



# 水声数字通信

许天增 许鹭芬 著



海洋出版社

# 水声数字通信

许天增 许鹭芬 著

海洋出版社

2010年·北京

## 内 容 简 介

本书以创新的思路,论述了当前备受关注的水声数字通信。在第1章绪论的总体引导下,第2章阐述水声通信信道中声传播规律,着重地论述这些规律对水声数字通信的影响和应采取的对策,作为水声数字通信信号处理体制设计的物理基础。第3章论述水声数字通信信号处理,概要地回顾了当前水声数字通信信号处理体制及相应的水声数字通信机,以适配水声通信信道相对于无线电通信信道特异性为线索,结合了当前民用水声通信中需解决的几个技术关键,提出了创新型的包含 Rake 接收技术的自适应伪随机调频(APNFM)水声数字通信信号处理体制,可望在无信道先验知识的情况下,获得近于多途径传播条件下以最大输出信噪比为准则的最佳检测。第4章为水声数字通信设备,论述了著者主持研制的以民用为背景的三种不同体制水声数字通信机:数字时间相关积累遥控通信机,改进型跳频多媒体水声通信机和创新型 APNFM 水声通信机。后者具有组成成普遍适用于民用领域的兼容式数字通信声呐的前景。本书可供从事水声通信、水声工程以及通信工程的科研和教学工作者及高年级本科生、研究生参考。

本书附有与水声数字通信和探测有关联的超声传感系统,包括混凝土喷射机械手测距测向传感系统、机器人地形障碍检出传感系统和自动导引车(AGV)导航传感系统有关内容。此三类新型传感系统具有独立的使用方向,也可推广应用于诸多方面。本书附录可供从事超声传感应用的科研、教学人员和高年级本科生、研究生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

水声数字通信/许天增,许鹭芬著. —北京:海洋出版社,2010.4  
ISBN 978-7-5027-7712-8

I. ①水… II. ①许… ②许… III. ①水声通信:数字通信 IV. ①TN929.3 ②TN914.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 067464 号

责任编辑:项翔鹿源

责任印制:刘志恒

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路8号 邮编:100081

北京画中画印刷有限公司印刷 新华书店发行所经销

2010年4月第1版 2010年4月北京第1次印刷

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:17.75

字数:378千字 定价:88.00元

发行部:62147016 邮购部:68038093 总编室:62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

# 前 言

水声通信涉及国防水声学和民用海洋开发、利用诸多方面,受到各有关海洋国家的高度重视。

早期,乃至今日,水声模拟通信都占有重要地位。然而依此体制组建的水声通信机,存在着通信质量不太可靠等固有的缺点。为适应随机时-空-频变参、强多途、快起伏、高噪声和严带限的特异水声通信信道,近年来水声数字通信体制备受重视,并获得了重要的进展和某些技术方面的突破。目前水声通信领域,如水声网络的水下数据通信等,数字通信已逐渐取代了模拟通信体制。

原则上说,水声数字通信是无线电数字通信向水下的延伸和发展。然而,水声通信信道与无线电通信信道存在着许多本质的差异。水声通信信道的特异性,决定了无线电通信中的一些成熟的技术,以至基本原理,在水声数字通信中并不适用,或需经修正后才能适用。因此寻找创新型的水声数字通信信号处理体制,并以此组建高性能的数字通信声呐,就显得特别重要。这也是本书论述的基本线索。

为了设计适应于水声通信信道实际的信号处理体制,首先必须对水声通信信道声传输规律及其对水声数字通信的影响有深入的了解,力求在水声物理理论和信息论的指导下,进行民用背景下的新型水声数字通信信号处理体制和数字通信声呐组建的探索。民用通信声呐可以说是军用通信声呐的简化特例,如不必考虑远距离通信、保密通信和高航速下的移动通信等特殊难题,因此前者的组建将相对容易。

本书共有四章一附录。在第1章绪论的总体引导下,第2章较为深入地阐述与水声通信有关的水声物理基础,并着重地论述水声通信信道声传播规律:传输损失、多途效应、信号起伏和海洋噪声对水声数字通信的影响及应采取的对策。在此基础上,第3章论述水声数字通信信号处理。由于水声通信信道和无线电通信信道尚有某些“共性”的方面,无线电通信的某些成熟的技术可借鉴,或经修正后可借用;但更多的要立足于根据水声通信信道的特异

性,探索和设计与之相适配的新的信号处理方案。经理论和实践相结合的探索,著者建议采用创新型的带 Rake 接收技术的自适应伪随机调频(简记为 APNFM)信号处理体制,作为组建新型数字通信声呐的基础。最后一章论述水声数字通信设备。力求以实践为依据,分析新型通信声呐组建的可行性。为论述方便,本章介绍著者主持研制的三种类型的民用水声数字通信机。第一种是以浅水声释放器为依托的低速率(20 bps)的水声遥控通信机。在对浅水声信道中信号、多途和噪声统计特性研究的物理基础上,此遥控通信机采用了数字时间相关(包括自相关和互相关)积累信号处理方案,并实现了多途能量的利用。第二种是改进型跳频体制的中等通信距离(15 km 左右)、中等通信速率(600 pbs 左右)的水声 Modem 实验样机。它可推广于语音、文本、图像和数据等多媒体的水声数字通信,可望较普遍地适应于当前民用诸多方面对水声通信的迫切需求。第三种为创新型 APNFM 体制的数字通信声呐的研制探索,具有组成远距离、中速率兼容式数字通信声呐的前景,或能为适应今后海洋开发、利用对水声通信有更高要求而作某些技术上的积累。

