

水下无线传感器网络的研究进展

郭忠文¹ 罗汉江¹ 洪锋¹ 杨猛¹ 倪明选²

¹(中国海洋大学 信息科学与工程学院 计算机科学与技术系 青岛 266100)

²(香港科技大学 计算机科学与工程系)

(guozhw@ouc.edu.cn)

Current Progress and Research Issues in Underwater Sensor Networks

Guo Zhongwen¹, Luo Hanjiang¹, Hong Feng¹, Yang Meng¹, Lionel M. Ni²

¹(Department of Computer Science, College of Information Science & Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100)

²(Department of Computer Science and Engineering, Hong Kong University of Science and Technology)

Abstract With the emphasis on effectively safeguarding of the national marine rights and interests, the upsurge in marine economic development and the significant progress in wireless sensor networks, underwater sensor networks have become a new hot research area. Underwater sensor networks are deployed to perform collaborative tasks such as oceanographic data collection, pollution monitoring, offshore exploration, disaster prevention, assisted navigation, and tactical surveillance. Underwater sensor networks use acoustic signals to communicate, thus the propagation delay is large due to the slow acoustic signal propagation speed. Underwater acoustic communication channel has limited bandwidth capacity because of the significant frequency and distance dependent attenuation. The harsh underwater channel also has high bit error rates. Thus, we must design new algorithms for underwater sensor networks. We first give an overview of underwater wireless communication technologies, the design of communication hardware, the underwater network architecture and the characteristics of underwater communication channels. Then we give a more detailed description of eight important research topics: acoustic modulation, medium access control, routing protocols, transport protocols, cross-layer design, networks information processing, localization techniques and simulation environments. Research organizations on underwater sensor networks are also introduced. Finally, we present problems encountered in current research and future research directions in this exciting and emerging research area.

Key words Underwater sensor networks; Acoustic networks; MAC protocol; Routing protocol; Underwater localization

摘要 随着世界各国对海洋权益的日益重视、发展海洋经济热潮的兴起和陆地无线传感器网络研究的迅速发展,水下无线传感器网络的研究已经成为新的研究热点.文章首先对水下传感器网络通信技术、传感器网络节点、网络体系结构和水下声学传播特征作了介绍,进而重点对物理层、数据链路层、网络层、传输层、跨层设计、网络信息处理技术、水下定位和仿真平台八个方面的研究进展做了系统的综述.文章最后介绍了国内外主要研究机构的情况,并讨论了水下无线传感器网络研究存在的一些问题和需要进一步研究的方向.

收稿日期: 2009-01-13; 修回日期: 2009-7-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(60873248, 60703082); 国家“八六三”高技术研究发展计划基金项目(2006AA09Z113); 国家“九七三”重点基础研究发展计划项目(2006CB303000)

关键词 水下传感器网络；水声通信网络；MAC协议；路由协议；水下定位

中图法分类号 TP393

0 引言

海洋是人类维持生存繁衍和社会实现可持续发展的重要基地。开发海洋、发展海洋经济是整个人类生存和社会发展极为现实的必由之路。目前世界各国对海洋权益日益重视，开发利用海洋的热潮正在全球兴起；陆地无线传感器网络的研究得到了飞速发展^[1-4]。这些因素使得研制具有低成本、高可靠性能的水下无线传感器网络（以下简称水下传感器网络）正在成为一个新的研究热点。

水下传感器网络是指将能耗很低、具有较短通讯距离的水下传感器节点部署到指定海域中，利用节点的自组织能力自动建立起网络^[5]。网络中的节点利用传感器实时监测、采集网络分布区域内的各种监测信息，经数据融合等信息处理后，通过具有远距离传输能力的水下节点将实时监测信息送到水面基站，然后通过近岸基站或卫星将实时信息传递给用户。

水下传感器网络能够为促进海洋环境管理、资源保护、灾害监测、海洋工程、海上生产作业和海洋军事等活动提供更好的技术设备和信息平台。因此水下传感器网络得到了世界各国政府部门、工业界、学术界和科研机构的极大关注。美国海军研究局和空海战系统中心主持的海网Seaweb研究项目早在1998年就开始了实际的水下组网实验^[6]。近几年，有更多的大学和研究结构活跃在该研究领域。我国在“八五”期间就开始对水声通信进行研究^[7]。近几年国家开始重视水下传感器网络方面的研究，并在“十一五”国家高技术研究发展计划（863计划）和国家自然科学基金中资助水下传感器网络的研究。

我国是一个海洋大国，拥有1.8万公里的大陆海岸线和1.4万公里的岛屿岸线，管辖海域面积达300万平方公里。海洋经济在我国国民经济建设中的地位正在逐步提升，预计到2010年海洋经济增加值将占到国内生产总值的5%以上^[8]。因此水下传感器网络在我国有着广阔的应用前景。

水下传感器网络部署在极其复杂可变的水下环境中，主要利用水声进行通信，有着许多与陆地无线传感器网络不同的特点，使得陆地无线传感器网络协议不能直接应用于水下。必须针对水下环境的具体特点，研究适应水下通信、组网和应用的新协议。这是一项具有挑战性的工作。

本文从以下几个方面综述水下传感器网络的研究进展。第1节讲述水下传感器网络通信技术；第2节讲述水下传感器网络节点；第3节讲述水下传感器网络体系结构；第4节讲述水下声学传播特征；第5节讲述水下传感器网络关键协议的研究进展，主要包括物理层、数据链路层、网络层、传输层、跨层设计、网络信息处理技术、水下定位和仿真平台；第6节介绍水下传感器网络国内外研究机构的情况。本文最后讨论存在的一些问题和研究方向。

1 水下传感器网络通信技术

水下传感器网络通信技术主要有无线电、激光和水声通信三种方式。

1.1 无线电波通信

无线电波在海水中衰减严重，频率越高衰减越大。水下试验表明：MOTE节点发射的无线电波在水下仅能传播50-120cm^[5]。文献[9]的低频长波无线电波水

下试验可以达到 6-8 米的通讯距离. 30-300Hz的超低频电磁波对海水穿透能力可达 100 多米, 但需要很长的接收天线, 这在体积较小的水下节点上无法实现. 因此, 无线电波只能实现短距离的高速通信, 不能满足远距离水下组网的要求.

1.2 激光通信

蓝绿激光在海水中的衰减系数小于 $1 \times 10^{-2} \text{ dB/m}^{[10]}$, 对海水穿透能力强. 文献[11]在清澈的水中进行过短距离高达几兆比特的高速水下激光通信试验. 文献[12]使用 532nm的绿光激光器进行了通讯距离小于 7m、传输速率为 320kbit/s的高速水下数据传输实验. 水下激光通信需要直线对准传输、通讯距离较短、水的清澈度会影响通讯质量, 这都制约着它在水下网络中的应用. 不过, 它适合近距离高速率的数据传输, 比如自主水下航行器和岸边基站间的数据传输等.

1.3 水声通信

目前水下传感器网络主要利用声波实现通信和组网. 最早的水声通信技术可以追溯到 20 世纪 50 年代的水下模拟电话^[7]. 20 世纪 80 年代出现了取代模拟系统的数字频移键控技术以及后来的水声相干通信技术. 随着 20 世纪 90 年代 DSP (Digital Signal Processing) 芯片及数字通信技术的出现, 尤其是水下声学调制解调器的问世, 为水下传感器网络的发展奠定了坚实的基础.

2 水下传感器网络节点

水下传感器节点负责数据采集和网络通信, 是水下传感器网络的硬件支撑, 其性能特点影响着网络体系结构及网络协议的研究. 研制具有低成本、低能耗、低误码率、体积小、近距离传输和高通信速率的水下节点对水下传感器网络的发展具有很大的推动作用.

2.1 水下传感器网络节点基本组成

水下节点主要由控制器 (CPU)、存储器、传感器和水声调制解调器等组成, 如图 1 所示.

