

军队“2110工程”三期建设教材

水下自组织 网络及军事应用

刘忠 刘志坤 罗亚松 颜冰 胡洪宁 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

军队“2110 工程”三期建设教材

水下自组织网络及军事应用

刘忠 刘志坤 罗亚松 颜冰 胡洪宁 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书系统介绍了水下自组织网络及相关的军事应用,涵盖了水下自组织网络从构建到应用的诸多方面,包括部署与覆盖、水声通信技术、节点自定位算法、路由协议、目标检测算法、目标定位跟踪算法以及美军的一些水下网络实例。

本书内容丰富、结构完整,能够较好地反映国内外在水下自组织网络方面研究的最新进展。各章节之间的逻辑关系紧密,注重理论分析与仿真实验相结合,将有助于读者全面地了解水下自组织网络的关键技术和典型的军事应用方法。

本书既可以作为高等院校相关专业的教材,也可供相关领域工程技术人员和科研人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

水下自组织网络及军事应用/刘忠等编著. —北京:国防工业出版社,2015. 1

ISBN 978 - 7 - 118 - 09718 - 4

I. ①水... II. ①刘... III. ①水下 - 无线电通信 - 自组织系统 - 应用 - 军事技术 - 研究 IV. ①E919

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 228512 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售



*

开本 787 × 1092 1/16 印张 19¼ 字数 472 千字

2015 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 49.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

美军 20 世纪 90 年代末期提出“网络中心战”的概念,引起了新一轮大规模的军事变革。作为“水下网络中心战”的重要支撑,水下自组织网络的研究受到国内外的普遍重视,并蓬勃发展。笔者从事水下武器系统研究多年,深感需要一本全面、系统地介绍水下自组织网络的指导性书籍。希望本书的出版能有助于我国国防装备技术人员对水下自组织网络关键技术的突破,为我军装备建设事业的发展尽一份绵薄之力。

本书共分 12 章,具体包括:水下自组织网络概述、水下自组织网络的部署与覆盖、相位调制水声通信技术、OFDM 水声通信技术、水声通信系统的硬件设计、水下自组织网络节点自定位算法、基于时延的水下自组织网络 MAC 协议研究、基于地理位置信息的实时水下路由协议研究、水下目标检测方法、水下自组织网络目标定位算法、水下自组织网络目标跟踪算法、外军水下作战网络实例等。本书既可以作为高等院校相关专业的教材,也可以供相关领域工程技术人员和科研人员参考使用。

本书的特点是:

(1) 选材独到,特色突出。虽然近年来国内外已经出版了大量涉及传感器网络的优秀著作,但其中具体关于水下自组织网络构建及军事应用的几乎没有,本书针对水下环境特点和军事应用需求,具有鲜明的特色,为水下自组织网络的应用提供了一定的理论指导。

(2) 内容全面,结构完整。本书涵盖了水下自组织网络构建的主要内容及其典型的军事应用。每章逻辑关系紧密而又具有一定的独立性,既可以帮助读者全面了解该领域,同时又可以满足具体某一方面的研究需要。

(3) 研究成果新颖。本书的许多成果来自作者团队近年来参与的“863 计划”项目、国防科技预研项目等。相关内容比较新颖,可以起到抛砖引玉的效果。

本书由海军工程大学刘忠教授组织并统稿,颜冰教授、刘志坤讲师、罗亚松讲师、胡洪宁讲师参与编写。邢军博士、梁玥博士、付学志博士、罗浩博士对本书内容也做出了大量的贡献。

