

学校编码: 10384

密级\_\_\_\_\_

学号: 31120081151459

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

水声通信网络节点技术研究

Research on technologies of underwater acoustic  
communication network node

周 胜 勇

指导教师姓名: 童峰 教授

专业名称: 海洋物理

论文提交日期: 2011 年 6 月

论文答辩时间: 2011 年 6 月

2011 年 6 月

---

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为（ ）课题（组）的研究成果，获得（ ）课题（组）经费或实验室的资助，在（ ）实验室完成。（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。）

声明人（签名）：

年 月 日

---

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

## 摘要

水声通信技术以及水声通信网在海洋资源勘探开发、海洋环境立体监测、灾难预防、地震预报、辅助导航以及军事战略防卫等方面具有十分重要的战略意义，因此引起世界各海洋国家的极大重视，投入了越来越多的资源。但是水声信道具有非常复杂的强多径、时-空-频变和带宽有限等特性，还有强噪声、传输时延大等特点，其中浅海强多径效应是影响水声通信性能的主要因素，它会导致严重的码间干扰和频率选择性衰落，这些都严重地制约了水声通信和水声网络技术的发展应用。

水声通信节点是水声网络的基础平台，不仅要求有稳定的点对点通信，还需要具备一定的水声组网功能，这就需要分别进行物理层和网络上层的设计。本文选定时间反转技术、扩频技术及节点的基本组网功能开展研究，工作主要集中在物理层通信算法。

论文的主要工作如下：

1. 阐述了时间反转通信技术的发展、原理、主动时反、被动时反及其在水声通信中的应用，并给出了相应的数学推导；
2. 物理层：采用一种改进的便于保证实时通信的被动时反处理，结合扩频技术来构建稳健的物理层数字通信体制。在 DSP 平台上编写实现了水声通信网络节点的物理层通信算法；
3. 网络上层：为了验证本文研究的节点技术方案，设计了一个由三个节点组成的水声验证网络，并在单片机上实现了网络上层的处理算法；
4. 进行湖试和海试，结果表明本文中水声通信网络节点技术方案在浅海信道，特别是多径干扰恶劣的信道具有较好的性能，能够通过时间反转结合扩频技术实现多径聚焦、抵抗码间干扰，同时验证了基本的组网功能。

**关键词：**水声通信；水声网络节点；多径；被动时间反转

## Abstract

Underwater acoustic communication (UAC) and underwater acoustic network (UAN) technology are of great strategic significance in contemporary ocean exploration, marine environmental monitoring, disaster prevention, earthquake prediction and marine military defenses. Thus, they have earned more and more attention by marine nations all over the world. However, shallow-water acoustic channel has the characteristics such as serious multi-path effect, space-time-frequency varying, and very narrow frequency band as well as the properties of high level ambient noise, large propagation delay, thus restrict the development of underwater communication and network seriously.

As the basic platform of UAN, the UAC node requires not only point to point communication ability, but also the function of network process. Thus proper physical layer and network upper layer design are greatly needed. In this paper, we concentrate our work on the physical layer, which utilize passive time reversal and spread spectrum technologies.

The main work is as follows:

1. Describe the development and principle of timer reversal, and then present the active and passive timer reversal as well as their application in UAC, mathematical derivation is also given.
2. Physical layer: To ensure the real-time, stable and steady communication, an improved passive time reversal with the spread spectrum technology is adopted. The modulation-arithmetic and demodulation-alithmetic is programmed on DSP platform.
3. Network upper layer: a three-node, simple network is given for verification the node, the network program is realized on MCU.
4. Lake and sea trials were performed. The result shows that the timer reversal and spread spectrum based physical layer can establish a robust communication in shallow-water, especially in channels with severe

multipath-interference. Meanwhile, the effectiveness of the basic network functions is also verified.