在本书撰写过程中,参考了许多优秀的著作,受到了多方面的启发,特别是海中声的多途径传输规律及最佳线性滤波器等内容,引用了杨士莪、张仁和李启虎院士的有关著作。对于他们高水平的论著,著者只能整段以至整节地引用。在此,著者对他们表示深深的谢意。

著作还引用了科研组同事们的一些论著和有关材料,并在引用文献中有所体现。同时,在长期的相处和工作中,得到他们多方的支持和帮助。著者对他们表示衷心的感谢!

需着重指出的是,本书对水声通信信道特性提出一些新的看法,如水声信道并不总是符合线性条件和多途效应具有双重性等,在水声信号处理上提出了一些新思路和新技术,如全时间取样代替同步后的信号检测和自适应 Rake 接收为核心的信号处理,以实现无水声信道先验知识条件下的自适应信道适配,它们是否确切、有效,特别是 APNFM 体制的水声数字通信声呐的组建,尚处于初步探索阶段,其中某些关键技术尚未经实践,包括不同海洋通信环境下的实验考验。著者以“抛砖引玉”的思路,以有错必改的态度,盼望着同仁的批评和指正。

鉴于目前尚无水声数字通信方面较系统的报道和相应的著作,第一著者虽已年过七十,趁还有好的思维能力,与女儿许鹭芬一起,根据多年的教学和

科研经历,撰写此书,盼能以此为“水声通信”这座科学大厦添一砖、加一瓦。同时期盼着水声通信能在克服困难中不断发展、日渐成熟,以服务于人类开发、利用海洋的和平事业。

众所周知,孙悟空可以自由地遨游于四海,到水晶宫拜访已成朋友的四海龙王。然而,他还有遗憾之处,他在水下无法与其师父和师弟们进行实时的信息交流。

著者坚信,经过不懈的努力,总有一天人们也可自由地旅游于海底世界,下海居住于人造“水晶宫”中。高兴时可由海龟带路,与鲸共舞。而且,可如陆地的人们一样,人手一水声通信机,随时随地与水下、陆上亲友进行多媒体通信,如果孙悟空有知,还得羡慕呢!

本书附有超声传感系统有关内容。超声传感与水声探测有“共性”的一面,包括换能器和信号处理方案的相互借用,是著者承担的另一研究方向。

在气介超声传输特性研究的基础上,研制和探索气介中三种新型的超声传感系统:混凝土喷射机械手超声测距测向传感系统,机器人超声地形障碍检出传感系统和自动导引车(AGV)超声导航系统。这些超声传感系统有其独立的应用方面,也具有推广应用于诸多方面的前景。

著者

2009年3月于厦门大学

# 目 录

<b>第1章 绪 论</b> .....	(1)
1.1 水声通信的发展概况 .....	(1)
1.2 水声通信信道相对于无线电通信信道的特异性 .....	(4)
1.3 创新型水声数字通信体制组建探索 .....	(11)
1.3.1 水声数字通信 .....	(11)
1.3.2 当前主要水声数字通信体制 .....	(13)
1.3.3 创新型水声数字通信体制组建探索 .....	(16)
1.4 通信声呐方程 .....	(19)
<b>第2章 水声通信信道</b> .....	(29)
2.1 水声场的理论方法 .....	(30)
2.1.1 波动方程与定解条件 .....	(30)
2.1.2 射线声学理论 .....	(33)
2.2 海中声传输损失 .....	(41)
2.2.1 分层不均匀海水介质中的声场 .....	(41)
2.2.2 海水介质的声吸收损失 .....	(52)
2.2.3 声传输损失对水声数字通信的影响及可能的对策 .....	(59)
2.3 水声通信信道多途效应 .....	(67)
2.3.1 两层介质下声传播的简正波解 .....	(67)
2.3.2 层中声传播的虚源图像 .....	(78)
2.3.3 水声通信信道多途结构实验研究 .....	(81)
2.3.4 多途效应对水声数字通信的影响和适应的对策 .....	(88)
2.4 水声通信信道声传播起伏 .....	(97)
2.4.1 海水介质随机不均匀性引起的声传播起伏 .....	(98)
2.4.2 随机界面上的声散射和声传播起伏 .....	(109)
2.4.3 声传播起伏对水声数字通信的影响及抗起伏的对策 .....	(121)
2.5 海洋噪声 .....	(124)
2.5.1 有源介质中一般声波方程 .....	(125)
2.5.2 海洋环境噪声 .....	(128)
2.5.3 舰船自噪声 .....	(138)
2.5.4 海洋噪声对水声数字通信影响和抗噪对策 .....	(142)

