,分步式的卫星任务产生了严格的时间限制,尤其是对于地球同步卫星而言。典型的无线实时控制系统对于端到端的等待时间,包括感知、通信、计算和行动的上限为 10 ms,这意味着多跳传输的局限在于处理、等待和

传播等时延。

(3) 水下节点的能量采集

水下能量采集的一种典型方法就是利用水波的移动。Eco Wave Power 构建并测试了它的海洋波流能量产生模型——“Wave Clapper”以及“Power Wing”。最近哈佛科学家提出了一种海底活电池,这种电池由生活在它自身附近的微生物补充电量。由于这些微生物以从海床里漂浮上来的有毒化学物质为食,它们能够产生一种生物电流,这种电流可以在它们居住的类似于“烟囱式”的构筑物墙体上流动,而这种能量或许可以保证部署在海床上的传感器节点正常工作。丹佛科罗拉多大学的科学家们受微生物燃料电池(MFC)学启发,开发出了一种极富创新性并且非常高效的能量系统,利用可降解的物质(如废水或航海沉淀物等)中产生的细菌对传感器节点直接充电。如果这些能量补充技术中的任意一种被有效应用于水下声学传感器网络中,那么其网络生命周期将会得到极大的延长。

5 研究意义

(1) 科研意义

针对我国海洋环境监测存在的时空覆盖范围有限、监测空间尺度较小、数据传输与处理能力有限、探测手段单一等不足,水下声学传感器网络研究作为海洋监测重大科学问题的关键环节,是物联网水下应用科学前沿的突破点,可为该领域的研究进展积累关键的基础资料和数据,对揭示水下声学传感器网络拓扑演化机理有重要意义,为传感器网络可靠性研究提供了新思路 and 理论依据。

(2) 军事意义

黄岩岛和钓鱼岛等海域争端说明海洋是人类的主要战场之一。外军先进潜艇及其他水下武器对我国海域造成了军事威胁。在现代水下作战时,水下声学传感器网络是集侦察、警戒、指控、通信、导航、定位、目标攻击、综合作战能力于一体的庞大体系。未来海战可充分发挥近海空间优势,水下声学传感器网络的发展甚至可能影响到海军军事战略的变革,从而有效提高对水下目标的实时监测能力和海洋水文信息获取能力,对提高国家海防水平具有重大军事意义。

(3) 经济与社会意义

我国是海洋大国,有数百万平方公里的专属经济区,海底蕴藏着丰富的矿产资源与油气资源,水下声学传感器网络对海洋矿产资源勘探有重要实用价值,对解决我国未来的矿产与能源短缺问题具有极其重大的意义。同时,弥

补了我国现有海洋监测技术的不足,有效提高了我国海洋环境监测能力。

6 结束语

水声通信网络承担着探测、数据通信的重要使命。但由于水声信道恶劣的传输条件,使得信道带宽严重受限,声信号易受强环境噪声、时变多径的影响,产生严重的码间干扰、高传输时延以及大的多普勒频移扩展。依据水声通信网络的特殊性,综合考虑网络时延、节点能耗及传输成功率等因素,保证通信的高质量,提高水下声学传感器网络可靠性迫在眉睫。本文对水下声学传感器网络的国内外研究现状及发展动态进行了介绍,分析了水下声学传感器网络结构,并阐述了保证高质量通信所面临的物理层技术挑战。下一步工作主要是针对水下声学传感器网络拓扑进行研究,并寻求提高网络可靠性的技术途径与方法。

参考文献

- 1 Shusta J. Acoustic network architecture. Proceedings of 5th ACM Int Workshop on Underwater Networks (WUWNet), Woods Hole, Massachusetts, USA, 2010:28~34
- 2 Akyildiz I F, Pompili D, Melodia T. Underwater acoustic sensor networks: research challenges. *Ad Hoc Networks*, 2005,3(3):257~279
- 3 Alkandari A, Alnasheet M, Alabduljader Y. Wireless sensor network (WSN) for water monitoring system: case study of kuwait beache. *International Journal of Digital Information and Wireless Communications(IJDIWC)*, 2011,1(4):709~717
- 4 Zeng B, Zhong D H, Yao L. Research of underwater mobile sensor network algorithm based on water flow. *Application Research of Computers*, 2010,27(10):3926~3928
- 5 Erol-Kantarci M, Mouftah H T, Oktug S. A survey of architectures and localization techniques for underwater acoustic sensor networks. *IEEE Communications Surveys and Tutorials (COMSUR)*, 2011,13(3):487~502
- 6 Vasilescu I, Kotay K, Rus D, *et al.* Data collection, storage, and retrieval with an underwater sensor network. *Proceedings of SenSys '05*, San Diego, California, USA, 2005
- 7 Heidemann J, Ye W, Wills J, *et al.* Research challenges and applications for underwater sensor networking. *Proceedings of IEEE WCNC2006*, Las Vegas, USA, 2006:228~235
- 8 Xia N, Wang C S, Zheng R, *et al.* Fish swarm inspired underwater sensor deployment. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(2): 295~302
- 9 Golen E F, Mishra S, Shenoy N. An underwater sensor allocation scheme for a range dependent environment. *Computer Networks*, 2010,54(3):404~415