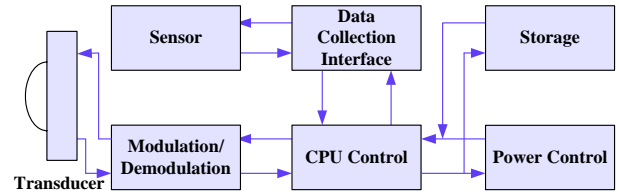


Fig. 1 Underwater sensor node structure.

图 1 水下传感器节点结构示意图

控制器负责控制整个节点以及数据采集、发送和网络通信等. 数据采集接口通过传感器采集水下的压力、温度、盐度、海水透明度、海流、声音等各种海洋物理、化学数据, 并转换成数字量传送给控制器. 常用的传感器主要有测量温度、盐度和深度的传感器 CDT; 测量海流声学多普勒流速剖面仪 ADCP; 测量海洋化学成分的传感器; 测量海洋声学的各类传感器等等.

控制器通过调制解调器发送或接收数据. 发送数据时, 数据信息经过调制编码, 然后通过水声换能器的电致伸缩效应将电信号转换成声信号发送出去. 在接收信号时, 则利用水声换能器压电效应进行声电转换, 将接收的信息解码还原成有效数据送往控制器.

2.2 水声调制解调器的研究进展

水声调制解调器早先的产品, 比如美国 LinkQuest 公司的 UWM 系列产品^[13], 体积大、耗能高、价格昂贵, 主要用于点对点的远距离数据传输.

随着水下传感器网络研究的兴起, 许多厂商开始研制生产水下网络节点, 如澳大利亚 DspComm 公司最新的水下网络节点产品 AquaNetwork 系列产品^[14] 以及英国 Tritech 公司的 Micron Data Modem 已经具有初步的组网功能^[15]. Tritech 公司新推出一款体积很小、误码率和耗电量都

很低的微型调制解调器：它的通信距离为 1000m，数据传输速率为 40bps。另外，研究人员也对具有超低耗能唤醒机制的水下节点进行了研究^[16-17]。

2.3 水下传感器移动节点

水下节点可以在海床上固定部署，但节点移动部署可以扩大监测区域。利用洋流或海流，可以实现节点的移动。文献[18]研制出一种可以通过控制信号沉到水中预定深度的球形节点。这种节点随海流漂移对海洋环境污染进行监测。

将水下节点搭载在自主式水下航行器(AUV)或水下滑翔机(underwater glider)等水下移动设备上，也可以成为水下移动节点^[19]。Hydroid公司生产的REMUS系列AUV，其巡游速度可以达到 1.5m/s至 2.9m/s，续航能力短的可达几十小时^[20]。如果利用岸边充电系统或者利用太阳能电池浮到水面上自充电，则可以连续工作几个月^[21]。水下滑翔机利用海洋温差热能等辅助驱动手段，消耗很少的能量就可以在水中安静地“滑翔”一个月甚至几个月^[22]。尽管它的移动速度很慢(每小时大约移动 1000m)，但可以持续不断地搜集水下信息。美国伍兹霍尔海洋研究所(WHOI)的科学家曾利用 12 个水下滑翔机成功地组成了一个水下传感器探测网络^[22]。

3 水下传感器网络体系结构

水下传感器网络根据具体应用不同，可以有多种体系结构。按其监测的空间区域不同大致可分为二维、三维和海洋立体监测网络三种^[5]。

1) 二维(2D)监测网络：在该模型中，传感器节点被锚定在海底^[5]，监测信息可以通过AUV定时收集，或直接发往浮在水面上的基站，然后通过无线电与卫星、船舶或岸上陆基基站，最终将海底监测信息

实时地传送给用户。

2) 三维(3D)监测网络：可分为固定 3D监测网络和移动 3D监测网络。固定 3D监测网络可由带有气囊的水下节点锚定在海底，形成固定的监测网络。利用海面浮标，将节点下降到不同的深度，也可以形成 3D监测网络^[23]。移动 3D监测网络可由多个AUV、水下滑翔机等单独组成网络，或与固定节点形成 3D混合监测网络。

3) 海洋立体监测网络：由水面上的无线传感器网络和 underwater sensor network 两部分组成，二者结合为一个统一的网络^[24-25]，如图 2 所示。水下网络部分可以是 3D 移动、固定或者二者混和的网络。水面网络部分利用无线电进行通讯，具有传输速度快、可靠性高、耗能低、可以GPS精确定位，直接与卫星通讯等优点。它还可以检测风向、波高、潮汐、水温、光照、水质污染以及负责与水下网络、陆基基站的信息传输等。

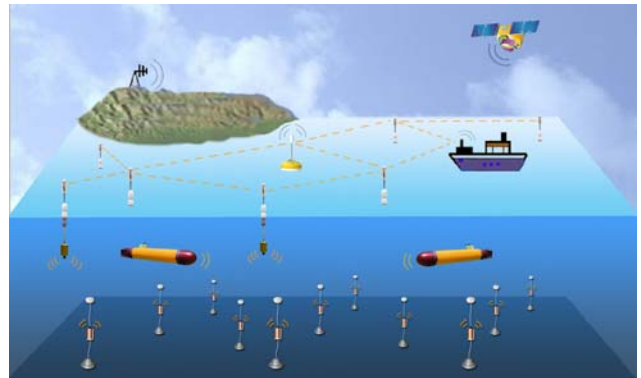


Fig. 2 Marine sensor networks model.

图 2 海洋立体监测网络模型

4 水下声学传播特征

水下传感器网络使用声波通信，传播介质是水，这与无线电波在空中传播有显著的不同，主要体现在以下几方面：

1) 高时延和时延的动态变化

声波在海水中的传播速度大约为 1500m/s，比无

线电波的速度少了 5 个数量级. 声波在海水中传播 1000m 大约需要 0.67s, 通信时延很大. 此外, 声波在海水中的传播速度随海水的盐度、温度、压力(深度)的变化而变化. 温度越高, 声速越大; 盐度及海水压力的增加也会引起声速的增大. 声速在水下随不同环境变化的特点, 带来了传播时延的动态变化.

2) 水声信号衰减大, 通信信道带宽低

声波在海水中传播的能量损失有扩散损失、散射损失、反射损失和吸收损失等, 其主要损失是扩散损失和吸收损失两部分. 扩散损失是指声波的波阵面从声源向外不断扩展的简单几何效应, 其损失与传输距离的平方成正比, 在浅海中为水平方向的柱状扩散, 而在深海中为球状扩散. 吸收损失由海水的粘滞性、热传导性、海水中硫酸镁和硼酸-硼酸盐离子的弛豫效应, 使部分声能被吸收转化为热能而造成. 吸收损失与声波的频率成正比, 频率越大, 吸收损失越大, 这限制了在水下通信的频率选择范围^[26]. 在深海中垂直方向上声波传播距离和波特率的乘积的上限为 $40\text{km} \times \text{kbps}$ ^[27]. 从可用带宽的角度讲, 在 1km-10km 之间有大致小于 10 kHz 的带宽; 100m-1000m 大致有 20 kHz-50 kHz 的带宽; 要达到 100 kHz 以上的通信带宽, 通信距离必须小于 100m ^[5, 28]. 因此, 水下通信带宽相对于无线信道要低很多.

3) 多径效应严重

声波传播时受海水分层介质的折射和海面、海底的反射等影响, 在声源与接收点之间存在多条先后到达接收机的不同路径. 图 3 显示了浅海近距离传播的三条典型多途传播途径. 由于声波的传播速度低, 造成到达接收机的时间延迟(channel delay spread)会很大. 一般可以达到 10ms 左右, 甚至可能达到 50ms-60ms^[27] (水平方向的多径传播要比垂直方向上严重). 这些时

延各不相同的信号在接收端相互叠加, 使接收到的声信号振幅和相位产生畸变, 造成码间干扰, 导致解调困难, 并影响信道传输速率的进一步提高.