<b>第3章 水声数字通信信号处理</b> .....	(147)
3.1 无线电通信中几个可借鉴的信号处理技术 .....	(147)
3.1.1 最佳线性滤波器 .....	(148)
3.1.2 自适应滤波器及其应用 .....	(152)
3.1.3 衰落信道分集接收技术 .....	(160)
3.1.4 扩频技术 .....	(167)
3.2 几种水声数字通信体制 .....	(178)
3.2.1 MFSK 体制的水声数字通信 .....	(178)
3.2.2 扩频体制在水声数字通信中的应用 .....	(181)
3.2.3 水声通信信道与最佳线性滤波器 .....	(188)
3.3 创新型水声数字通信信号处理体制探索 .....	(193)
3.3.1 当前民用背景水声通信需解决的几个技术关键 .....	(193)
3.3.2 新型水声数字通信信号处理体制建立的原则 .....	(195)
3.3.3 创新型 APNFM 水声数字通信信号处理体制 .....	(198)
<b>第4章 水声数字通信设备</b> .....	(202)
4.1 水声换能器简介 .....	(202)
4.1.1 水声数字通信对水声换能器的要求 .....	(202)
4.1.2 圆管型压电陶瓷换能器 .....	(204)
4.2 数字时间相关积累水声遥控通信 .....	(217)
4.2.1 浅海声通信信道物理特性实验研究 .....	(217)
4.2.2 水声释放器遥控通信机研制 .....	(227)
4.3 改进型 FH-SS 体制多媒体水声通信机研制 .....	(236)
4.3.1 预期的研制目标 .....	(236)
4.3.2 主要技术关键 .....	(236)
4.3.3 改进型 FH 体制水声 Modem 样机的实验探索 .....	(239)
4.3.4 在水声多媒体通信上推广可行性分析 .....	(244)
4.4 创新型 APNFM 体制水声数字通信声呐研制探索 .....	(246)
4.4.1 APNFM 水声数字通信声呐总体结构和工作过程概述 .....	(246)
4.4.2 APNFM 体制水声数字通信机的初步实验研究 .....	(247)
<b>附录 气介超声传感系统</b> .....	(258)



# 第1章 绪论

本书论述水声数字通信,并附超声传感有关内容,涉及面较广。

本章在有关水声通信发展概况介绍后,着重讨论了水声通信信道与无线电通信信道的本质差异。水声通信信道的特异性,预示着创新型水声数字通信体制组建探索的必然性,并设法把它运用于新型通信声呐的研制之中。最后,本章导出通信声呐方程,作为设计新的数字通信声呐和使用已有通信声呐性能预估的参考,并给出 FH-SS 体制水声通信机设计的例子。

通过本章的阐述,将对全书内容有一个整体概念,并对各章内容在整体中的作用有一连贯性的了解。

## 1.1 水声通信的发展概况

学科的形成和发展,来自实践的需要。正因为海军军事活动和海洋开发、利用的迫切需求,形成了水声通信发展的动力。

中国明代伟大的航海家郑和曾精辟地指出:欲国家富强,不可置海洋于不顾。财富取之于海,危险亦来自海上。这说明我们的先人已明确了海洋对于一个国家具有双重性:开发和利用海洋,有助于国家的富强;但也存在着从海洋而来公开(水面)的和隐秘(水下)侵犯的危险,在和平利用海洋的同时,也要有防范意识。

为了抵御从海洋通道而来的可能外犯,要做好水下战的准备。

当代水下战是信息化之战。水声通信是水下信息获取、传输和控制的重要手段。

军用水声通信主要使用场合为<sup>[1,2]</sup>:潜艇之间、潜艇与水面舰艇之间、潜艇与岸站指挥基地之间的通信,潜艇与水下作战平台、军用蛙人等之间通信,军用水声网络各节点之间、潜艇(这时作为活动节点)与节点之间的通信等。

为了适应和平利用海洋的迫切需求,当前水声通信已由军用迅速地向民用领域发展,延伸领域广泛,典型的应用如下。

1. 水下探测、救护、打捞等作业的潜水员<sup>[3]</sup>与水面指挥船之间的通信。一般为语音和图像通信。通常要求的通信距离较近,如几千米,而且水下部件必须设计得体积小,重量轻,能耗省,以利于潜水员携带和操作。因此,工作频率选得较高,如 20 kHz 以上,一般属于弱多途干扰的良好水声通信条件。

2. 水面指挥船与各类水下机器人(如 AUV)、深潜器<sup>[4]</sup>之间的多媒体(包括语音、文本、图像和数据)通信。此类通信机对体积、重量和能耗的要求相对较低,而且一般工作

于深水海域,这时声传输条件优良,可采用相干检测(如 DPSK)等方案,不但能使通信距离大于几千米,而且传输的速率也较高,能实现实时语音通信,并可以获得清晰的水下彩色图像<sup>[5]</sup>。

3. 水声通信在海洋矿产资源开发、利用方面的应用<sup>[4]</sup>,如海上石油钻井平台水下监控,水下井口数据水声遥测,水下输油管道的铺设、定位和监测等。这类水声通信属高频、近距和点对点通信,工作条件较好,较易设计。