10 Akyildiz I F, Pompili D, Melodia T. Underwater acoustic sensor network: research challenges. *Ad Hoc Networks*, 2005(3)

11 吕超,王硕,谭民. 水下移动无线传感器网络研究综述.控制与决策,2009,24(6):801~812

12 Cano D, Van Gijzen M B, Waldhorst A. Long range shallow water robust acoustic communication links roblinks. *Proceedings of the Third European Marine Science and Technology Conference*, Lisbon,Portugal,1998:1133~1136

13 Sendra S, Lloret J, García M, *et al.* Power saving and energy optimization techniques for wireless sensor networks. *Journal of Communications*, 2011,6(6):439~459

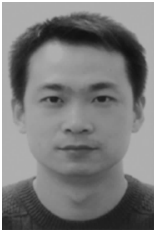
14 Pompili D, Melodia T, Akyildiz I F. Three-dimensional and two-dimensional deployment analysis for underwater acoustic sensor networks. *Ad Hoc Networks*,2009,7(4):778~790

15 Akkaya K,Newell A. Self-deployment of sensors for maximized coverage in underwater acoustic sensor networks. *Computer Communications*,2009,32(7~10):1233~1244

16 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. 东南大学学报,2009,39(4):695~699

17 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. 传感技术学报,2008,21(7):1259~1263

[作者简介]



何明,男,解放军理工大学指挥信息系统学院副教授,主要研究方向为水下传感器网络、物联网。

陈秋丽,女,解放军理工大学指挥信息系统学院硕士研究生,主要研究方向为水下传感器网络。

叶旭光,男,解放军理工大学指挥信息系统学院讲师,主要研究方向为指控装备。

权冀川,男,解放军理工大学指挥信息系统学院副教授,主要研究方向为系统效能评估、信息融合。

陈希亮,男,解放军理工大学指挥信息系统学院讲师,主要研究方向为传感器网络。

(收稿日期:2013-05-27)



·简讯·

2013年9月通信业主要指标完成情况(一)

指标名称	单位	本年本月止累计到达	比上年同期累计	本月
电信营业收入	亿元	10 045.8	12.1	1 206.4
其中:电信主营业务收入	亿元	8 708.8	8.6	1 018.1
电信固定资产投资完成额	亿元	2 077.5	-7.8	347.8
固定本地电话通话时长合计	万分钟	22 971 028.0	-16.4	2 493 620.3
区间电话通话时长	万分钟	2 410 266.0	-20.6	265 324.0
区内电话及拨号上网通话时长	万分钟	20 560 762.0	-15.9	2 228 296.3
固定长途电话通话时长合计	万分钟	4 458 354.3	-16.8	494 599.1
国内长途电话通话时长	万分钟	4 354 005.7	-16.8	483 660.3
国际电话通话时长	万分钟	63 685.1	-16.4	6 860.7
港澳台电话通话时长	万分钟	40 663.4	-17.5	4 078.2
移动电话通话时长合计(含本地)	万分钟	216 013 406.2	5.2	24 684 339.1
移动电话国内长途通话时长	万分钟	49 801 225.6	5.6	5 869 441.2
移动电话国际电话通话时长	万分钟	96 981.2	7.6	11 591.6
移动电话港澳台电话通话时长	万分钟	72 711.8	-3.9	7 914.8
移动短信业务量	万条	69 704 012.2	3.0	8 047 731.2
移动互联网接入流量	万 GB	92 676.2	67.3	11 840.6

注:(1)收入增长率按可比口径计算。(2)固定长途电话通话时长和移动电话通话时长均包含相应的IP电话通话时长。(3)通话时长各项指标均为去话通话时长。

(来源:工业和信息化部运行监测协调局)