作者特别感谢国防工业出版社刘炯编辑为本书出版所做的大量细致工作。

由于本书涉及内容十分广泛,加之作者水平有限,时间仓促,书中难免存在一些疏漏及错误之处,恳请读者指正。

编者

2014 年 9 月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 引言	1
1.2 水下自组织网络的定义及特点	1
1.2.1 水下自组织网络的定义	1
1.2.2 水下传感器	1
1.2.3 与陆地网络的差异	2
1.3 水下自组织网络的体系结构	3
1.3.1 水下自组织网络体系结构的标准	3
1.3.2 网络的体系结构	3
1.4 水下自组织网络协议设计的关键因素	6
1.5 水下网络的应用	8
1.5.1 民事应用	8
1.5.2 军事应用	9
1.6 本书的概貌和范围	9
参考文献	10
第 2 章 水下自组织网络的部署与覆盖	11
2.1 引言	11
2.2 基于单节点检测的节点部署	12
2.2.1 问题描述及相关模型	12
2.2.2 节点的期望覆盖区域	12
2.2.3 部署策略	13
2.2.4 部署算法	13
2.2.5 仿真分析	16
2.3 基于多节点协作的节点部署	17
2.3.1 问题描述	17
2.3.2 协作节点集的期望覆盖区域	20
2.3.3 基于簇结构检测的节点部署	21
2.3.4 基于邻居节点协作检测的节点部署	24
2.4 多重覆盖部署策略	26
2.4.1 预备知识	26

2.4.2	3 重覆盖部署策略	26
2.4.3	4 重覆盖部署策略	27
2.5	随机性部署调度机制	28
2.5.1	预备知识	29
2.5.2	节点调度算法 CPNSS	29
2.5.3	节点调度算法 GPSA	33
2.6	本章小结	37
	参考文献	37
第3章	相位调制水声通信技术	39
3.1	引言	39
3.2	相位调制移动水声通信信号处理算法	39
3.2.1	相位调制原理	39
3.2.2	相位解调原理	41
3.2.3	水声通信同步技术	43
3.2.4	水声通信多普勒频移补偿技术	46
3.2.5	相位相干移动水声通信算法	48
3.3	水声通信均衡技术	49
3.3.1	高阶统计量与高阶谱	51
3.3.2	盲均衡算法的基带模型与置零准则	54
3.3.3	Bussgang 类盲均衡算法	55
3.3.4	倒三谱信道均衡算法	58
3.3.5	超指数算法	62
3.3.6	BP 神经网络盲均衡算法	63
3.3.7	具有强抗干扰能力的水声通信盲均衡算法	65
3.4	具有同步跟踪能力的水声信道盲均衡算法	73
3.4.1	早—迟积分比相原理	74
3.4.2	具有位同步跟踪能力的盲均衡算法	76
3.4.3	仿真验证及分析	78
3.5	本章小结	80
	参考文献	81
第4章	OFDM 水声通信技术	84
4.1	引言	84
4.2	多载波传输系统数学模型	84
4.3	OFDM 的基本原理	87
4.3.1	OFDM 的调制理论分析	87
4.3.2	OFDM 的解调理论分析	90

4.4	水声信道的多径传播	91
4.4.1	瑞利、莱斯衰落	92
4.4.2	频率选择性衰落	93
4.4.3	OFDM 循环前缀对克服多径效应的影响	94
4.5	OFDM 频域自适应均衡算法	96
4.5.1	传统 OFDM 频域自适应均衡算法	96
4.5.2	OFDM 频域判决反馈自适应均衡算法	99
4.5.3	基于 OFDM 通信信号的自适应信道估计与均衡	103
4.6	本章小结	105
	参考文献	105
第 5 章	水声通信系统的硬件设计	107
5.1	引言	107
5.2	水声通信系统需求	107
5.3	数字信号处理芯片 DSP 的选型	108
5.4	硬件系统设计方案	109
5.4.1	核心处理单元设计	109
5.4.2	人机接口系统	111
5.4.3	水声通信发射机系统设计	112
5.4.4	水声通信接收机系统设计	115
5.5	本章小结	123
	参考文献	124
第 6 章	水下自组织网络节点自定位算法	125
6.1	引言	125
6.2	问题描述及相关算法简介	125
6.2.1	节点自定位算法分类	125
6.2.2	基本算法分析	127
6.2.3	节点定位算法的评价指标	128
6.3	距离无关的 DV - Hop 自定位算法	131
6.3.1	DV - Hop 算法原理	131
6.3.2	DV - Hop 算法的改进研究	132
6.4	基于距离信息的节点自定位算法	134
6.4.1	定位算法	134
6.4.2	适用于纯距离节点定位的无冲突自组织数据传播算法	136
6.4.3	OPNET 仿真与结果分析	138
6.5	基于改进型粒子群优化的节点自定位算法	141
6.5.1	改进型粒子群优化算法	142