4. 海洋环境参数自动监测、水下锚定仪器及水下潜标系统的水声数据(包括遥控指令)通信。在这类海洋观测站上,安装各类海洋参数传感器和水声数据通信机,由取样船只定期访问这些观测站,在其附近发送指令,水下传感器测量的海洋参数就会以水声数据通信方式传送至取样船只。与传统的以调查船现场测量方式比较,既省时、省力又省费用。

5. 民用水声网络的组建<sup>[6]</sup>:上述单个浮标基的海洋参数观测站只能得到一个站位的单元数据,对深入分析海区环境变化规律,进而开展数值预报是很难实现的。如果在需深入了解的海区中组建水声网络,在网络中的各节点进行多层次、多要素的观测,各节点观测的数据可以水声数据通信的方式进行彼此之间的中继,并最终传送给网络中的网关节点,通过它的水面浮标上的天线进入无线电信道,岸站的数据中心就可实时地获得该海区多要素、大面积、同步、连续而长期的海洋珍贵数据。

人们正准备组建自主式水文采集网络(AOSN)<sup>[7,8]</sup>,该网络能够实现多个网络节点间的数据交换功能。网络节点可以是静止型的,也可以是装备于水下航行器或机器人上的活动节点,这些以水下机器人作载体的网络节点上配有各种仪器,如水声通信机、流速计、地震仪、侧扫声呐等。位于远方的用户可以通过与无线网络相联的网关节点的水上浮标而与 AOSN 的节点进行信息交换,收集水下情报等。这些无缆水下机器人(AUV)被称为是海洋要素观测的“内空间卫星”,与之相呼应地出现了“海洋 GPS”技术。这些技术都是数字地球的重要组成部分。

此外,水声通信尚可用于诸如海洋灾难预报,海上失事飞机黑匣子定位,水下游艇与岸站的水声通信等等。可以预期,随着人们向海洋“进军”的加速,民用水声通信的应用也将随之迅速发展。

军用和民用水声通信的使用场合及性能指标,既有相互交叉,但更有质的不同。

军用水声通信有其特殊的要求和相应的困难之处。

1. 军用水声通信要求有远的通信距离。如能在较远处获得了信息,就有了行动的距离先机。

2. 军用水声通信要求有高的通信速率。一旦更快地获得了信息,就可获得行动的时间提前量。

要同时兼顾通信距离  $r$  和通信速率  $R$  的高指标要求是困难的。美国学者根据多年实验结果,提出了水声通信  $R(\text{kbps})$  和  $r(\text{km})$  的乘积上限<sup>[9]</sup>

$$Rr \leq 40 \quad (1.1.1)$$

而且一般很难达到其上限。如要求  $R = 1 \text{ kbps}$ , 通信距离就只能小于以至远小于 40 km。

3. 军用水声通信对整机的鲁棒性要求很高, 以避免偶然事故的发生。然而, 水声通信由于海洋环境复杂而多变, 而水下战及其战场随时随地均可能发生变化, 要使通信机能适应随机时 - 空 - 频变的水声通信环境是很困难的。

4. 军用水声通信机可能应用于高速航行的舰(艇)载移动通信条件, 这时通信环境剧烈变化, 且将有大的多普勒频移和高的舰艇自噪声级<sup>[10]</sup>, 通常的水声信号处理方案又无频移适应性, 高质量的水声通信难度加大了。

5. 军用水声通信有严格的保密要求。如不能攻克此难点, 只好以降低发射声功率及相应的通信距离来换取保密性能的提高<sup>[1]</sup>。

6. 军用水声通信可能有多媒体信息的需求, 以适应不同的用途。要求在有限的舰艇空间安装不同通信机(包括不同的换能器 - 功放组件)一般是不容许的。因此就存在不同通信媒体以及通信声呐与主动声呐换能器的兼容问题<sup>[1]</sup>。

相对而言, 军用水声通信存在的难题, 在民用水声通信方面就没那样突出, 因为此类通信机通常可在较近的距离上互通信息, 完成通信的时间也有很大的灵活性, 即对通信距离和速率的兼顾要求较低。此类水声通信或可选择良好的海区和季节进行, 而且通常属定点通信或低航速下移动通信, 通信环境相对稳定, 多普勒频移校正负担较轻, 噪声级也较低。此类通信机无保密要求, 只要能耗、体积和重量上许可, 就可使整机在高信噪比背景下进行信息检测, 而且可生产不同规格、不同用途的水声通信机以供用户选购, 一般也不必考虑复杂的兼容问题。

