

水声通信与水声网络的发展与应用

许肖梅

(厦门大学水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室, 厦门 361005)

摘要: 水声信道是迄今为止最为复杂的无线通信信道之一, 其固有的时-空-频变以及窄带、高噪、强多途、长时延传输等特征, 使水声通信和水声网络在性能上还难以满足人们在实际应用中的迫切需求, 面临极大的技术挑战。介绍了水声通信与水声网络的特点和发展现状, 分析了复杂多变的水声信道特点及水声通信所要解决的关键技术, 包括调制、解调技术和信号检测技术; 介绍了水声网络中的拓扑结构、多路访问、MAC 协议和路由选择等方法。最后简要介绍美国 Teledyne Benthos 公司的水声 Modem 和美国海军的海网 Seaweb 网络及国内在此方面所取得的一些进展及应用前景。

关键词: 水声 Modem; 水声网络; 水声信道; Seaweb

中图分类号: TB557

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2009)-06-0811-06

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2009.06.026

Development and applications of underwater acoustic communication and networks

XU Xiao-mei

(Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology,
Ministry of Education, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Underwater acoustic channel is one of the most complex wireless communication channels. The inherent characteristics, such as space-time-frequency varying, narrow-band, high-noise, strong multipath interference, long transmission delay, and large fluctuation, make the effectiveness and reliability of underwater acoustic communication face enormous challenges. In this paper, the features and development of underwater acoustic communications and networks are introduced, the key techniques in UAC and UACN, including modulation, demodulation and signal detection analyzed, and the protocol layer in UACN provided. Finally the 4th generation modem made by Benthos and the US Navy's Seaweb Program and the perspective on development and application of UAC and UACN in China is illuminated.

Key words: underwater acoustic Modem; underwater acoustic network; underwater acoustic channel; Seaweb

1 引言

海洋蕴藏着丰富的资源, 实现海洋观测、资源勘探与开发是当前各海洋国家最为关注的问题之一。近年来, 水声通信与水声网络由于在海洋信息应用领域的不断扩大而取得了很大的进步。军事上, 网络化水声通信技术不断显示出其在海洋军事情报的监听与收集、港口及近岸水域的监测、特别是水下侦察与多节点协作探测、集群管理指挥与调度等

方面的重要性。当前海洋监测范围的扩大和 underwater 武器系统多样化发展趋势迫切要求水声通信在性能上能传得更快、更远, 能更加准确有效地抵抗外部干扰。民用上, 海洋环境与气象研究、海洋资源开发与保护、港口安全与监测效率的提高等大量应用各种水下传感器的工作环境也要求网络化的水下通信监控和管理。

近 20 年来, 高速率、高可靠性水声通信技术的实现, 使水声网络研究目前已成为水声通信领域中一个研究热点。水声网络的实现需要基于高可靠性点对点物理层水声通信技术, 开展多点组网, 达到信息互通、共享的目的, 同时通过无线浮标将上传的数据接入陆地上现有的立体信息网中, 可形成真正意义上的覆盖全球的立体信息网。

收稿日期: 2008-03-17; 修回日期: 2008-07-16

基金项目: 国家自然科学基金(40776022)、福建省科技重点项目(2009N0050)

作者简介: 许肖梅(1960-), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为水声通信与水声网络。

通讯作者: 许肖梅, E-mail: xmxu@xmu.edu.cn

2 水声信道对声传输影响

目前水声通信与水声网络的实际性能极大地偏离了人们从理论分析期望上所能达到的理想效果,最主要的原因还在于声在水下传播时所面临的实际信道情况远非人们通常所用的理论分析或实验室仿真时所做出的种种信道假设条件。

水声信道是迄今为止难度最大的无线通信信道之一。由于水下声传播速度缓慢、海水对声的吸收和海水介质的复杂、多变性,都将对水声信号产生严重干扰,特别是浅海信道中存在的强多途和大信号起伏等给水声通信系统的设计提出了许多技术挑战。如何克服多途干扰、时频和多普勒扩展、时变衰落,是水声通信技术中需要重点解决的问题。