**Keywords:** underwater acoustic communication; underwater acoustic network node; multi-path effect; passive time reversal

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘 要.....	I
Abstract.....	II
<b>第一章 绪 论 .....</b>	<b>1</b>
1.1 引言 .....	1
1.2 水声通信及网络的发展和研究现状.....	2
1.2.1 水声通信技术的研究进展.....	2
1.2.2 水声网络的研究进展.....	6
1.3 水声通信网络节点研究进展.....	8
1.4 本论文的主要内容 .....	9
<b>第二章 水声信道基本特性 .....</b>	<b>11</b>
2.1 引言 .....	11
2.2 海洋声学特性.....	12
2.2.1 海水中的声速.....	12
2.2.2 海洋环境噪声.....	13
2.3 声传输损失.....	15
2.4 多径效应 .....	16
2.4.1 水声信道多径特性.....	16
2.4.2 多径效应的应对策略.....	17
2.5 水声信道对水声网络节点设计的影响.....	19
<b>第三章 时间反转通信技术及扩频技术 .....</b>	<b>20</b>
3.1 时间反转通信技术.....	20
3.1.1 时间反转镜发展简介.....	20
3.1.2 时间反转的时空聚焦原理.....	21
3.1.3 时间反转镜的分类.....	22
3.1.4 时间反转技术在水声通信中的应用.....	26

<b>3.2 直接序列扩频技术</b> .....	<b>27</b>
3.2.1 扩频技术的理论基础.....	27
3.2.2 直接序列扩频基本原理.....	28
3.2.3 DS/DBPSK 原理 .....	28
<b>第四章 水声通信网络节点设计方案</b> .....	<b>31</b>
<b>4.1 水声通信网络节点整体设计</b> .....	<b>31</b>
4.1.1 水声通信网络的特点.....	31
4.1.2 水声通信网络的分层结构和拓扑结构.....	32
4.1.3 水声通信网络节点的框架.....	34
<b>4.2 节点的物理层设计</b> .....	<b>35</b>
4.2.1 被动时间反转技术的改进.....	36
4.2.2 探针信号.....	38
<b>4.3 节点的网络上层设计</b> .....	<b>39</b>
4.3.1 MAC 层协议 .....	39
4.3.2 路由协议.....	41
4.3.3 三点水声验证网络设计.....	41
<b>第五章 水声通信网络节点的实现</b> .....	<b>43</b>
<b>5.1 节点的物理层实现</b> .....	<b>44</b>
5.1.1 TMS320C6713 DSP .....	44
5.1.2 物理层的初始化.....	47
5.1.3 调制.....	47
5.1.4 同步捕获.....	49
5.1.5 解调.....	50
<b>5.2 节点的网络上层实现</b> .....	<b>52</b>
5.2.1 STC89LE58 单片机 .....	52
5.2.2 网络处理.....	52
5.2.3 网络报文解析.....	55
<b>第六章 试验结果及分析</b> .....	<b>57</b>
<b>6.1 厦门五缘湾试验</b> .....	<b>57</b>
6.1.1 信道特点.....	58
6.1.2 物理层通信.....	60

<b>6.2 厦大水库试验 .....</b>	<b>61</b>
6.2.1 信道特点.....	61
6.2.2 物理层通信.....	62
6.2.3 网络性能.....	64
<b>第七章 总 结 .....</b>	<b>67</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>68</b>
<b>攻读硕士学位期间获得的成果 .....</b>	<b>74</b>
<b>致谢.....</b>	<b>75</b>

<b>Abstract (in Chinese)</b> .....	<b>I</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>II</b>
<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Quotation</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Present of underwater acoustic communication and network</b> .....	<b>2</b>
1.2.1 Present of underwater acoustic communication .....	2
1.2.2 Present of underwater acoustic network .....	5
<b>1.3 Present of underwater acoustic communication network node</b> .....	<b>8</b>
<b>1.4 Contents of this dissertation</b> .....	<b>9</b>
<b>Chapter 2 Characteristics of underwater acoustic channel</b> .....	<b>11</b>
<b>2.1 Introduction</b> .....	<b>11</b>
<b>2.2 Marine acoustic characteristics</b> .....	<b>12</b>
2.2.1 Sound speed in the ocean .....	12
2.2.2 Ambient noise .....	13
<b>2.3 Transmission loss</b> .....	<b>15</b>
<b>2.4 Multipath effect</b> .....	<b>16</b>
2.4.1 Multipath characteristics .....	16
2.4.2 Strategy to mitigate multipath effect .....	18
<b>2.5 Impact to the underwater network node design</b> .....	<b>19</b>
<b>Chapter 3 Time reversal and spread spectrum technology</b> .....	<b>20</b>
<b>3.1 Time reversal technology</b> .....	<b>20</b>
3.1.1 Introduction of development.....	20
3.1.2 Principle of space-time focusing.....	21
3.1.3 Sort of time reversal mirror.....	22
3.1.4 Applications of TRM in UAC.....	26