当然, 军用水声通信与民用水声通信的难易程度是相对的。民用水声通信的通信距离如能更远些, 将更广泛地适应于实际的要求。对于图像通信等信息量很大的通信媒体, 要求的通信速率就很高, 一样存在通信距离与通信速率相互矛盾的状态。譬如, 我们科研组研制的浅海图像通信<sup>[11]</sup>, 速率虽已达 8 kbps, 但对于一帧  $320 \times 200$  (像素)  $\times 16$  (灰度级) 的简单黑白图像, 传输的时间仍然需 32 s, 而根据 (1.1.1) 式, 高鲁棒性的通信距离只能在 5 km 以下。在海洋开发、利用的海区, 可能有恶劣的通信环境而无法避开, 也需要水声通信机有优良的信道适应性。在海面指挥船与深潜器等的综合通信场合, 也属移动通信范畴, 并需多媒体通信及存在多媒体兼容的问题。此外, 民用水声通信机可能有积体、重量、能耗和成本等方面的特殊要求, 特别是民用水声通信机使用单位, 一般不能提供水声通信信道有关参数。因此, 此类通信机必须能在无信道先验知识条件下实现自适应的信道匹配, 也给这类水声通信机的设计带来特殊困难。

由此可见, 即使是民用水声通信, 要实现较远距离、较高速率下的高鲁棒性的多媒体通信, 仍然存在着巨大困难, 有许多技术关键等待着解决。如能解决上述问题, 就有希望使水声通信的水平有质的提高, 以适应当前及今后海洋开发、利用对水声通信的广泛需求。本书就以民用背景水声通信为主线进行论述, 至于军用水声通信需解决的特殊难题, 如保密通信、高航速下的移动通信等问题, 已不属本书论述的范围。

如上所述,由于水声信道的复杂性和多变性,高质量的水声通信的实现,存在着许多实际的困难;然而,在军用和民用实践需求的推动下,水声通信学科正在克服困难中前进。

从通信的布局上,从简单的静止点对点的通信到舰载的移动通信,发展至今正在进行水声网络的组建以至准备建立陆-海-空三维移动互联通信网。

从通信体制上,由 20 世纪以模拟水声通信为主,已逐步向水声数字通信过渡,并把无线电通信中的新体制,如扩频通信<sup>[12,13]</sup>等引入水声通信中,可实现 100 km 以上的低速率通信<sup>[14]</sup>。近年来,由光学中相位共轭法引申而来的声学时间反转镜(TRM)的信号处理<sup>[15,16,17]</sup>,有望在对信道无先验知识条件下,实现与信道的自适应匹配,受到人们的关注,并进行了广泛而深入的研究。

在通信媒体上,已由模拟单边带的电报、电话通信,逐步发展到数字语音、文本、图像、数据等的多媒体通信,力争适应不同通信场合的实际需要。

## 1.2 水声通信信道相对于无线电通信信道的特异性

差异即矛盾,从而为解决矛盾指明方向。

水声通信信道中声波的传播规律是水声物理学研究的主要内容<sup>[18]</sup>,也是水声通信信号处理和通信声呐设计的物理基础及具体参数选取的依据。可以说,不深入了解水声通信信道特异的声传播规律及其对水声数字通信的影响和必须采取的对策,就不可能设计适配于海洋实际环境的水声通信信号处理体制和研制成高性能的通信声呐。

由于水声通信使用的工作频率较高(几千赫兹以上),对水声通信信道的声传输特性,一般可以用射线声学理论进行较直观和形象的描述。

水声通信信道相对于无线电通信信道的特异性主要表现为如下。

### 1. 水声通信信道声吸收及散射引起大的传输衰减和严格带限的特异性

水声通信信道声吸收包括了海水介质的黏滞吸收、热传导吸收和内分子过程引起的吸收。声吸收效应不但导致了很大的声传播衰减,而且使水声通信信道具有严格带限的特异性。后者主要由于海中声吸收系数 $\beta$ 近于与工作频率 $f$ 的平方成比例而形成的。譬如, $f=8\text{ kHz}$ , $\beta\approx 0.6\text{ dB/km}$ ;  $f=14\text{ kHz}$ , $\beta\approx 1.3\text{ dB/km}$ ;  $f=20\text{ kHz}$ , $\beta\approx 2.4\text{ dB/km}$ 。当通信距离较远时,如 $r=50\text{ km}$ ,上述三种不同的工作频率因声吸收形成的声能衰减分别达 30 dB、65 dB 和 120 dB。如此大的传输衰减,不但使水声通信距离明显下降,而且严格地限制着水声通信机频带的展宽。以通信机的频带选取于 8~14 kHz 的中等频域为例,在此 6 kHz 的带宽中, $r=50\text{ km}$  的声吸收效应使上下边频产生的传输衰减差达 35 dB,要用通常的方法进行振幅均衡是无法实现的,只能进一步压缩频带。如能使频带取于 8~10 kHz 之中,上下边频传输衰减差即降为 9 dB,既较大地提高了通信距离,也使振幅均衡等信号处理变得较为容易了。

水声信道中介质的不均匀性及海面、海底的不平整性,将产生强烈的声散射。水声

信道中声的散射,虽非把声能转换为热能(如同声吸收),但却使声波偏离了到达接收机的方向,其效果也是声能的衰减。水声信道中声的散射效应产生的衰减,也随着工作频率的提高而增加,这更加剧了水声信道带限的特异性。

当然,如水声通信距离较近,水声通信信道的带限的特异性就没那样突出,工作频带就可取宽一些,如 5 kHz 以上。

由此可见,水声通信信道大的传输衰减,限制了通信距离的提高,而其容许采用的带宽又比无线电通信中的带宽窄得多。根据 Shannon 信息定理,当信噪比不变时,最大信息传输率与带宽成正比。因此具有严格带限特性的水声通信的速率就将比无线电通信的速率低得多。