2.1 水声信道的复杂性

水声信道复杂性表现为随机起伏的海面;随机、非均匀、非静止的海水介质及其分布的气泡层;不同尺度的冷暖水团;层流、湍流、内波及涡流;分散式的不均匀体,如鱼群、浮游生物等;声速的随机时空变化;随机不平整的海底;各种海洋噪声:如波浪、风雨、船舶噪声、生物噪声等等,由此构成了海洋介质的复杂性^[1-2]。

2.2 水声信道的多变性

多变性表现在:(1) 时变性。有小尺度时变性,如表面波浪:弱风(1~3s)、中风(8~10s)、强风(20~30s);内波:浅海(几分钟至数十分钟)、深海(数十分钟至数小时);湍流($10^2\sim 10^2$ s)。中尺度,内波等(数小时至数天);天气尺度、涡、峰等(数天至数月);季节尺度:声速剖面、混合层厚度、季节变化。(2) 空变性。水深、声速分布、海底特性与地形;不同的非均匀体:生物、气泡。因此,声学声场结构等因地而异,如多途结构的空变化。(3) 频变性。不同的频率,声传播有着不同的衰减,产生严重的此起彼伏的谱特性。

2.3 强多途和有限频域带宽

(1) 强多途。两类多途:海面、海底反射的“宏观”多途(浅海更强烈);折射形成的“微观”多途(深海更明显)。信号起伏:直达与多途叠加、多普勒频移。(2) 有限频带:因为吸收效应的存在而使得不同传输距离有着不同的频带宽度。

由于水声信道的复杂、随机多变等特性,虽然水声通信是人们普遍接受的水中通信方式,但直到目前还没有商业化的水声通信系统能同时满足人们

对通信距离、通信速率、通信可靠性、通信方向(水平或垂直信道)、信息传输形式等五方面的要求。

3 水声通信

水声通信技术诞生于上世纪中叶,和其他信号处理技术的发展趋势相同,水声通信技术经历了从最初的模拟通信阶段到现今的数字通信过程。上世纪 80 年代,水声通信主要以非相干的 FSK 调制等技术为主,近十几年来,在高速水声通信技术上已由非相干通信向相干通信发展。

3.1 非相干水声通信技术

非相干水声通信方式通常采用移频键控即 MFSK 调制信号,接收端采用基于能量检测的非相干检测方法。为了抗水声多途干扰,非相干通信方式常与水声跳频技术结合,构成水声跳频通信方式。水声跳频通信方式具有结构相对简单,可适应于不同的水声信道,不需要复杂的自适应信道均衡技术,可以在较低信噪比下,实现低误码率的数据传输等性能特点。因此,该通信方式在浅海、深海中都得到了广泛的应用。如美国 Datasonic 公司(后被 Benthos 公司收购,Benthos 目前已被 Teledyne 所收购)生产的 ATM850(也称第一代水声 Modem),常用频率 10kHz,带宽 5kHz,最高传输速率为 1200bps,最远距离为 10km。ATM875(第二代水声 Modem)、ATM885(第三代水声 Modem)以及目前正在研制的第 4 代水声 Modem 均采用非相干通信方式(其中第 4 代水声 Modem 也用到相干通信方式)^[3-4]。非相干通信方式在抗强多途干扰、大信号起伏和低信噪比上具有明显的优势,同时采用跳频通信在水声组网中具有易于实现码分多址等特点。但其存在的主要缺点是带宽利用率较低,很难获得高速率的数据传输速率,一般只有几百 bps。

Benthos 公司采用的典型的多信道“MFSK”信号发射方式如图 1 所示。该发射信号可在带宽 5.12kHz 内同时发射 32 个频率子带。另加两个子带用于信道 Doppler 跟踪,其他的子带用于发射数据信息。数据传输速率从 140bit/s 到 2400bit/s 之间变化。在此发射信号方式中采用了信号捕获、信道测试的几种信号预处理方法,特别是小功耗的 DSP 板(见图 2,第 4 代水声 Modem 板)能稳定工作在高速运动的平台上^[3]。