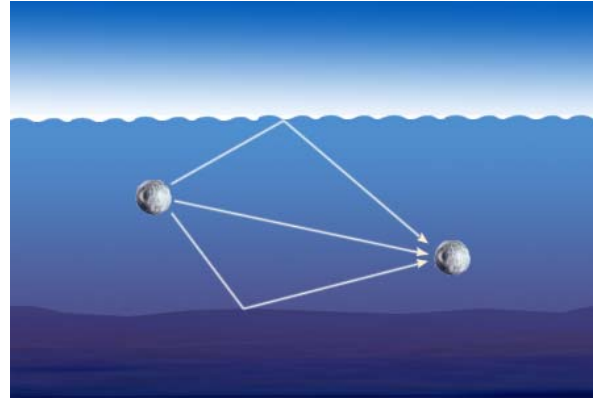


Fig. 3 Shallow water propagation mode.

图 3 浅海多径传输模式

4) 传输误码率高

由于海平面的波动、内波、海水背景噪音、信道多径传播、阴影区、时延动态变化以及节点的移动导致的多普勒频散等影响, 水声信道呈现出高度动态性, 甚至会出现信号时断时续的不稳定情况. 此外, 传感器节点在水下环境中更易损坏. 这些因素使得水下信道有更高的数据传送误码率.

5. 水下传感器网络关键协议研究进展

水下传感器网络与陆地传感器网络有很大不同, 具体表现在: 第一: 水下信道具有高时延、时延动态变化、高衰减、高误码率、多径效应、多普勒频散严重、高度动态变化以及低带宽等特点, 被认为是迄今难度最大的无线通信信道; 第二: 水下节点和网络具有移动性特点; 第三: 水下节点使用电池供电, 更换电池更为困难. 另外, 节点发送信息耗能比接收信息往往大很多倍^[17] (在文献[29]中节点发射模式为 2W, 而接收

模式仅仅为 20mW)；第四：由于水下节点价格昂贵，水下网络具有稀疏性的特点。水下传感器网络的这些特点，使得陆地无线传感器网络协议不能直接应用于水下，必须研究适应水下网络特点的新协议。

水下传感器网络协议栈按照与无线传感器网络相似的分法，可分为物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层^[5]。本节主要对物理层、数据链路层、网络层、传输层、跨层设计、网络信息处理技术、水下定位和仿真平台八个方面的研究进展进行综述。

5.1 物理层

物理层主要解决数字化调制与解调的问题。由于水下信道具有高度动态时变特性，物理层必须能够自适应水下环境的变化。

物理层采用的技术主要有非相干调制技术、相干调制技术、正交频分复用(OFDM)和多输入多输出技术(MIMO)等。

非相干调制技术，如频移键控(FSK)技术^[30]，通过监测不同频率的能量确定接收信号，不需要追踪信道的变化。但水下信道存在严重的多径效应和多普勒频散，所以需要在脉冲之间加一段保护时间防止干扰，这导致通信速率较低。WHOI的水声调制解调器的一个低速率模式采用频移键控调制，通信速率为80bit/s。频移键控简单高效，有较好的抗多径效应的性能，但带宽利用率低，所以不适用于水下高速通信。

相干调制技术需要接收机估计发射机的载波频率和相位进行解调处理^[31]。主要有相移键控(PSK)、差分相移键控(DPSK)和正交幅度调制(QAM)。相干调制去除了保护时间，提高了数据传输率，但需要针对水下信道的高度动态性进行复杂的信道自适应均衡补偿。

为了实现水下高速率通信，近几年开始对正交频

分复用和多输入多输出技术进行研究。

正交频分复用扩频技术是一种多载波调制技术^[32]。数据流被分配到多个载波频率上并行发射，降低了每个载波的传输率，减少了码间干扰，提高了总数据传输率，对多径干扰也有很好的抑制作用。

多输入多输出技术是一种在接收端和发送端使用多个接收天线和发射天线的调制技术^[33]。它利用空间复用增益和空间分集增益，大大提高了数据传输率。在文献[34]中，作者使用6条天线，可以达到12kbit/s的数据传输率。MIMO还可以和多载波正交频分复用技术联合使用，这样既可以降低接收机均衡器的复杂度，又可以达到高速率接收数据的目的。文献[35]使用两条天线和QPSK调制做了实验。文献[36]使用四条天线和QAM调制方式进行了水下实验。文献[37]针对水下非线性多普勒失真对信道估计产生的影响，提出两种低复杂度的、自适应的水下信道估计算法。

5.2 数据链路层

数据链路层主要解决媒体接入控制问题，即MAC(Medium Access Control)协议。水下高时延、时延的动态变化、低带宽以及低能耗的要求，对水下MAC协议的研究带来了挑战。水下MAC协议一般可分为基于竞争类和基于固定分配类两种。

1) 基于竞争的MAC协议

基于竞争的MAC协议通过节点间的竞争获取信道的使用权，对网络自适应性好，典型协议有ALOHA、CSMA、MACA和FAMA等。

ALOHA系列协议是随机接入协议，节点有数据就发送，不考虑信道是否被占用^[38]。但水下高时延和时延的动态变化，导致ALOHA不如在陆地上效率高^[39]。文献[40]提出利用邻居节点的接收、发送时延等信息，降低冲突发生的算法。

CSMA协议在侦听到信道空闲时才发送数据. 试验表明: 水下的高时延使隐藏终端和暴露终端的问题更加严重^[41]. 高时延使CSMA需要更长的时间检测到冲突^[42], 导致CSMA在水下效率很低. 文献[29]提出了利用短的探测包 (tone packet) 竞争信道的T-Lohi协议, 降低了通信开销, 减少了冲突的发生.

MACA和FAMA是基于RTS、CTS、DATA和ACK等握手机制的协议 (FAMA协议允许一次成功握手后, 连续发送多个数据报文(packet train)). 握手机制可以解决隐藏终端和暴露终端的问题^[43], 但增加了时延, 降低了带宽利用率. PCAP通过在RTS包中加入发送数据可能的起始和终止时间提高网络吞吐量^[44], 但它需要严格的时间同步. 文献[45]提出通过缩短握手时间提高吞吐量的算法. 时隙FAMA加入一个长度等于最大传播时延的时隙, 以降低高时延带来的影响^[46], 但握手机制仍然导致低的吞吐量. 文献[47]提出利用节点间不同距离具有不同时延的特点, 提高带宽利用率的MAC协议.

2) 基于固定分配的MAC协议

固定分配MAC协议把共享信道分配给节点单独使用, 避免了冲突造成的能耗, 提高了信道利用率, 但固定分配不适于网络拓扑频繁变化的水下移动网络. 固定分配MAC协议主要有频分多址接入(FDMA)、时分多址接入(TDMA)、码分多址接入(CDMA)三种方式.

FDMA把频谱资源分为若干小频道给不同节点. 美国海网Seaweb^[6]早期使用FDMA, 但由于水下传输信道带宽低以及信号衰减与频率成正比的原因, FDMA不太适合水下传感器网络^[5].

TDMA通过节点使用分配的时隙轮流使用整个频谱资源. TDMA需要准确的时间同步, 而水下传感器网

络时间同步较为困难^[48]. 另外, 时延的动态变化使TDMA的保护时隙要更长. 文献[49]使用TDMA在ACMENet网中做了实际试验. 文献[50]提出了一种基于拓扑结构的时间片调度算法, 适用于集中式数据传输. 文献[51]针对水下信道的时空不确定性对TDMA的影响做了研究, 并提出自适应于信道不确定性的TDMA算法.

CDMA采用扩频技术把发射信号通过伪随机编码扩频到整个可用带宽, 可以有效避免水下多径传播引起的频率选择性衰落问题^[5]. 由于CDMA可以在同一信道上不冲突地传输多路信息, 因而可以增加信道重用.