6.5.2	节点自定位算法步骤	143
6.5.3	仿真及结果分析	144
6.6	本章小结	147
	参考文献	148
第7章	基于时延的水下自组织网络 MAC 协议研究	150
7.1	引言	150
7.2	非有效信息对 MAC 协议性能的影响	150
7.2.1	传统的 ALOHA 协议和 MACAW 协议	151
7.2.2	非有效信息对两种 MAC 协议的影响	152
7.3	相关 MAC 协议研究	153
7.4	适用于深海环境的 AMS 协议设计	155
7.4.1	深海水声 MAC 协议设计原则	155
7.4.2	AMS 协议概述	156
7.4.3	基本原理	156
7.4.4	协议状态图及描述	160
7.4.5	仿真结果和分析	161
7.5	一种基于 AMS 协议设计的快速水下路由协议 SFBASOP	164
7.5.1	传递路径与传播时延之间的关系	164
7.5.2	基本原理	165
7.5.3	SFBASOP 协议状态图及描述	166
7.5.4	仿真结果与分析	168
7.6	本章小结	171
	参考文献	171
第8章	基于地理位置信息的实时水下路由协议研究	173
8.1	引言	173
8.2	基于地理位置的路由协议研究	173
8.2.1	位置辅助的路由协议	173
8.2.2	基于位置信息的路由协议	174
8.3	设计水声位置信息路由协议所面临的挑战	180
8.4	BFDREAM 协议	181
8.4.1	关键技术	181
8.4.2	数据分组结构	183
8.4.3	BFDREAM 协议的描述和流程图	184
8.5	仿真实验结果与分析	186
8.5.1	仿真环境	186
8.5.2	性能度量	186

8.5.3	实验结果与分析	187
8.6	本章小结	190
	参考文献	190
第9章	水下目标检测方法	192
9.1	引言	192
9.2	水声瞬态信号检测技术	192
9.2.1	水声瞬态信号检测方法探析	193
9.2.2	power-law 检测技术	196
9.2.3	高阶谱检测技术	198
9.2.4	联合检测技术	199
9.2.5	试验分析	208
9.3	水下目标特征提取	211
9.3.1	基于功率谱和 $1\frac{1}{2}$ 维谱的特征提取	212
9.3.2	双谱特征提取	214
9.3.3	基于 STFT 的线谱特征提取	216
9.3.4	螺旋桨轴频估计	218
9.4	本章小结	222
	参考文献	223
第10章	水下自组织网络目标定位算法	225
10.1	引言	225
10.2	质心类定位方法	226
10.2.1	坐标变换方法	226
10.2.2	节点检测模型	227
10.2.3	目标定位的基本原理	227
10.2.4	质心定位法	228
10.2.5	基于 Bounding-Box 的定位方法	228
10.2.6	改进的质心算法	229
10.2.7	仿真分析	230
10.3	基于 m -网格的定位方法	232
10.3.1	定位方法描述	232
10.3.2	简单协作方法	233
10.3.3	仿真分析	233
10.4	基于节点角色分配的协作定位协议	235
10.4.1	协议描述	235
10.4.2	仿真验证与分析	238

10.5	基于时延的目标定位方法	239
10.5.1	目标定位原理	240
10.5.2	误差理论分析	240
10.5.3	时延分辨率和阵元间距的设置	244
10.5.4	基于相关分析的时延估计算法	245
10.5.5	广义互相关时延估计算法	246
10.5.6	仿真试验	251
10.6	本章小结	255
	参考文献	256
第 11 章	水下自组织网络目标跟踪方法	258
11.1	引言	258
11.2	改进的解析目标跟踪算法	258
11.2.1	原有解析跟踪模型	259
11.2.2	改进的跟踪算法	260
11.2.3	模型的求解	262
11.2.4	改进算法在水下自组织网络中的应用	263
11.2.5	仿真分析	263
11.3	基于最小二乘滤波的目标跟踪算法	265
11.3.1	算法描述	265
11.3.2	仿真分析	266
11.4	基于动态分簇的粒子滤波目标跟踪算法	268
11.4.1	问题描述	268
11.4.2	目标跟踪算法	269
11.4.3	仿真分析	273
11.5	基于自适应采样间隔的目标跟踪算法	276
11.5.1	跟踪精度指标	276
11.5.2	自适应采样间隔跟踪算法	277
11.5.3	仿真分析	278
11.6	基于量化观测理论的跟踪算法	281
11.6.1	量化估计原理	281
11.6.2	试验与分析	282
11.7	本章小结	284
	参考文献	284
第 12 章	外军水下作战网络实例	286
12.1	引言	286
12.2	声音监视系统 SOSUS	286