图 1 中 Modem 发射信号设计分为唤醒、获取和信息 3 个部分。其中,信号唤醒频率设置较为灵敏,用于唤醒水声网络各节点开始工作,后面紧跟

Standard Multi Chammel“MFSK”Benthos Signaling

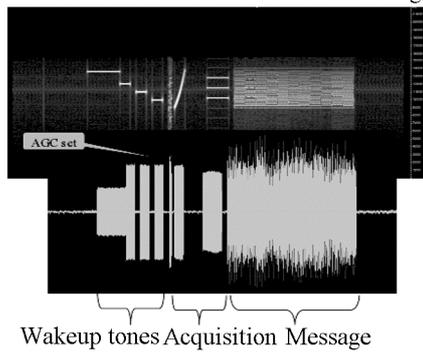


图 1 Benthos 公司的多信道“MFSK”信号方式
Fig.1 Standard multi channel “MFSK” Benthos signaling

From Old to New Modems

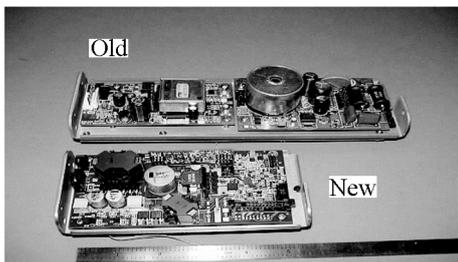


图 2 Benthos 第 3 代和第 4 代(2008)水声 Modem
Fig.2 The third and the 4th generation Modem developed by Benthos

着几个由不同频率组成的 ID 码信号; 接下来为 AGC 信号用于对信道响应进行测试; 信号捕获部分为线性调频 LFM 信号(用于接收端相关检测峰值同步的捕获)以及 Benthos 公司专利产品“多频点 Doppler 频移测试信号”。信息部分由跳频序列组成调制信号。图 3 为 LFM 同步信号淹没在噪声中和采用相关处理后接收到的信号相关峰, 相关峰值可指出信号到达时间, 但当平台相对运动时, 相关峰值在幅度和时间上波形失真严重, 需构建一个捕获-同步多路滤波的子系统, 或采用时-频同步方法进行非相干通信中的同步设计。图 4 为美国 Benthos 公司和美国 WHOI 海洋研究所的跳频图案声谱比较。

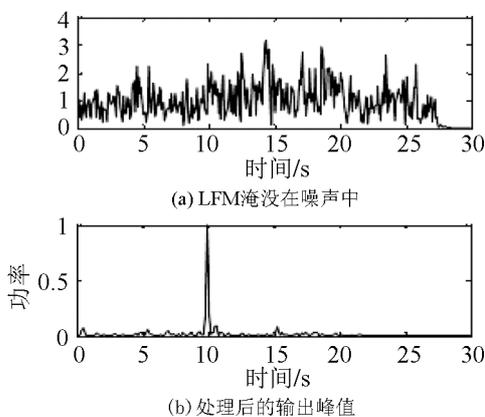


图 3 LFM 同步信号接收
Fig.3 LFM synchronizaiton signal (a) LFM embedded in noise (b) Replica correlation of signal plus noise

厦门大学在浅海水声跳频通信技术上有十多年的研究经验, 在浅海快速同步捕获技术上取得了一些的成果。

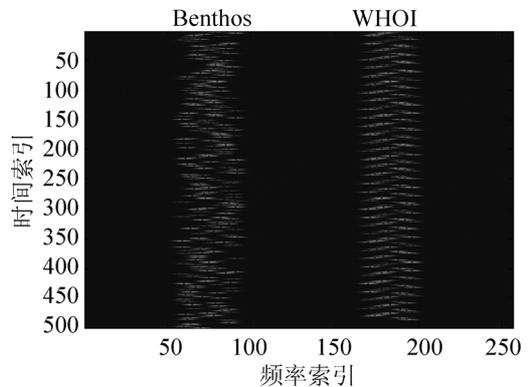


图 4 跳频系统中 Benthos 和 WHOI 的跳频图案声谱比较
Fig.4 Spectrogram comparison of Benthos FH& WHOI FH