<b>3.2 Direct spread spectrum technology .....</b>	<b>27</b>
3.2.1 Theoretical basis of spread spectrum technology .....	27
3.2.2 Principle of DSSS .....	28
3.2.3 DS/DBPSK .....	28
<b>Chapter 4 Proposal of underwater network node .....</b>	<b>31</b>
<b>4.1 Overall design of UAN node .....</b>	<b>31</b>
4.1.1 Features of UAN .....	31
4.1.2 Hierarchy and topology structure of UAN.....	32
4.1.3 The UAN node framework .....	34
<b>4.2 Physical layer design .....</b>	<b>35</b>
4.2.1 Improved passive time reversal technology.....	36
4.2.2 Probe signal.....	38
<b>4.3 Network upper layer design of UAN node .....</b>	<b>39</b>
4.3.1 MAC protocol .....	39
4.3.2 Rounting protocol .....	41
4.3.3 Verification network design .....	41
<b>Chapter 5 Implemetation of the UAN node .....</b>	<b>43</b>
<b>5.1 Physical layer realization .....</b>	<b>44</b>
5.1.1 TMS320C6713 DSP .....	44
5.1.2 Physical layer initialization.....	47
5.1.3 Modulation.....	47
5.1.4 Synchronization .....	49
5.1.5 Demodulation.....	50
<b>5.2 Network upper layer realization .....</b>	<b>52</b>
5.2.1 STC89LE58 MCU .....	52
5.2.2 Network processing .....	52
5.2.3 Network protocol explanation.....	55
<b>Chapter 6 Experimental results and analysis .....</b>	<b>57</b>
<b>6.1 Wuyuan bay experiment .....</b>	<b>57</b>
6.1.1 Channel features.....	58
6.1.2 Physical layer .....	60

<b>6.2 Xiada reservoir experiment .....</b>	<b>61</b>
6.2.1 Channel features.....	62
6.2.2 Physical layer .....	63
6.2.3 Network performance .....	64
<b>Chapter 7 Summary .....</b>	<b>67</b>
<b>References .....</b>	<b>68</b>
<b>Achievements during study for master degree.....</b>	<b>74</b>
<b>Acknowledgements .....</b>	<b>75</b>

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 第一章 绪论

### 1.1 引言

在我们赖以生存的地球，海洋占据了 71% 的空间，其中蕴藏着丰富的资源，这是人类文明继续向前发展必须要探索的自然空间。当今全球各海洋国家投入了越来越多的资源进行海洋开发，其中水声通信得到了民用和军用两方面的极大关注。民用方面，有水下语音通信、水下机器人、海底勘探、科考船只的数据采集等应用领域。军事用途是水下通信技术最早的驱动力，水雷遥控、舰艇之间、潜艇之间以及各种水下作战平台均需要隐蔽且稳定的信息传输共享。

水声通信系统需要通过非常特殊的水声信道，即通过海水传输信息。海水极为复杂多变，传播过程中海水对声能的吸收和波阵面的扩展会导致信号的衰落；海水的均匀性以及水下存在的大量噪声干扰，还有海面和海底对声波的散射和反射导致的多途现象，都将使水声信号产生畸变。声波在水中的衰减与频率的平方成正比，这个特性导致了水下声信道是带宽受限的。另外，海面的随机波动对于声波的传播速度亦具有不可忽视的影响，且水声信道还是一个随机起伏的信道。因此，存在窄带、高噪、强多途干扰等众多制约因素的随机时-空-频变水声信道特性给水声通信技术提出了许多很高的要求<sup>[1]</sup>。由于海洋环境的特殊复杂性，人类在水下通信的发展水平远不能与陆地和空间通信相媲美。在海水中，无线电波和光波衰减非常严重，声是水下通信的最主要媒介，这就决定了一些在无线电通信和光通信领域中的成熟技术往往并不能直接借用到水下通信。近一个世纪以来，人们对电子通信的理论与应用研究已趋成熟，然而水声通信方面的研究仍有巨大发展空间。直到目前还没有商业化的水声通信系统能同时满足人们在近岸浅海水域对通信作用距离、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。