12.2.1	系统简介	286
12.2.2	发展历程	287
12.2.3	系统现状	288
12.3	可部署自主分布式系统(DADS)及海网(Seaweb)	289
12.3.1	DADS 简介	289
12.3.2	Seaweb 简介	290
12.4	先进可部署系统 ADS	291
12.5	近海水下持续监视网络 PLUSNet	292
12.6	本章小结	294
	参考文献	294

第 1 章 概 述

1.1 引 言

无线传感器网络被认为是 21 世纪最具影响力的科学技术之一，已在人类社会中发挥着日益重要的作用^[1,2]。水下自组织网络是现有自组织网络技术在水声通信网络中的应用，因此其研究热点与传统无线自组织网络存在共同点。然而，水下自组织网络具有其自身鲜明的特点。这些特点造成了水下自组织网络在发展过程中遇到的困难更多、挑战也更大，与目前相对较为成熟的陆地传感器网络相比，还存在着许多不尽如人意的地方。

“21 世纪是海洋的世纪”，无论是在海洋资源的开发利用还是在保卫领海安全的军事斗争中，对水下自组织网络的需求均十分迫切。特别是在美军提出“网络中心战”的概念后，为了有效地保障其在水下战场的延伸——“水下网络中心战”，相关的水下网络系统建设得到了极大的重视，通过信息控制权的获取，实现水下战场信息的快速共享，加强各作战平台的联系，从而大幅提高部队的联合作战效能。

1.2 水下自组织网络的定义及特点

1.2.1 水下自组织网络的定义

水下自组织网络可定义为^[3-5]：由布设在水下的节点、水面的浮标节点自主配置组成的分布式、区域覆盖的水下信息网，节点间采用水声信道进行通信，可通过网络对信息进行采集、处理、分类、传输和融合，并将各种信息采用中继方式，回传到陆基或船基的信息控制中心。

所谓“自组织”，指的是网络节点部署后能够确定自己的位置并自行配置和管理，通过拓扑控制和网络协议自动形成有效工作的水下网络，并且在网络环境发生变化或者网络中的部分节点失效后，网络能够自主地、动态地重新进行配置，从而保证继续工作。

1.2.2 水下传感器

经典水下传感器的内部结构如图 1.1 所示。其中：主控制器 CPU 通过传感器接口电路与海洋仪器或传感器连接，接收来自传感器的数据并将其存储在所携带的存储器中，对数据进行处理后由控制水声调制解调器将其送至其他网络装置。在发送数据时，数据信息通过调制编码，然后利用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，利用水声换能器的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。

电子线路通常安装在由 PVC 罩盒保护的框架上。传感器部件设计为可全向水声通信，为了防止某些特别海域的潜在威胁（比如在捕鱼区），需要在底座安装仪器框架对传感器和调制解调器进行保护，防护框架的设计应该能将所有部件保护在锥形框架内^[6]。