而且,水声通信信道的带限作用,将使某些先进的现代通信技术的采用受到限制,如扩展频谱通信体制中的扩频与水声通信信道的带限存在着根本的矛盾。

## 2. 水声通信信道的强起伏特异性

水声通信的介质空间(海洋)比无线电通信空间(天空)小得多,而且水声通信的载体通常工作于水面下,海面以及海底(浅海区)将对声信号产生强烈的反射与散射。

海洋界面的声反射与直达声信号的叠加,可产生相干声源干涉的强衰落(参见图 1.3.1 和图 1.3.2)。

海面与海底不平整引起的声散性,将产生信号的振幅和相位起伏。

在厦门港等浅海水域的水声通信实验中,声信号振幅的起伏一般遵从瑞利分布率,其起伏率为 52% 左右。

而海面散射的附加相移可用瑞利参数

$$K = 4\pi \frac{\xi}{\lambda} \sin \chi$$

描述。式中  $\lambda$  为声波波长,  $\xi$  为海面起伏的波高,  $\chi$  为声波相对于海面的掠射角。当  $\frac{\xi}{\lambda}$  (或  $\chi$ ) 值小,使  $K$  远小于 1, 可把海面看为平整的界面,其反射系数  $V \cong -1$ , 即有  $180^\circ$  的相移; 当  $K$  大时,反映了海面波高相对于  $\lambda$  较大,散射的非相干分量就加大,相对相移也成了一随机量。至于海底的反射、散射和透射特性就更为复杂多变了,因为还与海底的底质、地貌有关。由此可见,海洋界面声反射的相移是一随机时-空-频变参量。

海水介质自身的不均匀性(主要是热微结构)也将引起声信号振幅和相位的起伏。起伏量除了与介质的折射率起伏等特性有关外,尚随着通信频率的提高和通信距离的增大而加强。

## 3. 水声通信信道声场分布的特异性

无线电通信在辽阔的天空,往往不必考虑地面对无线电波的反射与散射。而且,大气中折射率梯度也很小,因此,无线电波在大气中的传播途径基本上是直线的,远场的衰减遵从球面波的距离反平方规律。相反,海水介质因太阳的辐射和海流等的混合作用,

形成了相对稳定的深度方向的声速梯度  $G_c(z)$ 。实际的水声信道中不存在  $G_c(z) = 0$  的分布,严格地说,不存在直线传播的情况,一般要经过复杂的曲折途径传到接收点。而且,通常有多条的本征声线,以不同的出射角经不同的反射和折射途径而到达接收点的随机叠加,从而形成了复杂且多变的声场重新分布,如形成了多种类型的声波导和反波导传播现象。图 1.2.1 为深海声道中声源处于声速最小平面(声道轴)附近的声线分布图,图中略去了界面的声反射<sup>[10]</sup>。由此可见,水声信道中的声场分布十分复杂:声线密集的区域,声强聚集;声线稀疏的区域,声强减弱;不存在声线的区域,为射线声学意义下的“影区”,声强趋于零。

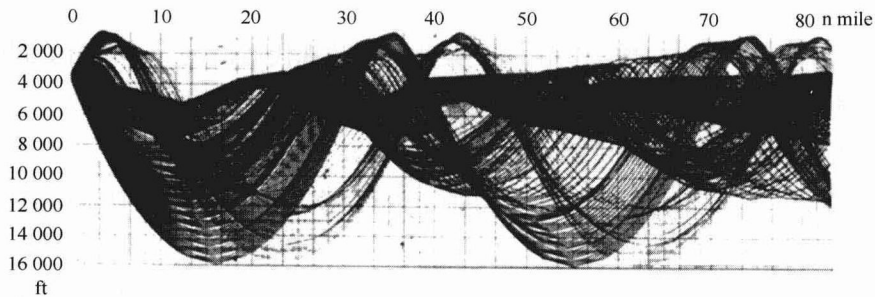


图 1.2.1 声源处于深海声道轴上的声线图

由此可见,水声通信信道中声波的几何衰减规律,与自由场中依球面衰减规律有着本质的差异。因此,对某一确定的水声通信机,其通信距离也必然具有强烈的时-空变特性,分层介质中声场分布的特异性也就成了水声物理研究的重要内容。

#### 4. 水声通信信道多途径效应的特异性

无线电短波通信中,可由电离层多次反射或几个不同高度电离层的反射而产生多途径传输。移动通信中也会因周围障碍物的反射而有不同的途径,并引起信号的时间展宽和频谱展宽,产生了码间串扰。当这种码间串扰对通信带来的影响不能忽略时,就采用自适应均衡方法来有效地降低其影响,如线性横向 FIR 滤波器。

水声通信信道中多途径传输的特异性十分突出。能否妥善地处理多途径效应,是水声数字通信成败的关键。

用射线声学的语言来说,多途径传输来源于到达接收点有不同途径(因而有不同的到达时间)的声线,其形成的机理如图 1.2.2 所示。

图 1.2.2(a) 示出浅海(50 m 水深)声速垂直分布图,为台湾海峡某站位简化了的线性负梯度。图 1.2.2(b) 为出射角  $\pm 5^\circ$  范围内的 12 条本征声线,它们以不同的出射角,经不同次数的海面、海底的反射,而沿不同的折射途径到达接收点 P,形成了该点的总声场。由此可见,当发射的是一脉冲信号,这些不同途径的声线到达接收点的传播时间是不同

注:ft,英尺,非国际单位. 1 ft = 0.305 m.