3.2 相干水声通信技术

在高速率水声通信上一般采用相干通信方式。发送端发送相移键控即 MPSK 调制信号, 接收端采用二阶数字锁相环和自适应均衡器进行接收, 可以获得比非相干方式高得多的数据传输速率。相干水声通信的高速率是以接收端软、硬件的高复杂性为代价的。由于水声信道的多途干扰及其时变特性, 需要采用复杂的自适应信道均衡技术。目前主要有线性均衡器(LE)和判决反馈均衡器(DFE)两种信道均衡技术。自适应算法也有两种, 即 LMS 算法和 RLS 算法。两种均衡器和自适应算法各具优缺点, 其性能及收敛特性与水声信道的相干时间、多途结构等有关。除自适应信道均衡技术外, 相干水声通信方式还要进行相位估计和补偿、多普勒频移估计和补偿、载波信息的提取等。为了提高接收增益, 进一步降低系统的误比特率, 在复杂的水声衰落信道中目前还采用 MIMO 方式, 即发送端采用多个换能器组成的阵列进行发射声信号, 接收端也采用水听器阵进行接收。除了高复杂性外, 相干水声通信方式的其他缺点还包括信道适应能力较差、要求信道的相干时间长和较高的接收信噪比等。

目前世界上尚无通用的水声相干通信机产品, 仅有使用于某些特定信道下的样机产品。如美国 Linkquest 公司 UWM 系列产品, 主要适用于垂直水声信道; 美国佛罗里达亚特兰大大学采用并行多普勒补偿的自适应反馈均衡器和 BCH 码级联技术及小波声图像压缩技术, 其于 2007 年研制的浅海海底图像传输单载波相干水声通信机, 中心频率 300kHz, 最大带宽 75kHz, 最高传输速率 88kbit/s, 作用距离 88m。

随着硬件水平、信号处理能力的不断提高, 水

声通信的调制方式、信号处理算法等都在逐渐使用各种新的、复杂的技术,如空间调制技术、自适应均衡技术、盲均衡技术、分集接收技术等。近年来,OFDM 通信方式也开始应用于水声高速数据通信系统中,取得了较大的数据速率与通信距离积。OFDM 通信方式的主要缺点是调制信号的峰均比值较大,接收端需要有较大的信噪比才能获得可靠的数据传输,其他技术如 MIMO 和时反水声通信技术也在不断发展和完善之中。

3.3 信道纠错码技术

无论非相干、相干,还是 OFDM 通信方式,要获得满足水声通信工程应用需求的误码率,通常都需要采用信道纠错编码技术。在 AWGN 信道下,Turbo 码和 LDPC 码是两种几乎接近香农理论极限的纠错编码方式。图 5 给出该两种纠错编码的性能比较结果^[5]。可见,规则、非规则二进制 LDPC 码、规则 16 进制 LDPC 码的性能较 Turbo 码差,但非规则 8 进制 LDPC 码的性能却较 Turbo 码要好。与 LDPC 码比较,Turbo 码的主要优点是编码过程比较简单、码率固定(1/2 或 1/3)、在码长较小的情况下就具有较好的性能。将 Turbo 译码器与自适应均衡器级联,可构成 Turbo 均衡器结构等。与 Turbo 相比,LDPC 码的优点是码率可以任意设置、译码算法比较简单、码长较大时性能更好、可以明确纠错结果是否有误码等。目前,水声信道下较为常用的仍然是卷积码、Turbo 码,LDPC 码的应用还在研究探索中。迫切需要解决的是如何将 Turbo 码(或 LDPC 码)与具体的水声调制方式相结合,尽量减少编码或译码时的计算复杂度,以便在实时水声通信中的实际应用。

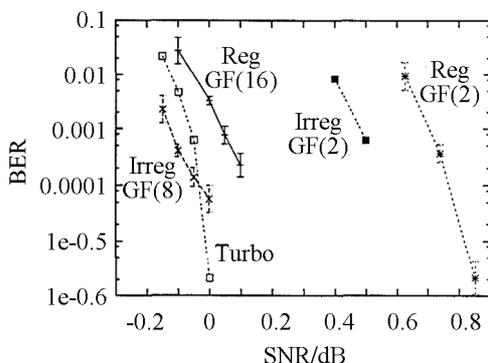


图 5 两种纠错码的性能比较
Fig.5 Performances comparison of two codes

4 水声网络

水声通信网络的研究起步于 20 世纪 90 年代。

90 年代初,美国的 AOSNs(自组织采样网)率先提出“水声网”概念,并以海网 Seaweb 计划进行实践、验证,很快证实了利用声学进行水下组网的可行性,衍生出一系列水声网计划和应用。如 FRONT 沿海大陆架监测计划、分布式 DADS 沿海军事反战计划,展现了水声网络应用的广阔前景^[6-8]。世界各国也纷纷投入这方面研究,经过数十年的发展,在水下信道、水声物理通信、水声网络协议等方面都有很大进展,并已经有成型的网络系统出现。