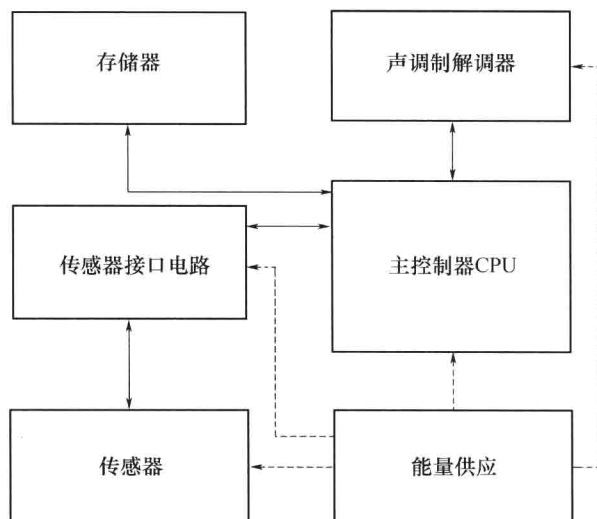


图 1.1 水下传感器节点内部组织结构

水下传感器有许多种类，针对不同的物理、化学指标，研究诸如温度、密度、盐度、酸度、化学成分、传导率、pH 值、含氧量、含氢量、甲烷量和混浊度等。

此外，还有一些特殊用途的水下传感器，包括：用于分光光度测定的电解电量传感器；用于测量金属离子沉积物的金-汞合金电极传感器；用于硫化氢（ H_2S ）测量的微电流传感器；用来研究硫化物氧化和硫酸盐还原特性的传感器；测量有害水华的传感器；测量光辐射的量子传感器；用于水下同时测量几个力和力矩的力/扭矩传感器。

1.2.3 与陆地网络的差异

水下自组织网络与陆地网络存在许多差异，这些差异使得诸多原本适用于陆地网络的算法和协议在水下性能大幅下降甚至不可用，这些差异主要体现在：

(1) 信道。水下网络信道带宽有限，使得水下无线链路的容量远低于陆地无线链路。此外，多径、信道衰落、噪声干扰、多普勒频移等因素都会导致信道出现高误码率甚至中断。

(2) 成本。目前，相较于日益价廉的陆地传感器节点，水下传感器仍然属于一种昂贵装置。这主要是由于在极端的水下环境中需要较复杂的水下收发器和硬件防护。此外，水下小型化电源也会带来较高的单位成本。

(3) 布放。由于水下网络节点造价相对昂贵，因此，在陆地传感器网络常采用的密集布放方式在水下传感器网络中并不多见，水下布放通常较稀疏。

(4) 时延。陆地传感器网络通常采用无线电信号，但是无线电信号在水下衰减严重，而光信号在水中会产生较大的散射，因此都不适合水下信号传播。目前，声信号是水下网络通常采用的通信媒介。由于声信号在水中传播的速度比无线电信号低五个数量级，这就造成水下传播时延更大。此外，声波在水下的传播速度会受到海水盐度、温度及深度的影响，这都会造成传播时延的变化。时延因素导致水下节点之间的时间同步变得异常困难。

(5) 能量。大部分水下节点无法利用太阳能等方式充电，因此节点的能量有限并且难以再补充。因为不同的物理层技术(水声相对无线电波)，距离越远，在接收器端为补偿信道衰减而要实施的信号处理技术越复杂，故水声通信所需能量要高于陆地无线电通信。

(6) 存储。陆地传感器节点的存储能力非常有限，而水下传感器可能需要在水下信道中断时能够进行某种数据暂存，并且要长期处于水下，因此对存储能力的要求更高。

(7) 故障。水下环境相对更加恶劣，鱼群攻击、海水腐蚀以及其他因素都会导致传感器的故障率较陆地网络更高。

1.3 水下自组织网络的体系结构

1.3.1 水下自组织网络体系结构的标准

2006年，美国麻省理工学院、伍兹霍尔海洋研究所与新加坡国立大学声学研究实验室联合提出，利用OSI之中的5个基本层(物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层)建立“水下网络体系结构”(UNA)。其目标是涵盖最初的通用架构标准，使系统内部集成更容易实现。这5个基本层的具体任务和研究内容如下：

(1) 物理层。物理层与物理传输介质直接相连，是信号收发、调制、成帧及纠错的基础。其主要任务是：为数据端设备提供传送数据的通路；传输数据。它的主要研究内容包括：开发高性价比的水声通信调制解调器；设计复杂度低、收敛速度快的次优滤波器；解决信道估计的稳定性问题等。

(2) 数据链路层。数据链路层的主要任务是解决媒体接入控制的问题。其研究内容包括多址技术和差错控制。其中，多址技术主要分为：频分多址、时分多址、码分多址和随机接入方式。而差错控制主要是前向差错纠正和自动重传请求。

(3) 网络层。网络层的主要任务是完成寻址、路由选择、连接的建立、保持和终止等，从而实现数据的及时传送。其主要研究内容包括拓扑结构的设计和路由算法。前者关注网络的可靠性、传输效率及能耗。后者则主要提供使网络工作寿命最大化的高效路由算法。