近年来，由光学中的相位共轭技术发展而来的时间反转技术逐渐被大家所熟知并以其特异性能而成为水声通信技术一个研究热点。时间反转用于水声通信可以重组多径信号而抑制码间干扰，抵消信道衰落的影响，多阵元时间反转镜还有空间聚焦的性能<sup>[2-6]</sup>。扩频通信作为一种数字化通信技术，相比窄带通信系统，

通过扩展频带实现了抗干扰抗多径的能力<sup>[7]</sup>。本文在直接序列扩频技术基础上，结合被动时间反转技术，充分发挥两种技术的优点，在 DSP 上实现了物理层的调制解调算法，为水声网络提供一个稳定可靠的物理层通信平台。在此平台上实现了一个小型的三点网络，通过湖试海试对节点性能进行了验证。

## 1.2 水声通信及网络的发展和研究现状

伴随着无线电，信号处理与芯片硬件水平的飞速发展，水声通信也逐渐发展起来。它经历了从模拟到数字，从非相干到相干，从点对点到网络组织的历史过程。

### 1.2.1 水声通信技术的研究进展

水声通信的起源与军事密切相关，水声通信技术的应用可以追溯到两次世界大战中潜艇的大量使用，1914 年发明的水声电报系统是世界上第一个水声通信系统，被安装到了英国的海军巡洋舰上。当时技术水平局限于水声模拟调制体制，载波频率一般从 2 kHz 到 15 kHz。美国海军水声实验室于 1945 年研制成功主要用于潜艇之间通信的水下电话。该系统使用单边带幅度调制技术，载波频段为 8-11 kHz，工作距离可达数公里，这是世界上第一个水下语音通信系统，直到现在这种体制仍被世界范围内的军事潜艇或科考潜艇广泛采用<sup>[7]</sup>。然而，模拟调制系统的功率利用率非常低，几公里的通信距离往往就需要上百瓦的发射功率，对信道衰落引起的畸变也没有很好的应对策略，极大限制了水声通信系统性能的提高。

上世纪 70 年代以来，电子和信息科学技术接连获得振奋人心的成果，将水声通信带入了数字调制时代。数字技术意味着它可以通过纠错编码技术以显著提高抗干扰性能，增强了数据传输的可靠性<sup>[8, 9]</sup>。2000 年，美国海军利用 BENTHOS 公司的 ATM885 型水声调制解调器将电子邮件 (E-mail) 从水下 400 英尺的潜艇成功发送到陆地。其间通过中等距离的水声无线数据传输后，由其它的通信链路予以中转接入因特网<sup>[10]</sup>。这是历史上人类第一次从水下航行的潜艇中成功地与岸上进行通信，具有十分重要的战略意义。水声数字通信体制主要包括以 MFSK 为代表的非相干检测体制、以 PSK (DPSK、QPSK) 为代表的相干检测体制、

扩频通信体制以及匹配滤波技术。

为了克服多径效应造成的幅度衰落、相位变化和码间干扰的问题，频移键控（FSK）技术被应用到水声通信中，该技术对水声信道的时间和频率扩展有很强的适应能力，避免了载波相位跟踪，抗干扰性好。FSK 系统是用不同的单频信号来调制数字信息，接收端通过窄带滤波对各单频信号进行能量检测并判决。它的弊端在于，需要很宽的频带且一般频率利用率比较低，并要求有较高的信噪比，另外频移键控并没有有效解决多径引起的码间干扰问题。一般的水声 FSK 系统都是采用了诸如保护时间、多频分集以及纠错编码等技术来消除信道多径的影响，因此对于严格带限的水声信道，FSK 不适合较远距离传输且通信速率普遍不高<sup>[11]</sup>。