CDMA可分为跳频码分多址(FH-CDMA)和直扩码分多址(DS-CDMA)两种. 文献[52]研究表明DS-CDMA在水下环境中具有更低的误码率, 因此性能优于FH-CDMA (目前LinkQuest公司、DspComm公司和Tritech公司的商用调制解调器都采用DS-CDMA扩频方式).

使用CDMA需要解决远近效应问题, 使到达基站的接收功率大致相同^[53]. 但水下信道的高度动态变化、半双工、高时延等特点, 使CDMA应用闭环功率控制更加困难^[54].

5.3 网络层

网络层主要解决路由问题, 即在数据源节点和目的节点间建立一条数据传输路径. 水下传感器网络的三维移动性和稀疏网的特点是水下路由需要考虑的问题. 水下路由协议一般可分为主动路由协议、按需路由协议和地理路由协议三种.

主动路由协议由基站周期性广播路由信息包建立路由. 它实现简单, 可以有效避免信道拥塞, 保证传输质量. 但对网络规模适应性差, 节点频繁移动也会导

致路由维护开销大. 文献[55]利用浮在海面的基站对固定于水下的2D节点进行集中式主动路由. 文献[56]在水下3D网中对主动路由做了研究.

按需路由根据需要临时建立路由, 因此更适合大规模水下移动网络. 文献[57]提出一种基于AODV的按需路由协议. 文献[58]提出一种适用于水面存在多个漂浮基站的、随海流漂移的3D网络路由协议.

地理路由利用节点的地理信息实现路由. 它的路由效率较高、代价小, 但需要知道节点的位置信息^[59]. 文献[60]提出由事件监测源点和浮在海面的基站构成路由矢量的地理路由VBF, 其路由以路由矢量为中心形成圆柱形的路由通道. 文献[61]对VBF做了改进, 采用局部路由矢量代替全局路由矢量, 以适应于稀疏网络. 文献[62]提出一种基于位置信息的AUV移动网络的路由协议, 它使用TDMA帧估计距离形成整个网络的位置拓扑. 文献[63]提出一种基于跨层设计的节能地理路由协议, 它通过控制发射功率达到节能的目的. 文献[64]研究了紧急情况下能量最省多路径路由问题. 文献[65]对定向洪泛算法做了改进, 给出了能量最省的最优路径选择算法.

除了上述路由外, 针对水下信道具有时断时续和稀疏网的特点, 文献[66]将DTN (Delay/Disruption Tolerant Network) 技术在水下路由中做了初步研究.

5.4 传输层

传输层负责数据的可靠性传输, 包括差错控制、流量和拥塞控制等. 水下信道的不可靠性、高时延等特点, 对数据的可靠性传输带来了挑战. 文献[67]将自动重传 (ARQ) 和前向纠错 (FEC) 结合起来考虑, 以减少重传包的个数. 文献[68]利用网络编码结合多路径传输增加数据传输可靠性. 文献[69]提出结合BCH编码和EC擦除编码 (erasure-coding) 的FEC可靠数据传输算法.

5.5 跨层设计

由于水下信道复杂多变以及水下节点能源有限, 跨层设计可以根据具体应用将两层以上综合起来进行优化设计. 文献[70]将MAC层和路由层进行跨层设计以降低传输时延. 文献[71]针对水下多媒体应用结合MAC层、路由层和物理层进行优化设计, 提出节能高效、高吞吐量的算法. 文献[72]基于节省能量综合考虑了MAC层、路由层和信道质量, 提出最优数据包长度的算法.

5.6 水下传感器网络信息处理技术

水下传感器网络信息处理技术主要指网内数据聚合、协同信息处理、数据压缩、分布式存储和查询等. 面向具体应用的信息处理通信开销较大, 而水下信道的低带宽、高时延和不可靠性等特点, 使水下信息处理的研究更加困难. 简单高效、低通信量、低能耗和自适应于水下环境是网络信息处理技术需要考虑的问题.

文献[73]提出两种适用于水下2D分簇网络的分布式粒子滤波跟踪算法. 文献[74]研究了由AUV和水下滑翔机组成的混合网络协作完成水下声学取像的问题, 提出基于能量最省的节点选取最优算法. 文献[75]提出一种适用于簇内的协同信息处理最大似然估计算法 (ML). 该算法通过改变一个或多个节点的采样参数自适应水下变化的环境, 减小水下目标估计误差.

5.7 水下传感器网络定位研究

水下传感器网络节点定位是传感器网络的支撑技术之一^[59, 76]. 水下许多应用需要位置信息, 比如海洋环境监测信息、基于地理路由协议和目标闯入监测与追踪等. 水下传感器网络定位具有如下特点: 水下不能直接使用GPS; 水下信道带宽低, 通信开销大的协议不适用于水下; 节点随海流的移动等. 水下定位技术可

以分为基于测距的定位和基于非测距的定位两种。

基于测距的定位先进行两点测距,然后利用三边、三角等几何特性定位节点。具体测距方法有RSSI、TOA、TDOA和AOA等。RSSI随水下信道变化具有很高的时变性,因此依赖RSSI测距会造成定位的不准确^[59]。TOA需要精确的时间同步,但在水下复杂的信道很难做到这一点^[48]。文献[77]提出一种不需要时间同步的被动定位算法,但需要四个大功率的锚节点。文献[78]利用AUV周期性地发送位置信标定位节点。文献[79]提出利用节点的移动模型降低节点定位频度的算法。文献[80]提出利用投影把三维定位降为二维定位的稀疏网络定位算法。

基于非测距定位主要有交叠区域定位、多跳距离定位等。非测距定位方法简单,不依赖额外的设备,但测量误差较大,适合对定位精度要求不高的场合。文献[81]通过改变锚节点的发射功率,将大的区域分割成许多小区域实现节点区域定位。文献[82]将二维区域定位算法扩展到三维水下区域定位。文献[83]提出利用水声换能器的方向角进行水下定位的算法UDB,它通过节点听到的第一个和最后一个信标确定节点的位置。文献[84]提出利用移动信标节点进行定位、适用于三维稀疏网络的定位算法LDB。

5.8 仿真平台的研究

水下传感器网络研究离不开实验验证,但由于水下实验费用大,尤其出海实验费用高,仿真实验成为验证、评价水下传感器网络协议性能的重要手段。

目前的无线传感器网络仿真软件主要有NS2^[85], OPNET^[86], OMNet++^[87]等,其中NS2和OMNet++是开源软件。这些软件的无线网络模块丰富,但水下传感器网络刚刚兴起,水下信道模型、物理层模型严重缺乏,制约着这些软件在水下网络方面的仿真能力。文

献[88]对水下信道进行了模型化,主要包括物理层、传播层、通信链路层、调制层四部分,其模型可以用在NS2上。文献[89]也对水声信道的传播延迟、接收功率、背景噪声、干扰噪声、信噪比及误码率等进行了模型化。文献[90]对适合浅海的水声通信网数据链路层进行了建模,并在NS2上做了仿真研究。

由于水下信道复杂,目前缺乏统一的信道模型。另外对水下漂流模型尚缺乏实际的验证^[91],其它如AUV等没有纳入模型之内,对现有的仿真软件(如NS2、OMNet++等)缺乏接口支持等,制约了其模型的应用。

6 水下传感器网络国内外研究机构

我国早在“八五”期间就针对水声通信进行研究,主要研究机构有哈尔滨工程大学、中国科学院声学研究所、中国科学院沈阳自动化研究所、厦门大学、西北工业大学、南京大学、东南大学等,主要针对低速率远程通信和高速率近程通信做了研究^[92-101]。

我国在水下传感器网络方面的研究刚刚起步,主要研究结构有中国科学院声学研究所、中国科学院海洋研究所、中国科学院自动化研究所、哈尔滨工程大学、厦门大学、中国船舶重工集团公司第七一五研究所和中国海洋大学等。主要针对水声通信技术、组网协议、体系结构等展开研究。部分研究成果有:中国科学院自动化研究所的基于机器鱼的移动传感器网络实现环境监测的方案^[102];中国科学院声学研究所、中国科学院沈阳自动化研究所和西安光学精密机械所共同研制成功的水下反恐传感器网络监控系统;中国海洋大学在水下传感器网络和海洋立体监测网络领域展开了研究^[83-84, 103-110],研制并在海上部署了水面传感器网络^[111]。图4左侧是水面部署节点,它由水上部分的Telosb节点和我们研制的水下节点组成,上下节点间用

RS-232 相连. 图 4 右侧是在海上实际部署和部署的 21 个节点的实际位置图. 目前实时采集温度、光照和节点间的信号强度等信息, 并计算节点所在位置的海深数值和表面流速数值等实时监测数据供用户通过网络访问使用^[112]. 下一步主要研究海底部部署的水下网络与水面网络的互联组网问题.