(4) 传输层。传输层的主要任务是为端对端连接提供传输服务，同时还负责流量控制、差错控制、服务质量等管理。这方面的研究者主要致力于提供适应水下环境的高效可靠的传输层协议。

(5) 应用层。应用层的主要作用是为用户提供服务。其主要研究内容是应用层协议的设计。

水下网络体系结构对水下网络在概念和功能上的框架做出了规定，定义了不同层之间进行通信的“指定原语(Specified Primitives)”应用程序接口，为网络节点提供了通信手段。同时，它对具体的网络协议并未做出强制规定，这就为网络开发提供了足够的灵活性。

1.3.2 网络的体系结构

目前一般认为，水下网络的体系结构有三种：二维水下网络，三维水下网络和带自主水下航行器的三维水下网络。本节分别给出这三种网络体系结构的示意图和相关介绍。

1. 二维水下网络

二维水下网络的参考结构体系如图1.2所示。一组传感器节点锚在海底，水下传感器节点利用无线声链路与一个或多个水下网关(uw-Gateways)相互连接。水下网关是负责从海底网络中继数据到水面站点的网络设备。为达到这个目的，它需要两个声收发器，一个是垂直收发器，一个是水平收发器。水下网关利用水平收发器与传感器节点通信，以便①将指令和配置数据(Configuration Data)发送给传感器(水下网关到传感器)；②收集监控数据(传感器到网关)。水下网关利用垂直链路将数据中继到水面站点。在深水应用中，垂直收发器必须是远程

收发器，水面站点装有能够与所布放的水下网关进行多重并行通信的水声收发器。它通过无线电实现与远距离卫星、岸上接收站及水面平台的通信。在浅水，海底布放的传感器会直接与水面浮标通信，无需专门的水下网关(uw-Gateway)。在海洋学中，浅水指水深小于 100m，更深的海域则称为深水。

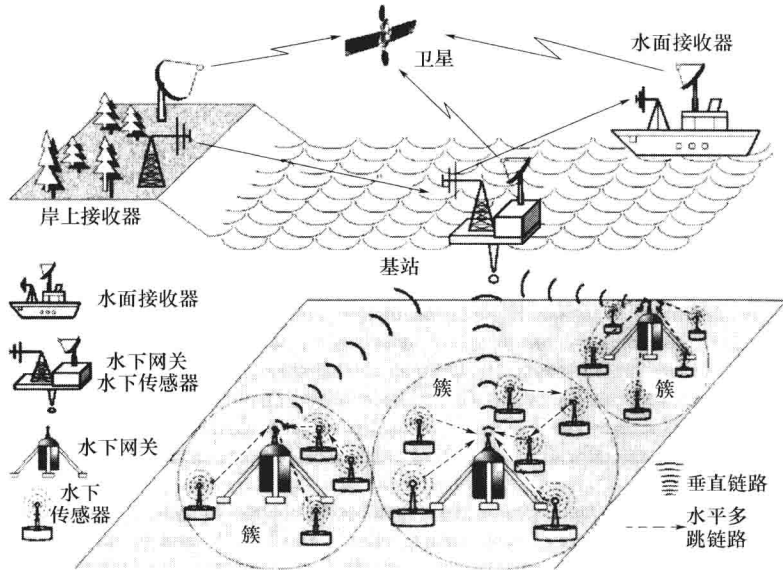


图 1.2 二维水下传感器网络

2. 三维水下网络

三维水下网络用于完成三维海洋环境协作采样工作。在三维水下网络中，传感器节点悬浮在水下不同深度进行观测。如图 1.3 所示，在这种体系结构中，传感器节点锚在海底，并