近 20 年来，大量的研究着重于如何提高通信带宽和数据传输速率，推动了相位相干调制技术的发展。相干通信技术用载波的相位承载信息，信道频道利用率高，可实现高速率通信。在上世界 80 年代，相干通信主要用于高频、近距离或深水的垂直信道<sup>[12]</sup>。在水声相干通信发展中具有里程碑意义的是判决反馈均衡器（DFE）和锁相环（PLL）的引入，正是通过这些技术，相干接收机主动减小了码间干扰的影响，从而获得可靠的相位参考信息<sup>[13]</sup>。

扩展频谱通信技术在无线电通信领域获得了巨大成功，它具有的强抗干扰隐蔽通信以及方便实现码分多址（CDMA）通信等优点，使得这一体制能够适合水声通信的要求。近年来的探索研究集中在将扩频通信技术引入到水声通信中，国外特别是美国在水声扩频通信领域的起步较早，早在 1991 年，美国的 Kwon 和 Birdsall 就将 m 序列和 Gold 序列应用到了远程水声通信系统中<sup>[14]</sup>。扩频技术是唯一能工作在低信噪比条件下的通信技术<sup>[14]</sup>，很多实验证实，扩频与路径分集（RAKE 接收）技术以及空间分集等技术相结合，更容易获得可靠的水声通信<sup>[7]</sup>。

2007 年，Palmese 等人研究的一套水声通信系统<sup>[15]</sup>，结合了直接序列扩频与线性调频两种扩频技术，信息比特 1 和 0 分别由升调频信号和降调频信号调制，然后再经过扩频调制，具有线性调频信号之于多普勒频移低敏感性和直扩之于多径干扰高抵抗性的优点。其接收端采用了多普勒频移跟踪和补偿措施并利用 RAKE 接收技术，在波罗的海进行了传输试验，结果表明，当传输距离为 25 km 时，以 27 bps 的速率传输，误码率低于  $10^{-3}$ 。

Lu 和 Tseng 等利用 DSP 器件设计了一种实时水声直扩调制解调系统<sup>[16]</sup>, 该系统利用滑动相关器与一种改进的非相干延迟锁相环对码元进行同步捕获与跟踪, 并结合了 EGC 和自适应判决反馈均衡器以增强接收机在多径衰落环境下的抗干扰能力。信号载波频率为 18.75 kHz, 比特率为 1210 bps, 采用 QPSK 调制, 接收机采样率 150 kHz, 选用 31 位的 PN 序列作为扩频码。在水箱中进行试验, 在 0 dB 的接收信噪比下得到误码率为  $10^{-1}$ , 采用信道均衡后, 误码率减小至  $10^{-3}$ , 对信号进行 BCH 编码后, 系统误码率可进一步减小至  $10^{-4}$ 。

近年来, 空时分组编码<sup>[17]</sup>、多载波调制<sup>[18, 19]</sup>、信道估计与均衡<sup>[20, 21]</sup>、多输入多输出 (MIMO) 技术等新概念被引入到水声通信中, 并且一系列的最新成果在该领域得到了广泛应用。美国的 Rouseff 等人在西雅图附近海域采用被动相位共轭技术进行了浅海水声通信试验<sup>[22, 23]</sup>, 在 0.65 km 距离, 1.23 kbps 的通信速率下实现了无差错传输。俄罗斯海军以 6 bps 的速率在 2-10 kHz 带宽内利用伪随机编码和反卷积信道均衡技术, 实现了潜艇间的文字传输。结果证实在此低速率指标下, 其主要优点为沿水平方向、大作用距离 (1000 公里)、极低误码率和高隐蔽性<sup>[24]</sup>。2007 年麻省理工的 Stojanovic 等人设计的 OFDM (正交频分复用) 系统采用了 QPSK 调制方式, 带宽为 24 kHz, 在距离 2.5 km 的海试中, 进行了频偏估计的研究, 系统速率达到了 30 kbps<sup>[25]</sup>。

国内开展水声通信研究的高等院校和科研机构有中国科学院声学所、哈尔滨工程大学、西北工业大学、厦门大学、中船重工公司、浙江大学等, 他们形成了自己的特色并取得了一系列的成果。