4.1 水声网络面临的困难

作为最恶劣的无线信道之一,水声网络在设计、信号处理等方面,都面临巨大的挑战。主要有以下几个不利因素限制:

(1) 通信能力受限:与陆上网络相比,水声网络的设计和构建较为困难,很大程度上是由于水声物理层复杂的时、空、频变及强多途、高噪声、多普勒效应等因素所致。

(2) 网络通信效率较低,拓扑结构不稳定:由于网络节点长期工作在水下,能量供应严重受限,往往电池的寿命就直接决定了该网络节点的寿命,因此系统设计的时候要尽可能节约资源。

(3) 由以上两点可见,水声网络的规模受到严重的限制,导致目前水声网络无法规模化、长久化。因为大规模的网络使研究进一步复杂,且规模越大,覆盖范围越大,节点越多,通信中的时延也越大,导致整体网络的性能降低,能量消耗加剧,进一步缩短了网络的寿命。因此,目前的研究还仅停留在短时期内的小型网络上。

4.2 美国海网 Seaweb 介绍

历经 12 年的海网 Seaweb 是美国海军实验性远程声纳和海洋网络计划中的重要部分,是目前比较成功的水声网络概念。从具体技术细节来看,Seaweb 可以支持 2k 字节长度的数据包和 2400bits/s 的通信速率,但是为了改善网络性能和电池续航能力,采用了 350 字节长度的数据包,标称速率为 800bits/s。常用带宽为 9~14kHz,另外还使用了 16~21kHz 和 25~39kHz 两个频带。点对点最大通信距离 10km,部署深度小于 1000m。

水声调制解调器在 Seaweb 计划中发挥着重要作用,承担着数据发送和接收的重要任务,是 Seaweb 乃至任何成熟水声通信网的关键部分。表 1 为美国 Benthos 公司第 4 代水声 Modem(2008)的性能指标。

在 Seaweb 计划的早期阶段使用的是第一代水声调制解调器 ATM850。以时分多址(TDMA)方式,

但网络效率很低只进行了 4 个节点的测试。

表 1 Benthos 第 4 代水声 Modem 性能(2008 年)
Table 1 The fourth generation Modem characteristics

Size	2 Boards	5.7''×2.5''×2.8''
Max Freq		70 kHz
Bandwidth		5~20 kHz
Power-Low		12 mW
Power-Active		400 mW
Input Voltage		10~60 VDC
Digital I/O	4 inputs, 5 outputs	
Processing		200 MIPS
Memory-Ram		4 Mword
Non-coherent data rate		80~1200 bps
Coherent data rate		2500~10000 bps

Seaweb 98 试验使用第二代水声调制解调器 ATM875。Seaweb98 采用 FDMA 方式、树状形式的拓扑结构, 验证了存储转发、自动重传、简单的静态路由等概念。在试验中, 远程自治节点的数据包经过 4 次水声中继和 1 次无线通信中继后, 能可靠地到达岸基指控中心, 证明了采用分布节点群构成广域水声网络的可行性。Seaweb99 增加了节点和网关以及运行在网关上的 Seaweb 服务器, 节点数为 15 个。实现对节点的测距定位、网络配置和网络动态控制。试验表明, FDMA 能有效地在网络中实现多址访问, 但带宽利用率较低。