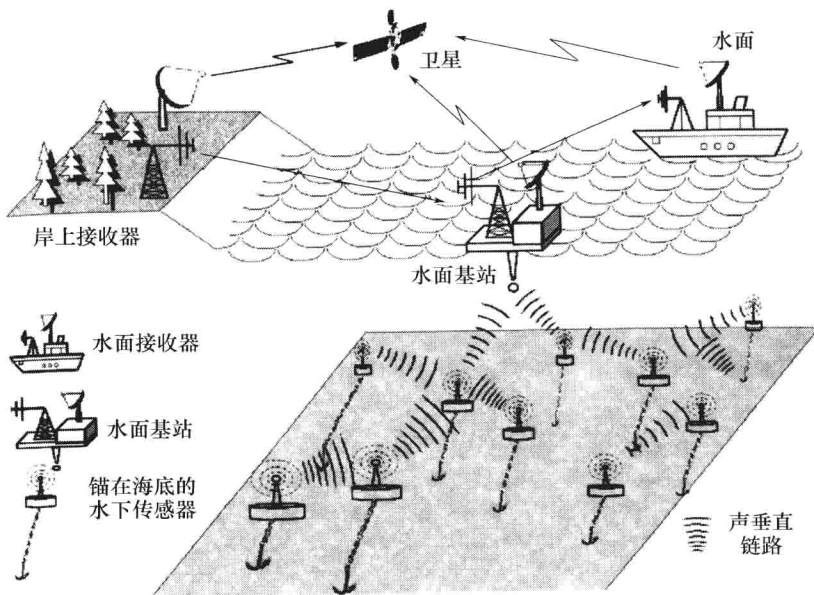


图 1.3 三维传感器网络

装有可以用泵充气的浮标，浮标可以将传感器推向水面。通过控制装在传感器上的电机，可以调节传感器和锚之间的缆绳长度，从而调节传感器所处的深度。

3. 带自主水下航行器的三维水下网络

自主水下航行器(AUV)的造价相对低廉，可配备多种水下传感器，具有很高的使用灵活性，可以遥控工作，能到达海洋中的任何深度，因此被广泛应用。当然，水下传感器网络与AUV的集成需要新的网络协作算法，如：

(1) 自适应采样法。包括指挥机动航行器到达对获取数据最有利位置的控制策略。例如，在指定区域，当对确定的目标监控需要更高的采样率时，可自适应增加传感器节点的密度。

(2) 自配置。包括当节点故障或信道损坏时自动检测网络连通度，并要求AUV干预的控制过程。另外，AUV既可用于传感器网络基础结构的安装和维护，也可用于布设新的传感器节点。

AUV的设计目标之一是使之尽量接受本地指令而不是依靠岸上联机通信^[7]。这就需要相应的控制策略，使其能够自动建立坐标系、自主航行和规避障碍物。太阳能供电系统可以延长AUVs的寿命，不需要每天对航行器恢复和再充电。因此，太阳能驱动的AUVs可以获得以月为单位的时间周期长度的连续信息。带有AUVs的三维水下网络的结构体系可参考图1.4。

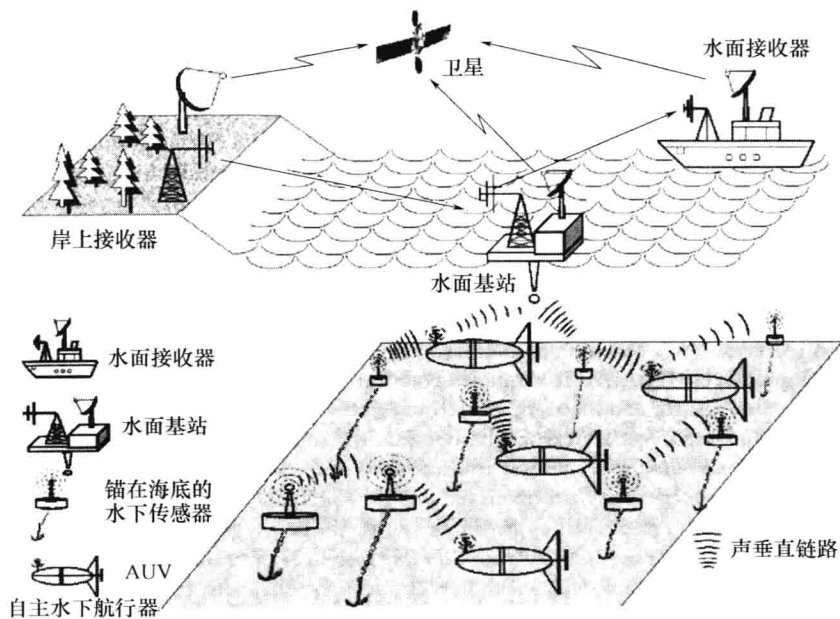


图 1.4 带有 AUVs 的三维水下网络的结构体系

目前可以作为水下实验平台的 AUV 有多种类型。有的功能比较复杂，如由麻省理工学院(MIT)开发的 Odyssey 级 AUV。有的装置则稍简单，例如经常用于水下探测的海洋仪器设备：漂流水下航行器和水下滑翔机。漂流水下航行器随波逐流，并且具有在水层中垂直移动的能力，可用于深度测量^[8]。水下滑翔机^[9]由电池供电、自主控制航行。它采用水泵来改变其体积，最大可达数百立方厘米，通过浮力的变化推动自身滑行。