中科院声学研究所对水下高速通信系统, 特别是对多进制 PSK 调制解调系统和水下 OFDM 通信系统进行了深入的理论和实验研究。其中在水下信道估计技术、分集接收技术、均衡技术、QPSK 和 M-QAM 调制技术、OFDM 调制解调技术、差错控制编码技术等方面取得了大量的技术积累和研究成果, 目前海试结果已达到了误码率为零时, 距离与速率乘积为 132 kbps·km 的水平, 在国内外速率大于 2 kbps 的高速水声通信研究中处于领先地位。其中一次海试于 2005 年 12 月在南中国海进行, 采用 OFDM 高速水声通信系统以及 QAM、MPSK、DPSK 等多种调制方式, 传送多幅图像信息, 其中 16QAM 调制方式在 6.6 km 远处接收解调后, 误码率为 0, 速率为 20 kbit/s。最近他们提出一种频域差分解调 OFDM

跳频水声通信系统, 将 OFDM 和跳频技术二者的优点有机结合, 来提高水声通信的效率和抗干扰能力。通过仿真研究证实频域差分解调比通常的时域差分解调性能有 0.5-1.0 dB 左右的改善<sup>[26]</sup>。

哈尔滨工程大学在扩频通信、正交频分复用、分集和信道均衡、水声通信网路由协议和通信编码方面都有研究, 尤其在信号编解码方面成就突出。他们发展了 Pattern 时延差编码技术, 提出单阵元被动式相位共轭镜信道均衡技术, 并应用于 Pattern 时延差编码移动水声通信系统。2006 年 8 月, 他们在吉林省松花湖进行了首次移动水声通信试验, 信源母船最大航行速度为 9 km/h, 通信速率达到 200 bps<sup>[27]</sup>。跳频时延编码在水平距离 6 km, 水深 30-50 m, 通信速率为 50 bps 的条件下, 仿真得到  $10^{-4}$ - $10^{-5}$  的误码率, 系统稳定可靠<sup>[28]</sup>。2005 年, 哈尔滨工程大学黄晓萍等开发的一套水声直接扩频通信系统, 采用多径分离再合并技术, 再加以 Reed-Solomon 纠错编码, 大大降低了系统的误码率。同时采用了沃尔什快速相关算法, 代替传统的矢量与矩阵相乘运算, 极大地减少了程序的运算量, 保证了实时地处理接收信号。系统参数为中心频率 9 kHz, 每切谱用 8 个正弦波调制, 带宽为 2.25 kHz, 采用的 m 序列周期有 255、511、1023 三种, 通信速率为 8-35 bps。经过湖试与海试, 该通信系统在 10 km 以内传输距离时误码率为  $10^{-6}$ , 在 10-25 km 的范围内误码率为  $10^{-5}$ - $10^{-6}$  数量级<sup>[29]</sup>。

西北工业大学在中远程水声通信方面有较深入的研究, 研究了 M 元 LFM 水声通信技术, 并进行初步海试, 带宽 200 Hz, 水平距离 30 km, 数据率为 11.8 bps 时, 没有出现误码。利用 80 km 海试信道模型, 进行仿真, 在误码率为  $10^{-4}$ , 数据率为 20 bps 时, 带宽利用率达到 0.1 bps/Hz<sup>[30]</sup>; 提出一种基于空时分组编码的水声 MIMO 通信系统, 计算机仿真结果证实该系统较单输入单输出 (SISO) 系统的误码率和频带利用率有很大提高<sup>[31]</sup>。

厦门大学水声通信科研组经过多年的努力, 在浅海水声通信、跳频通信、MFSK 技术等方面取得了成果, 成功研制具有自主知识产权的鲁棒性好、可懂度和清晰度高的数字式水声语音通信样机、水下图像水声传输实用样机、水下 E-mail 传输系统。2003 年研制成水声语音通信机, 在水深 8-20 m 的浅海水平声信道中, 通信距离达 10km, 语音十分清晰、可懂度高<sup>[32]</sup>。