Seaweb 2000 试验使用了第三代水声调制解调器 ATM885, 网络节点已达 17 个。采用了混合式 CDMA/TDMA 的复用方式, 增加了协议的控制功能。同样是在 2000 年, 美国“海豚”级潜艇使用 ATM885 进行了一系列 Sublink 通信试验。有报道称, 该艇在水深约 122m 处航行时, 通过浮标网关节点中继, 向岸基 Internet 发送了包含文字、图像、图表和其他信息在内的 E-mail 报文。尽管试验发现 Sublink 技术还有待进一步完善, 但它比潜艇现有的单向低数据率超低频(ELF)无线通信优越。“海豚”级潜艇还演示了与水下其他设备的调制解调器进行通信和指挥控制功能。在 Seaweb 网络支持下, Sublink 提供了潜艇隐蔽通信的新手段, 克服了传统通信手段隐蔽性差的弱点。

从 Seaweb 2001 开始用潜艇作为移动节点。Seaweb2003 在东墨西哥湾进行的实验包含了 3 个水下无人器、2 个网关浮标和 6 个分节点(见图 6), 该实验测试了用于追踪和引导水下移动节点的水下测距功能。

Seaweb 2004 用了 40 个节点(见图 7)。试验验证了分布式拓扑结构和动态路由协议。Seaweb 2005 在蒙特利尔湾及圣安德鲁湾进行的 UUV 实验中采

用了六个呈五边形分布、系留在海床上的通信节点, 用于 UUV 导航实验(见图 8)。

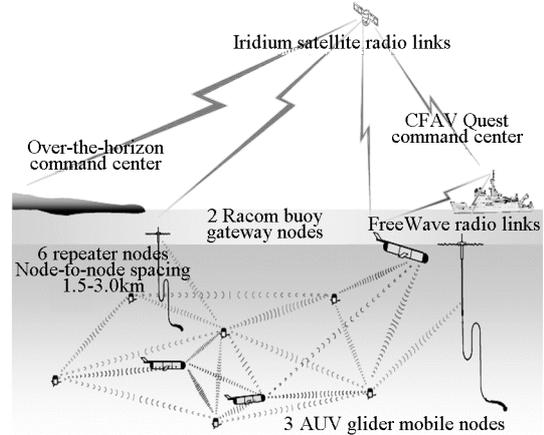


图 6 Seaweb2003 试验示意图
Fig.6 Deployment diagram of Seaweb 2003

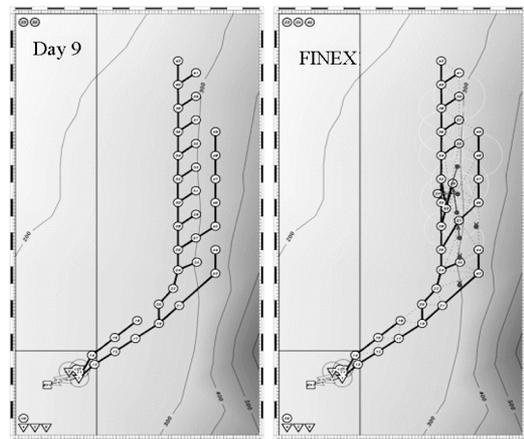


图 7 Seaweb2004 试验示意图
Fig.7 Deployment diagram of Seaweb 2004

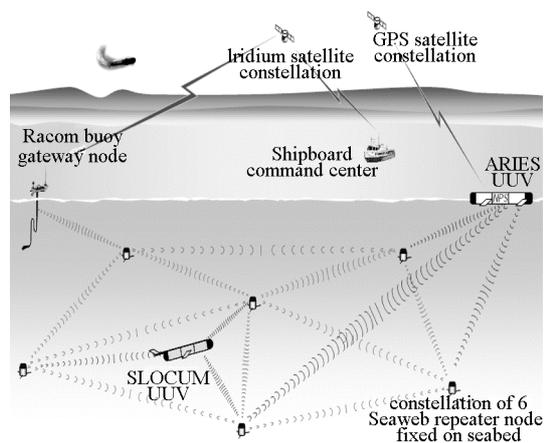


图 8 Seaweb2005 试验示意图
Fig.8 Deployment diagram of Seaweb 2005

4.3 其他水声网络

此外, 国外其他研究机构也开展了不同形式的水声网络实验:

美国伍兹霍尔海洋研究所构建了一套包含

Racom 浮标在内的水下 AUV 控制网络。该系统所用 AUV 源于水下无人采样航行器, 加上侧扫声纳后用于浅海海底测绘和探雷。系统网络通信部分采用变长数据包。网络拓扑情况为主从式和分布式结构。2004 年 5 月的试验显示了系统对所用 AUV 的良好控制效果。同时, 试验显示控制距离取决于水下信道条件: 在水质均匀、硬质海底环境下, 控制距离可达 2000~3000m; 如果是在软质海底环境下, 表面水温又比较高, 控制距离则缩小到大约 1000m。

美国麻省理工学院构建了一套名为 AquaNodes 的水下传感器网络, 并在 2007 年前进行了超过 100 次的湖试和海试。在该项目中, 温度和压力等传感器以及光学照相机作为主要探测设备, 连同水声调制解调器以及一波长 532nm 的绿激光光学调制解调器一起被封装在圆形的防水容器内, 如图 9 所示。网络通信部分采用 TDMA 协议和自同步技术, 以及 30kHz 的 FSK 声学调制解调模式, 在海水和淡水中以 330bits/s 的速率进行 400m 以上距离的通信。



图9 AquaNodes 所用的传感器节点
Fig.9 The sensor nodes of AquaNodes

AquaNodes 系统非常轻便, 可以人工布放。一旦设备布放完成, 可以自动采用 2D 算法或更复杂的 3D 分布式算法进行自身定位。系统由一个 56 W-h 的锂离子电池供电, 在全功率工作模式下自持力为 1-2 周, 而在休眠状态下自持力可达一年, 具备较高的工作性能。

国内水声通信网的建设虽然早在 2001 年或更早的时间有报道在一些单位进行, 但截至目前, 公开报道的水声通信网络海上实验构建的实质性研究成果还较少, 多为理论研究和仿真实验等。中国科

学院声学研究所、中国船舶重工集团第 715 研究所、东南大学、西北工业大学等相关科研院所已进行过小规模水声网络实验, 并在抚仙湖等地进行过实地测试。

5 展望

水声通信与水声网络技术必将在人类探索海洋、认识海洋和开发海洋中发挥越来越重要的作用。未来的水声通信网既可以获取大范围的海洋信息, 也可以快速、便捷地传递、控制和管理各种信息。建立一个庞大的全球海洋温度、海流、潮汐数据和资源监测网络, 并能实现数据的可靠实时传输, 将对人类认识海洋、预警灾害性气候、环境保护等方面发挥非常重要的作用, 无论在军事或是民用上都具有重要的应用前景。主要的应用领域:

- (1) 水声反潜网络;
- (2) 水下潜器的命令和数据传送;
- (3) 水声网络的协作传输与探测技术;
- (4) 网络化海洋环境监测和灾害预警。

参 考 文 献

- [1] Ethem M. Sozer, Milica Stojanovic, John G. Proakis. Underwater Acoustic Networks[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2000, 25(1): 72-83.
- [2] Chitre M, Shahabudeen S, Stojanovic M. Underwater Acoustic Communications and Networking: Recent Advances and Future Challenges[J]. Marine Technology Science Journal, 2008, 42(1): 103-116.
- [3] Dale Green. Underwater acoustic communications and networks[A]. Sixth International Symposium on Underwater Technology[C]. UT2009, Wuxi, China. 2009.
- [4] Joseph A. Rice. Seaweb acoustic com/nav networks[A]. DARPA ATO Disruption Tolerant Networking Program[C]. 2005, August 2.
- [5] Davey M C, Mackay D J C. Low density parity check codes over GF(q) [Z]. ITW 1998, Killarney, Ireland, June: 21-26.
- [6] CUI Junhong, KONG Jiejun, Mario Gerla, ZHOU Shengli. Challenges: Building scalable and distributed underwater wireless sensor networks (UWSNs) for aquatic applications[R]. UCONN CSE Technical Report: UbiNet-TR05-02. Sept. 2005.
- [7] Iuliu Vasiliscu, Carrick Dwtweiler, Daniela Rus. AquaNodes: An underwater sensor network[Z]. WUWNet07. September 14, 2007.
- [8] XIE Peng. Underwater acoustic sensor networks: medium access control, routing and reliable transfer[D]. University of Connecticut, 2007.