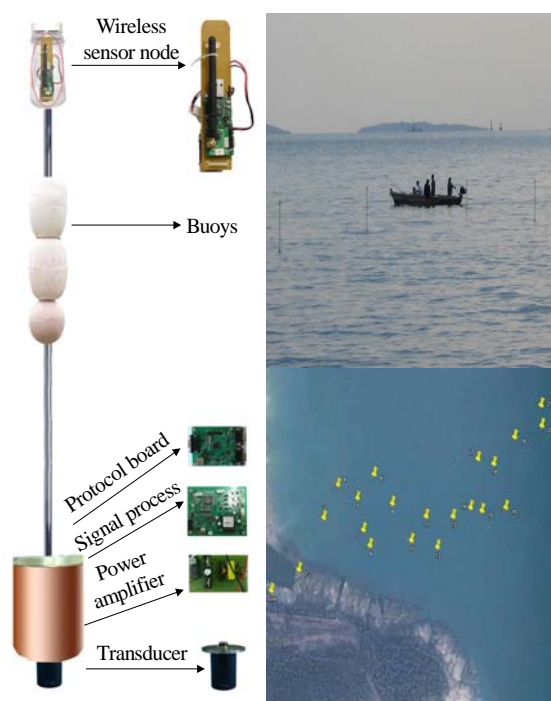


Fig. 4 Marine sensor nodes and deployment.

图 4 海面节点结构及海上部署

国外水下传感器网络研究起步较早, 美国早在 1998 年就进行了实际的水下 Seaweb 组网实验^[6]. 随着对水下传感器网络的日益重视, 有更多的科研机构加入研究, 主要有: 康涅狄格州大学、佐治亚理工学院、南加州大学、麻省理工学院、美国的伍兹霍尔海洋研究所 (WHOI) 和新加坡国立大学等在水下传感器网络领域积极展开研究.

7 结论

水下传感器网络的研究近几年得到了很大的发展, 但仍面临着许多问题和挑战. 目前实际的组网实验很少, 没有成熟的仿真系统, 对水下传感器网络安全问题的研究不够. 另外, 对于跨层设计、宽带水下网络、水下传感器网络的标准化问题以及水下传感器网络互联等问题有待于进一步研究.

尽管水下传感器网络面临许多问题亟待解决, 但随着对水下传感器网络研究的深入, 水下传感器网络必将进入实用, 为合理开发我国蓝色国土、振兴海洋经济和实现又好又快地发展我国经济提供有力保障.

参 考 文 献

- 1 Li Jianzhong, Gao Hong. Survey on network Research [J]. Journal of Computer Research and Development, 2008, 45(1):1-15 (in Chinese)
(李建中, 高宏. 无线传感器网络的研究进展 [J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(1):1-15)
- 2 Cui Li, ju Hailing, Miao Yong, *et al.* Overview of wireless sensor networks [J]. Journal of Computer Research and Development, 2005, 42(1):163-174 (in Chinese)
(崔莉, 鞠海玲, 苗勇, 等. 无线传感器网络研究进展 [J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(1):163-174)
- 3 Lionel M. Ni, Yunhao Liu, Yanmin Zhu. China's National Research Project on Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2007, 14: 78-83
- 4 REN Feng-Yuan, HUANG Hai-Ning, LIN Chuang. Wireless sensor networks [J]. Journal of Software, 2003, 14(7):1282-1291
(任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(7):1282-1291)
- 5 I F Akyildiz, D Pompili, T Melodia. State of the art in

- protocol research for underwater acoustic sensor networks [C]. Proc of the 1st ACM international workshop on Underwater networks. New York, ACM, 2006: 7-16
- 6 J Rice, D Green. Underwater acoustic communications and networks for the US Navy's Seaweb Program [C]. Proc of the second International Conference on Sensor Technologies and Applications. Washington, IEEE, 2008: 715-722
- 7 Li Shuqiu, Li Qihu, Zhang ChunHua. Development and applications of underwater acoustic sensor network [J]. Physics, 2006, 35(11): 945-952 (in Chinese)
(李淑秋, 李启虎, 张春华. 第六讲水下声学传感器发展和应用 [J]. 物理, 2006, 35(11): 945-952)
- 8 《全国海洋经济发展规划纲要》 [EB/OL]. <http://www.coi.gov.cn/xzwyj/200802/P020080225502710606416.doc>, 2008-02
- 9 F Schill, U R Zimmer, J Trumpf. Visible Spectrum Optical Communication and Distance Sensing for Underwater Applications [C]. Proc of Robotics and Automation. Australian Robotics and Automation Association, Brisbane, 2004: 11-18
- 10 T F Wiener, S Karp. The Role of Blue/Green Laser Systems in Strategic Submarine Communications [J]. IEEE Transactions on Communications, 1980, 28(9): 1602-1607
- 11 N Farr. Optical Modem Technology for Seafloor Observatories [C]. Proc of IEEE OCEANS 2005. Boston, IEEE, 2006: 1-6
- 12 I Vasilescu, K Kotay, D Rus, *et al.* Data Collection, Storage, and Retrieval with an Underwater Sensor Network [C]. Proc. of ACM SenSys05. New York, ACM, 2005:154-165
- 13 2008 LinkQuest Inc. site [OL]. <http://www.link-quest.com/html/intro1.htm>
- 14 2008 DSPComm Inc. site [OL]. http://www.dspcomm.com/products_aquanetwork.html
- 15 2008 Tritech Inc. [OL]. http://www.tritech.co.uk/products/products-micron_modem.htm
- 16 Jack Wills, Wei Ye, John Heidemann. Low-power acoustic modem for dense underwater sensor networks [C]. Proc of the First ACM International Workshop on Under Water Networks. New York, ACM, 2006:79-85
- 17 A F Harris III, M Stojanovic, M Zorzi. When Underwater Acoustic Nodes Should Sleep With One Eye Open: Idle-time Power Management In Underwater Sensor Networks [C]. Proc of the First ACM International Workshop on UnderWater Networks. New York, ACM, 2006: 105-108
- 18 J Jaffe, C Schurgers. Sensor Networks of Freely Drifting Autonomous Underwater Explorers [C]. Proc of the First ACM International Workshop on UnderWater Networks. New York, ACM, 2006: 93-96
- 19 J Partan, J Kurose, B N Levine. A Survey of Practical Issues In Underwater Networks [C]. Proc of the First ACM International Workshop on UnderWater Networks. New York, ACM, 2006: 17-24
- 20 R Stokey, A Roup, V Alt. Development of the REMUS 600 Autonomous Underwater Vehicle [C]. Proc of OCEANS 2005. Washington, IEEE, 2005: 1301-1304
- 21 D M Crimmins, C T Patty, M A Beliard, *et al.* Long Endurance Test Results of the Solar-Powered AUV System [C]. Proc of Oceans 2006. Washington, IEEE, 2006: 1-5
- 22 D L Rudnick, R E Davis, C C Eriksen, *et al.* Underwater Gliders for Ocean Research [J]. MARINE TECHNOLOGY SOCIETY, 2004, 38:73-84