### 1.2.2 水声网络的研究进展

半个多世纪以来,在基于无线电的传感器网络方面,国内外的研究机构都已经取得了丰硕成果,一些成熟技术已经渗透进人们的日常生活中。这些成果为水下无线传感器网络的研究提供了参考。作为一个正在发展的新兴技术,受限于水声信道的恶劣特性,水声通信网络远远滞后于空中无线网络的发展。

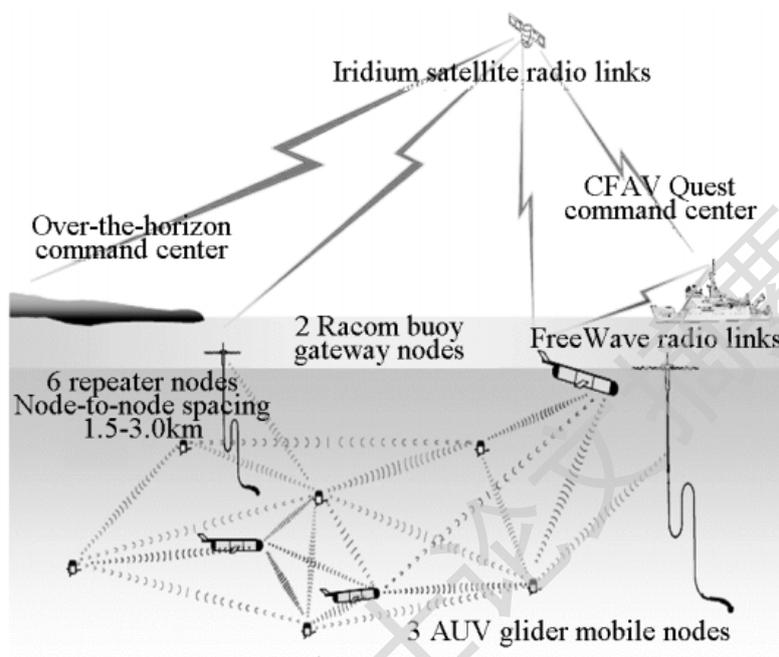
水下网络最初主要以固定在海底的,通过专用缆线相互链接的岸基网络为主。随着现代水声通信技术的发展,同时也是由于各国对水下监视、勘查和探测等方面的需求,从上世纪九十年代起,开始出现以水声为通信媒介的水下声学网络应用概念,如美国在 1993 年提出的自主海洋采样网 (Autonomous Ocean Sampling Network, AOSN); 上世纪 90 年代中期,提出的 DADS 系统 (Deployable Autonomous Distributed System) 概念; 以及 1998 年提出的称为海网 (Seaweb) 的水声网络概念,都是以固定的潜浮标节点和移动的 AUV 和 UUV 节点相结合进行海洋监测或者反潜的水声通信网络。此外,还有 NeMON (New Millennium Observatory Network)、FRONT (The Front-Resolving Observational Network with Telemetry)、ACMENet 等都是水声为媒介的用于对沿海大陆架和海洋气象进行监测的系统。

欧共体在 MAST (Marine Science and Technology program) 计划支持下,开展了名为 ROBLINKS (Long Range Shallow water Robust Acoustic communication Links)、SWAN (Shallow Water Acoustic communication Network) 的水声通信网络研究计划,目标是研究浅水中长距离高数据率的稳健通信算法以及浅水水声通信网络协议算法,提高浅水水声通信网物理层的相关通信技术,建立水声通信网基础模块。