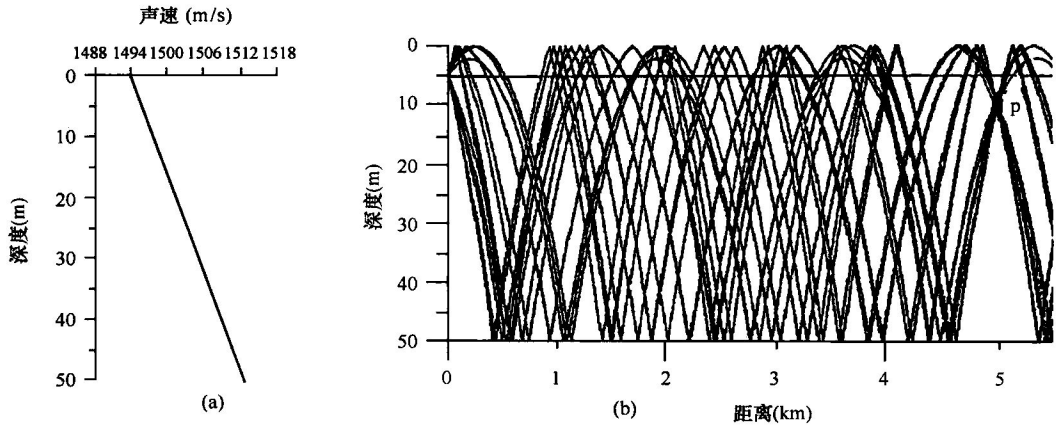


图 1.2.2 浅海负声速梯度下声折射形成的多途径叠加

的,因而形成了时域上分布复杂的脉冲序列,称为多途结构。

由多途径传输机理可知,深海声信道的某些接收点上,将产生大时延(远距离通信可达秒的量级)的多途结构(参见图 1.2.1)。

早期,在深水声信道中不同距离上记录的接收波形中,已发现了复杂多变的多途结构,如图 1.2.3 所示<sup>[19,20]</sup>,发射脉冲宽度 5 ms。由此可见,接收到的波形与发射的单脉冲有着本质的区别,而且多途结构依不同距离  $r$  而明显改变。值得注意的是,在接收信号中,如 7.5 km 和 20 km 接收到的最后一个多途,由于不同路径反相叠加产生的干涉(衰落)效应,使信号分裂为中间下凹的双峰结构。这种多途叠加的干涉效应,是水声信道非线性的主要特征。

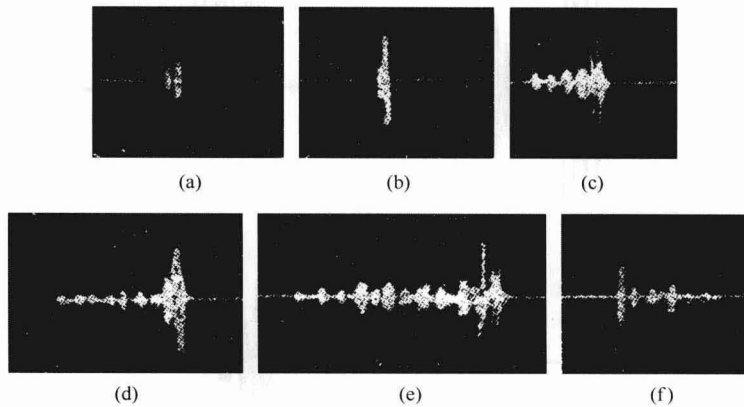


图 1.2.3 水下声道中距声源不同距离处的信号形状

(a) $r=0.75$  km (b) $r=1.5$  km (c) $r=7.5$  km (d) $r=12$  km (e) $r=20$  km,  
声源在声道轴上,接收器高于声道轴 (f) $r=13.5$  km,接收器在声道轴上

浅海声信道的多途结构更加复杂而多变。图 1.2.4 是在我国黄海存在声速跃层条件下接收到的脉冲波形结构<sup>[21]</sup>。可见不但多途结构极为复杂,而且随着工作频率的不同而剧烈地变化。图 1.2.5 是在上述海区不同发-接深度下的多途结构。当二者深度改变时,特别是穿越声速跃变层,多途结构变得“面目全非”<sup>[22]</sup>:脉冲能量较为集中,不存在梳状结构,而且存在一个较大(30 ms)的相对时延。