- 23 E Cayirci, H Tezcan, Y Dogan, *et al.* Wireless sensor networks for underwater surveillance systems [J]. *Ad Hoc Networks*, 2006, 4(4): 431-446
- 24 Li Yan, Luo Xuye. Discuss on Conception and Application of Sensor Networks [J]. *Ocean Monitoring Ocean Technology*, 2006,25(4) (in Chinese)
(李彦, 罗续业. 海洋监测传感器网络概念与应用探讨 [J]. *海洋技术*, 2006, 25 (4): 33-35)
- 25 A M Mahdy. A perspective on marine wireless sensor networks [J]. *Journal of Computing Sciences in Colleges*, 2008, 23 (6): 89-96
- 26 C S Clay, H Medwin. *Acoustical Oceanography: Principles and Applications* [M]. John Wiley & Sons, New York, NY, 1977
- 27 D B Kilfoyle, A B Baggeroer. The State of the Art in Underwater Acoustic Telemetry [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2000, 25(1):4-27
- 28 R Istepanian, M Stojanovic. *Underwater Acoustic Digital Signal Processing and Communication Systems* [M]. Massachusetts: kluwer Academic Publishers, 2002
- 29 A A Syed, W Ye, J Heidemann. T-Lohi: A New Class of MAC Protocols for Underwater Acoustic Sensor Networks [C]. *Proc of INFOCOM 2008*. Washington, IEEE, 2008: 231-239
- 30 Chen Jinming, Chen Guihai, Yan Yunpei, *et al.* Research Status on Underwater Wireless Sensor Networks [J]. *Computer Science*, 2007 34 (9) : 303-307 (in Chinese)
(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) (专刊) : 303-307)
- 31 Cai Hui-Zhi, Liu Yun-Tao, Cui Hui, *et al.* Acoustic Communication and Its recent Progress [J]. *Physics*, 2006, 35(12): 1038-1043 (in Chinese)
(蔡惠智, 刘云涛, 蔡慧, 等.第八讲 水声通信及其研究进展 [J]. *物理*, 2006, 35(12): 1038-1043)
- 32 E Courses, T Surveys. OFDM for underwater acoustic communications: Adaptive synchronization and sparse channel estimation [C]. *Proc of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP2008*. Washington, IEEE, 2008: 5288-5291
- 33 M Stojanovic, J Preisig. Underwater Acoustic Communication Channels: Propagation Models and Statistical Characterization [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2009, 47(1): 85-89
- 34 S Roy, T M Duman, V McDonald, *et al.* High rate communication for underwater acoustic channels using multiple transmitters and space-time coding: Receiver structures and experimental results [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2007, 32(3):663-688
- 35 Baosheng Li, Shengli Zhou, M Stojanovic, L Freitag, *et al.* MIMO-OFDM over an underwater acoustic channel [C]. *Proc of MTS/IEEE OCEANS conference 2007*. Washington, IEEE, 2007:1-6
- 36 Baosheng Li, Jie Huang, Shengli Zhou, *et al.* Further results on high-rate MIMO-OFDM underwater acoustic communications [C]. *Proc of MTS/IEEE OCEANS conference 2008*. Washington, IEEE, 2008:11-16
- 37 M Stojanovic. Adaptive Channel Estimation for Underwater Acoustic MIMO OFDM Systems [C]. *Proc of IEEE 13th Digital Signal Processing Workshop*. Washington, IEEE, 2009: 132-137
- 38 L F M Vieira, J Kong, U Lee, *et al.* Analysis of ALOHA protocols for underwater acoustic sensor networks [C]. *Proc*

- of the First ACM International Workshop on Under Water Networks. New York, ACM, 2006: 1-2
- 39 J H Gibson, G. G. Xie, Y Xiao, *et al.* Analyzing the Performance of Multi-hop Underwater Acoustic Sensor Networks [C]. Proc of MTS/IEEE Oceans Conference 2007. Washington, IEEE, 2007: 1-6
- 40 N Chirdchoo, W S Soh, K C Chua. ALOHA-based MAC Protocols with Collision Avoidance for Underwater Acoustic Networks [C]. Proc of Infocom2007. Washington, IEEE, 2007: 2271-2275
- 41 M Chitre, S Shahaabudeen, M Stojanovic. Underwater Acoustic Communications and Networking: Recent Advances and Future Challenges [J]. Marine Technology Society Journal, 2008, 42(1):103-116
- 42 J Heidemann, W Ye, J Wills, *et al.* Research Challenges and Applications for Underwater Sensor Networking [C]. Proc IEEE Wireless Communication and Networking Conference 2006. Washington, IEEE, 2006: 228-235
- 43 P Xie, J H Cui. Exploring Random Access and Handshaking Techniques in Large-Scale Underwater Wireless Acoustic Sensor Networks [C]. Proc of OCEANS 2006. Washington, IEEE, 2006:1-6
- 44 X Guo, M R Frater, M J Ryan. A Propagation delay tolerant Collision Avoidance Protocol for Underwater Acoustic Sensor Networks [C]. Proc of MTS/IEEE OCEANS 2006. Washington, IEEE, 2007: 1-6
- 45 B Peleato, M Stojanovic. A MAC Protocol for Ad-Hoc Underwater Acoustic Sensor Networks [C]. Proc of the First ACM International Workshop on Underwater Networks 2006. New York, ACM, 2006: 113-115
- 46 M Molins, M Stojanovic. Slotted FAMA: a MAC protocol for underwater acoustic networks [C]. Proc of MTS/IEEE OCEANS 2006, Boston. Washington, IEEE, 2007: 1-7
- 47 P Guo, T Jiang, G Zhu, *et al.* Utilizing acoustic propagation delay to design MAC protocols for underwater wireless sensor networks [J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2008, 8(8):1035-1044
- 48 A Syed, J Heidemann. Time Synchronization for high latency acoustic network [C]. Proc of INFOCOM2006. Washington, IEEE, 2006:1-12
- 49 G A car, A E Adams. ACMENet: an underwater acoustic sensor network for real-time environmental monitoring in coastal areas [C]. Proc of Radar, Sonar, and Navigation, 2006. Washington, IEEE, 2006: 365-380
- 50 Lu Hong, Feng Hong, Zhongwen Guo, *et al.* A TDMA-based MAC Protocol in Underwater Sensor Networks [C]. Proc of Wicom2008. Washington, IEEE, 2008:1-4
- 51 C C Hsu, K F Lai, C F Chou, *et al.* ST-MAC: Spatial-Temporal MAC Scheduling for Underwater Sensor Networks [C]. Proc. of INFOCOM 2009.
- 52 L Freitag, M Stojanovic, S Singh, *et al.* Analysis of Channel Effects on Direct-sequence and Frequency-hopped Spread-spectrum Acoustic Communication [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001,26(4): 586-593
- 53 D Pompili, T Melodia, I F Akyildiz. A Distributed CDMA Medium Access Control for Underwater Acoustic Sensor Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(4): 1899-1909
- 54 M Stojanovic, L Freitag. Multi-channel Detection for Wideband Underwater Acoustic CDMA Communications [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2006,31(3):685-695