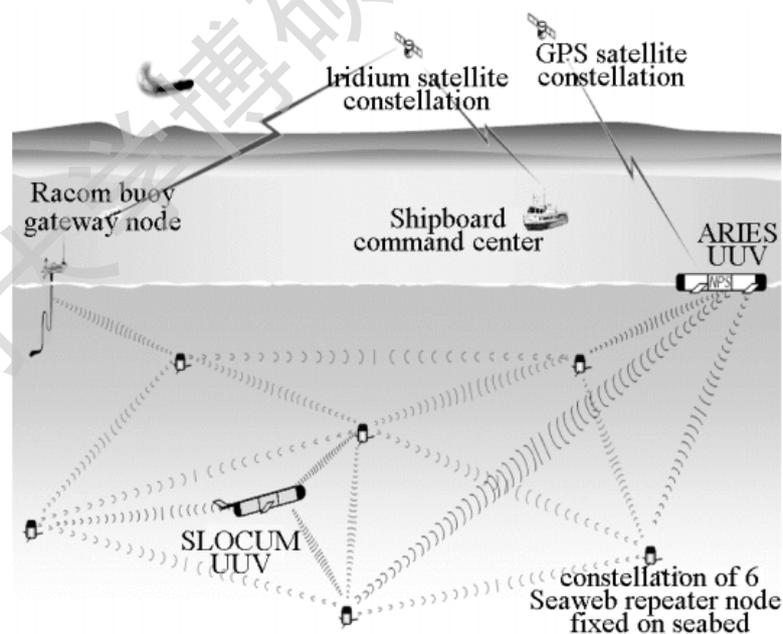
历经 12 年的 Seaweb 计划是美国海军实验性远程声纳和海洋网络计划中的重要部分,是目前比较成功的水声网络概念。从具体技术细节来看, Seaweb 可以支持 2000 字节长度的数据包和高达 2400 bps 的通信速率。不过为了改善网络性能和电池续航能力,目前采用 350 字节长度的数据包,标称速率为 800 bps,常用带宽为 9-14 kHz,另外还使用了 16-21 kHz 和 25-39 kHz 两个频带。点对点最大通信距离可达 10 km,部署深度小于 1000 m。

从 2001 年开始, Seaweb 用潜艇作为移动节点。Seaweb 2003 在东墨西哥湾

进行的试验包含了 3 个水下无人器、2 个网关浮标和 6 个分节点（如图 1.1 a），该试验测试了用于追踪和引导水下移动节点的水下测距功能。



(a)



(b)

图 1.1 Seaweb 试验示意图（2003, 2005）

Fig. 1.1 Deployment diagram of Seaweb（2003, 2005）

Seaweb 2004 部署多达 40 个节点，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 实验中布放了六个呈五边形分布、系留在海床上的通信节点（见图 1.1 b），开展 UUV 导航实验的研究。

国内研究方面，厦门大学研究团队开展了分布式海洋水声通信技术、跨层网络协议的研究，并在千岛湖、五缘湾等地进行了组网实验<sup>[33, 34]</sup>。另外，中科院声学所、中船重工 715 所、东南大学、西北工业大学、哈尔滨工程大学等研究单位也进行了一些小规模水声通信网络试验。但在水声通信网方面国内的总体研究水平与国外还有较大差距。有据可查的水声通信网络实质性成果还较少，主要停留在水声通信网的系统框架、多址接入技术、信道分配、MAC 层协议等通信网技术的理论仿真研究。

### 1.3 水声通信网络节点研究进展

水声通信网络节点承担着数据发送和接收的重要任务，兼顾终端和路由器的双重功能，除了要进行本地信息的收集和数据处理，还要对其他节点转发来的数据进行存储、中继等操作，与其他节点协议来完成一些特定任务，可以说水声通信网络节点是水声通信网的基础。水声通信节点都具有低功耗、物理层通信稳定可靠并且可以在一定程度上自适应信道变化、网络协议及路由方式构造合理。目前的水声网络试验都是基于特殊设计的节点来完成任务。

美国麻省理工大学设计的 AquaNodes 水下传感器网络节点，将温度压力等传感器和一个 640·480 分辨率的照相机作为主要探测设备，连同水声调制解调器和一个波长 532 nm 的绿激光光学调制解调器一起封装在容器内。系统采用 TDMA 协议和自同步技术，声学通信体制为 FSK，载频为 30 kHz。AquaNodes 非常轻便，可以人工布放，自动采用 2D 算法或 3D 算法进行自身定位。系统由一个 56 W·h 的电池供电，在全功率工作模式下自持力为一到两周，而在休眠状态下可以达到一年，具有较高的工作性能。2007 年进行了超过 100 次的试验表明，在海水中可以 330 bps 的速率进行 400 m 或更长距离的数据传输<sup>[35]</sup>，AquaNodes 节点见图 1.2。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库