1.4 水下自组织网络协议设计的关键因素

本节我们将分析在水声(UW-A)通信中影响通信协议设计的主要因素。水声通信主要受传播损失、噪声、多径效应、多普勒扩散以及高、变传输时延的影响。这些因素共同决定了声信道在时间域和空间域的变化性,使得水声信道可用带宽受到限制,并且与距离和频率密切相关。举例来说,数十千米的远程系统可能带宽只有几 kHz,而数十米的短距离系统可能有超过上百 kHz 的带宽。总之,上述提及的因素都可能造成现有水下网络的数据率偏低^[10]。

水声通信链根据距离可分为超远、远、中、短和超短链^[11]。表 1.1 给出了水声通信信道不同距离的典型带宽。水声链也可按照声线相对海底的方向粗略地分为垂直和水平。它们的传输特征明显不同,特别是在时间散布、多径传播和时延变化等方面。下面,我们将对影响水声通信的因素进行分析,以便使读者了解水下自组织网络在信道上所面临的问题,这些问题包括:

(1) 传播损失。水下传播损失描述了当声源向外传播声压波时声强的递减现象。以频率 f [kHz] 为中心的窄带声信号经历距离 d [m] 的传播损失 $TL(d, f)$ [dB] 可以用 Urick 传播模型^[12]来表示

$$TL(d, f) = \chi \cdot \text{Log}(d) + \alpha(f) \cdot d + A \quad (1.4.1)$$

式中,第一项为几何扩散,代表由于波前展开而产生的声能扩散,它随着距离递增且与频率无关。几何扩散有两种:球面(全向点源,扩散系数 $\chi = 20$),是深水通信的特征;柱面(仅为水平辐射,扩散系数 $\chi = 10$),是浅水通信特征。模型中,扩散系数 χ 在(10, 20)之间,取决于水深和链路长度。第二项为介质吸收, $\alpha(f)$ [dB/m] 为介质吸收系数,描述传播损失与频带的关系,如图 1.5 所示。最后一项用量 A [dB] 表示,称之为传播异常值,可解释为由声的多径传播、折射、衍射和由微粒、气泡及浮游生物所引起声散射造成的声强度变化。对于浅水

表 1.1 水下信道不同距离对应的典型可用带宽

	距离/km	带宽/kHz
超远距离	1000	<1
远距离	10~100	2~5
中距离	1~10	约 10
短距离	0.1~1	20~50
超短距离	<0.1	>100

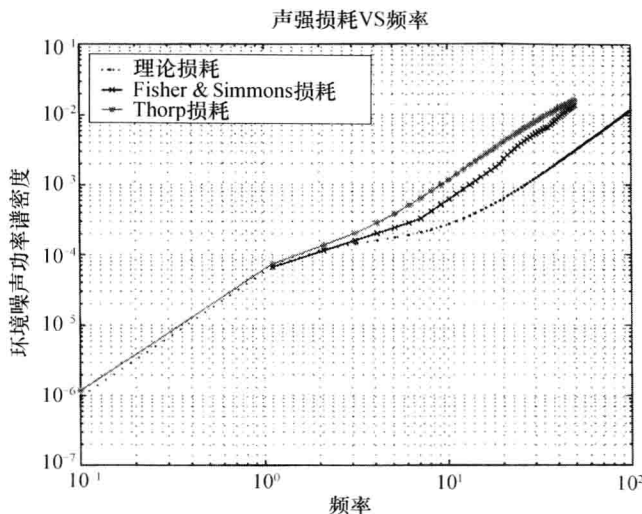


图 1.5 理论、Fisher 和 Simmons、Torp 的介质系数 $\alpha(f)$ 与频率 $f \in [10^{-1}, 10^2]$ kHz 的关系