- 55 G ie, J Gibson. A Network Layer Protocol for UANs to Address Propagation Delay Induced Performance Limitations [C]. Proc of OCEANS 2001, Honolulu. Washington, IEEE, 2001: 1-8
- 56 D Pompili, T Melodia, I F Akyildiz. A Resilient Routing Algorithm for Long-term applications in Underwater Sensor Networks [C]. Proc of MedHoc Net 2006. New York, ACM, 2006: 298-309
- 57 K Y Foo, P R Atkins, T Collins, *et al.* A routing and channel access approach for an ad hoc underwater acoustic network [C]. Proc of MTS/IEEE OCEANS 2004. Washington, IEEE, 2004:789-795
- 58 H Yan, Z J Shi, J Cui. DBR: Depth-Based Routing for Underwater Sensor Networks [J]. LECTURE NOTES IN COMPUTER SCIENCE, 2008,4982:72-86, Springer
- 59 V Chandrasekhar, W K Seah, Y S Choo, *et al.* Localization in underwater sensor networks: survey and challenges [C]. Proc of the First ACM International Workshop on Underwater Networks 2006. New York, ACM, 2006: 33-40
- 60 P Xie, J H Cui, L Lao. VBF: Vector-based forwarding protocol for underwater sensor networks [R]. University of Connecticut, Computer Science and Engineering Dept., Tech Rep: UbiNet-TR05-03, 2006
- 61 N C Nicolaou, A G See, P Xie, *et al.* Improving the Robustness of Location-Based Routing for Underwater Sensor Networks [C]. Proc of Oceans 2007. Washington, IEEE, 2007: 1-6
- 62 E A Carlson, P P Beaujean, E An. Location-Aware Routing Protocol for Underwater Acoustic Networks [C]. Proc of OCEANS 2006. Washington, IEEE, 2006: 1-6
- 63 J M Jornet, M Stojanovic, M Zorzi. Focused beam routing protocol for underwater acoustic networks [C]. Proc of WUWNet 2008. New York, ACM, 2008: 75-82
- 64 Z Zhou, J H Cui. Energy efficient multi-path communication for time-critical applications in underwater sensor networks [C]. Proc of Mobihoc 2008. New York, ACM, 2008: 221-230
- 65 G Yang, Xiao, M B, Cheng E, *et al.* Energy saving route finding mechanism in underwater acoustic sensor networks [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2009, 32: 88-92
- 66 Z Guo, G Colombi, B Wang, *et al.* Adaptive routing in underwater delay/disruption tolerant sensor networks [C]. Proc of Fifth IEEE/IFIP Annual Conference on Wireless On demand Network Systems and Services (WONS'08). Washington, IEEE, 2008: 31-39
- 67 Peng Xie, Jun-Hong Cui. An FEC-based Reliable Data Transport Protocol for Underwater Sensor Networks [C]. Proc of 16th International Conference on Computer Communication and Networks. Washington, IEEE, 2007: 747-753
- 68 Zheng Guo, Bing Wang, Peng Xie, Wei Zeng, *et al.* Efficient error recovery with network coding in underwater sensor networks [J]. Ad Hoc Networks, 2009, 7(4): 791-802
- 69 Bin Liu Garcin, F. Fengyuan Ren, *et al.* A Study of Forward Error Correction Schemes for Reliable Transport in Underwater Sensor Networks [C]. In Proc of SECON'08. Washington, IEEE, 2008:197-205
- 70 A G Ruzzelli , G O'Hare, Jurdak, R. MERLIN: Cross-layer integration of MAC and routing for low duty-cycle sensor networks [J]. Ad Hoc Networks, 2008, 6(8): 1238-1257

- 71 D Pompili, I F Akyildiz. A cross-layer communication solution for multimedia applications in underwater acoustic sensor networks [C]. In Proc of MASS'08. Washington, IEEE, 2008:275:284
- 72 M C Vuran, I F Akyildiz. Cross-Layer Packet Size Optimization for Wireless Terrestrial, Underwater, and Underground Sensor Networks [C]. In Proc of INFOCOM'08. Washington, IEEE, 2008: 226-230
- 73 Yan Huang, Wei Liang, Hai-bin Yu, *et al.* Target tracking based on a distributed particle filter in underwater sensor networks [J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2008, 8(8): 1023-1033
- 74 I S Kulkarni, D Pompili. Coordination of Autonomous Underwater Vehicles for Acoustic Image Acquisition [C]. Proc of WUWNet'08. New York, ACM, 2008: 27-34
- 75 Q Liang, X Cheng. Underwater acoustic sensor networks: Target size detection and performance analysis [J]. *Ad Hoc Networks*, 2009, 7(4): 803-808
- 76 Sun Limin, Li Jianzhong, Chen Yu, *et al.* *Wireless sensor networks* [M]. TSINGHUA UNIVERSITY PRESS, 2005
(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)
- 77 X Chen, H Shu, Q Liang, *et al.* Silent positioning in underwater acoustic sensor networks [J]. *IEEE Transactions on vehicular technology*, 2008, 57(3): 1756-1766
- 78 M Erol, L F M Vieira, M Gerla. Auv-aided localization for underwater sensor net-works [C]. Proc of International Conference on Wireless Algorithms Systems and Applications (WASA2007). Washington, IEEE, 2007: 44-54
- 79 Z Zhou, J Cui, A Bagtzoglou. Scalable Localization with Mobility Prediction for Underwater Sensor Networks [C]. Proc of INFOCOM2008. Washington, IEEE, 2008:2198-2206
- 80 W Cheng, A Teymorian, L Ma, *et al.* Underwater localization in sparse 3D acoustic sensor networks [C]. Proc of INFOCOM 2008. Washington, IEEE, 2008: 236-240
- 81 V Chandrasekhar, W Seah. An area localization scheme for underwater sensor networks [C]. Proc of OCEANS 2006. Washington, IEEE, 2006:1-8
- 82 Y Zhou, J He, K Chen, *et al.* An Area Localization Scheme for Large Scale Underwater Wireless Sensor Networks [C]. Proc of International Conference on Communications and Mobile Computing 2009. Washington, IEEE, 2009:543-549
- 83 H Luo, Y Zhao, Z Guo *et al.* UDB: Using directional beacons for localization in underwater sensor networks [C]. Proc of ICPADS2008. Washington, IEEE, 2008: 551-558
- 84 H Luo, Z Guo, W Dong *et al.* LDB: Localization with Directional Beacons for Sparse 3D Underwater Acoustic Sensor Networks [J]. *Journal of Networks*, 2010, 5(2): 90-101
- 85 Marc Greis [OL]. Tutorial for the Network simulator ns. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/tutorial>
- 86 2008 OPNET [OL].<http://www.opnet.com>
- 87 2008 OMNeT++ community [OL]. <http://www.omnetpp.org>
- 88 F Albert, Harris III, Michele Zorzi. Poster Abstract: Modeling the Underwater Acoustic Channel in ns2 [C]. Proc of WUWNet 2007. New York, ACM, 2007: 11-13
- 89 Bai Jie-yin, Liang Wei, Yu Hai-bin, *et al.* Research on the channel simulation of underwater acoustic networks [J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2008,29(1): 185-188 (in Chinese)
(白洁音, 梁韡, 于海斌, 等. 水声通信网络信道仿真研

- 究 [J]. 小型微型计算机系统 ,2008,29(1): 185-188)
- 90 Sun Gui-zhi, SANG En-fang, WANG Kai-yu. Simulation of data link layer protocols for underwater acoustic networks [J]. Technical Acoustics, 2006,25(2):150-153 (in Chinese)
(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)
- 91 A Caruso, F Paparella, LFM Vieira, *et al.* The Meandering Current Mobility Model and its Impact on Underwater Mobile Sensor Networks [C]. Proc of INFOCOM2008. Washington, IEEE, 2008: 221-229
- 92 YIN Jing-wei , HUI Jun-ying, HUI Juan *et al.* Underwater Acoustic Communication Based Pattern Time Delay Shift Coding Scheme [J]. China Ocean Engineering, 2006, 20(3):499-508
- 93 Liu YunTao, Yang ShenYuan, Cai HuiZhi. A waveform design method for improving high speed underwater communication performance [J]. Acta Acustica, 2005, 30(5): 435-441 (in Chinese)
(刘云涛, 杨莘元, 蔡惠智. 一种提高高速水下通信性能的基带波形结构设计 [J]. 声学学报, 2005,30(5): 435-441)
- 94 Xu Ru, Cheng En, Liu Hui, *et al.* Underwater acoustic communication system with Trellis Coded Modulation (TCM) technique and its DSP implementation [J]. Marine Sciences, 2005, 29(4):17-22
- 95 Xu Xiaome, Xu Fanghua, Chen Dongsheng. Anti-multipath frequency hopped communication technique in shallow-water acoustic channels [J]. High Technology Letters, 2003,9(2):17-20
- 96 Huang Jianguo, Chen YongZhang Zhang Qunfei, *et al.* Multi-frequency DPSK modulation for long-range underwater acoustic communication [C]. Proc of the Oceans 2005. Washington, IEEE, 2005: 11-14
- 97 Li Hong-Juan, Sun Chao, Li Jing-Hua. Design and simulations of underwater acoustic communication receiver without PLL [C]. Proc of the International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing 2005. Washington, IEEE, 2005:1461-1463
- 98 Hu Zuojin, Wang Changming, Zhu Yunpu, *et al.* Signal Detection for the Underwater Acoustic Voice Communication [C]. Proc of the International Symposium on Test and Measurement 2003. Washington, IEEE, 2003:1-5
- 99 Wang Chang-Ming, Kong De-Ren, Zhu Yun-Pu. Multi-model detection and simulation of underwater acoustic signal [C]. Proc of International Conference on Machine Learning and Cybernetics 2004. Washington, IEEE, 2004: 1-4
- 100 Liu Mingchen, Yang Changqing, Meng Qiao. Underwater Acoustic Communication Network's MAC Protocol and Opanet Network Simulation [J]. Technical Acoustic, 2004, 23(4):119-220 (in Chinese)
(刘明臣, 杨长青, 孟桥. 水下通信网的 MAC 层协议及 TDCDMA 技术的 Opanet 仿真 [J]. 无线通信技术, 2004,23(4):119-220)
- 101 GAO Ming-sheng, LU Ji-ren. The implementation based the finite state machine of a novel multiple access protocol for underwater acoustic networks [J]. Journal Of Circuits And Systems, 2006,11(5): 51-56 (in Chinese)
(高明生, 陆佶人, 一种基于有限状态机的新型水声网络多址接入协议的实现 [J]. 电路与系统学报, 2006,11(5):51-56)
- 102 Shen Zhizhong, Wang Shuo, Tan Min, *et al.* Robot

- fish-based underwater mobile sensor networks for environmental monitoring [C]. Proc of the 15th International Offshore and Polar Engineering Conference 2005. Washington, IEEE, 2005: 11-15
- 103 D Jinfeng, G Zhongwen, C Jiabao, *et al.* Optimum Transmission Range for Underwater Acoustic Sensor Networks [C]. Proc of ICOIN 2008. Washington, IEEE, 2008:1-4
- 104 D Jinfeng, G Zhongwen, C Jiabao, *et al.* PAS: probability and sub-optimal distance-based lifetime prolonging strategy for underwater acoustic sensor networks [J]. Wireless Communications & Mobile Computing, 2008, 8(8):1061-1073
- 105 Z Guo, J Dou, W Han, G Zhang, Z Ha. ATA: adaptive transmission algorithms for prolonging lifetime in underwater sensor networks [C]. Proc of the 1st ACM international workshop on Foundations of wireless ad hoc and sensor networking and computing. New York, ACM, 2008: 69-76
- 106 Z Guo, X Liu, Y Feng. An Adaptive Transmission Control Mechanism for Underwater Acoustic Sensor Network [C]. Proc of NPC 2008 Workshop: the 1st International Workshop on Under Water Networks (CWUWNet 2008). New York, ACM, 2008: 525-530
- 107 Zhongwen Guo, Liu Xiaodong, Feng Yuan, *et al.* TLEO: Time Limited Energy Optimal Algorithm for Underwater Acoustic Sensor Networks [C]. Proc. of Wicom2008. Washington, IEEE, 2008:1-4
- 108 Guangpeng Lv, Zhongwen Guo, Haipeng Qu, *et al.* Study of RFEC-based transport protocol in Underwater Acoustic Sensor Networks [C]. Proc. of Wicom2008. Washington, IEEE, 2008:1-4
- 109 Feng Hong, Yuan Feng, Zhongwen Guo, *et al.* OceanSense: Sensor Network of Realtime Ocean Environmental Data Observation [C]. Proc of Technical Committee on Space, Aeronautical and Navigational Electronics(SANE2008). Japan, Electronic Information Community, 2008: 101-105
- 110 Guo Zhong-wen, Li Zhi-wei. Lifetime Prolonging Algorithms for Underwater Sensor Networks [J]. China Ocean Engineering, 2006, 20(2):325-334
- 111 Zhongwen Guo, Feng Hong, Yuan Feng, *et al.* OceanSense: Sensor Network of Real time Ocean Environmental Data Observation and Its Development Platform [C]. Proc of the 3rd ACM international workshop on underwater networks. New York, ACM, 2008: 23-24
- 112 OceanSense site [OL] <http://osn.ouc.edu.cn>



Guo Zhongwen, born in 1965. He is a professor of Ocean University of China, Ph.D supervisor, senior member of China Computer Federation. He is also a member of sensor networks technical

committee, networks and data communication committee of China Computer Federation. His main research interests include wireless sensor networks, underwater acoustic sensor networks and distributed marine information processing technology.

郭忠文, 1965年生, 博士、教授, 博士生导师, 计算机学会高级会员、传感器网络专业委员会委员、数据通信与网络专业委员会委员, 主要研究方向为无线传感器网络, 水下传感器网络, 海洋信息分布式处理技术。



Luo Hanjiang, born in 1968. Currently a PhD Candidate in Ocean University of China. His research interests include wireless networks, wireless sensor networks and underwater acoustic

sensor networks.

罗汉江, 1968年生, 讲师、博士研究生, 主要研究方向为无线网络、无线传感器网络、水下传感器网络.



Hong Feng, born in 1977. Assistant professor in the department of computer science and technology, Ocean University of China, member of China Computer Federation. His research interests include sensor network, peer-to-peer computing and grid computing.

洪锋, 1977年生, 博士、讲师, 中国计算机学会会员. 主要研究方向为传感器网络、对等计算、网格计算.



Yang Meng, born in 1987. He is a master candidate of Ocean University of China. His main research interests include wireless sensor

networks and underwater sensor networks.

杨猛, 1987年生, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络, 水下传感器网络.



Lionel M. Ni is Chair Professor in the Department of Computer Science and Engineering of Hong Kong University of Science and Technology. His research interests include high performance computer architecture, parallel processing, distributed systems, high-speed networks, pervasive computing and wireless sensor networks.

倪明选博士, 现任香港科技大学计算机科学与工程系讲座教授. 他的研究方向包括: 高性能计算机体系结构、并行处理、分布式系统、高速网络结构、普适计算与无线传感器网络.

Research Background

This work is supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No.2006AA09Z113), the National Natural Science Foundation of China (No.60873248, No.60703082), the National Grand Fundamental Research 973 Program of China (No.2006CB303003). One goal of these projects is to study underwater acoustic sensor networks. Underwater sensor networks can be used for many applications such as oceanographic data collection, pollution monitoring, offshore exploration, disaster prevention, assisted navigation, and tactical surveillance. However, underwater acoustic sensor networks have many unique characteristics such as high delay and delay variance, very low bandwidth, error-prone highly dynamic communication channel. Thus, we must design new algorithms for underwater sensor networks. The projects focus on sensor network architecture, medium access control, data link error control, localization, routing and transport control. In this paper, we give an overview of underwater wireless communication technologies, the design of communication hardware, the underwater network architecture and the characteristics of underwater communication channels. Then we present current research progress in acoustic modulation, medium access control, routing protocols, transport protocols, cross-layer design, networks information processing, localization techniques and simulation environments. We also discuss future research directions in this exciting and emerging research area. Our aim is to design low-cost, low-power, short communication distance underwater acoustic sensor networks.