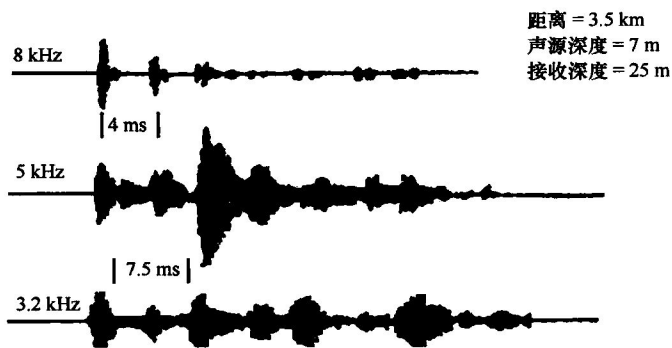


图 1.2.4 不同频率的多途结构

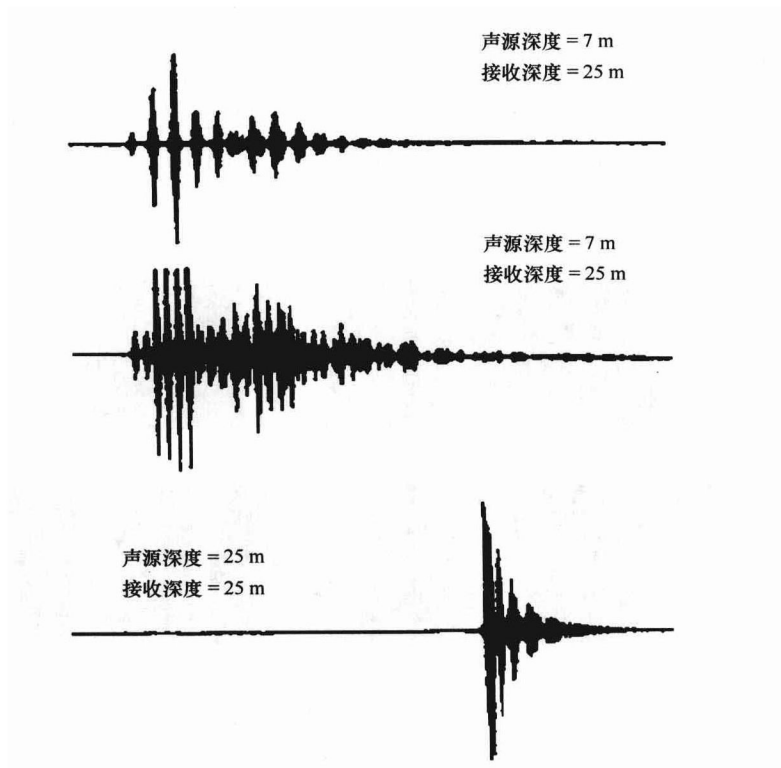


图 1.2.5 不同收发深度的波形



由此可见,水声信道中通常存在着比信号脉冲宽度大得多(可达几十以至上百倍)的随机时-空-频变多途结构,并由此产生了大时延的码间干扰。如同主动声呐不得不在混响(海洋界面和海水中不均匀性产生的声的反向散射在接收点的随机叠加)背景进行信号检测一样,水声通信也被迫在多途背景下检测到达的通信信息。如何适配于水声通信信道多途效应就成了水声数字通信信号处理核心的技术关键。

需特别指出的是:多途效应具有双重性。由多途成因可知,多途来自海洋界面声反射和海水介质的声折射的联合作用,此作用实际上阻止了水声信道中声波的球面扩展(有些著者把深海声信道由于声波折射的会聚效应,比喻为北京天坛回音壁的曲面会聚效应<sup>[23]</sup>),不但使声脉冲信号的几何扩展减缓,而且以脉冲形式在时域上展现。如能采用路径分集(实质为对时域上多途脉冲的时间分集)方式<sup>[24]</sup>,即 Rake 接收技术,结合适宜合并,必将较大地提高接收机的输出信噪比。如何在适配多途干扰的前提下,实现多途能量的利用,以提高水声通信机的性能,是水声通信中值得期待和较难解决的技术问题。

## 5. 声速小引起的特异性

水中声速比空中电磁波波速约小了  $10^5$  倍,尽管舰船的航速比起空中飞行物慢得多,但在车载移动通信条件下,多普勒频移仍然较大,甚至可与通信机的频带宽度相比拟。水声通信中的大多数信号处理体制,如匹配滤波等均无频移适应性,因此如同主动声呐一样,水声移动通信中的多普勒匹配就较为困难。

由于水中声速低,水声通信信息传输的时间就长,如通信距离  $r$  为 75 km,信息传送的时间需 50 s,而且此时间可能大于信道的相关时间,水声信道将不符合时不变信道,而需按时变信道处理。如发-接双方需相互联系,以交换有关信道的实时参量,实现自适应的信道修正匹配,如此,所花的时间将成倍加长,这样的信号处理方式有可能失效。至于差错控制技术中的信息反馈方案,一般也不宜采用。

## 6. 水声信道中背景噪声的特异性<sup>[20]</sup>

无线电通信中的加性噪声包括脉冲噪声、窄带噪声和起伏噪声,后者源于电阻性器件,对通信影响最大。

水声信道背景噪声包括海洋环境噪声和舰船自噪声。对于海洋环境噪声,在信号处理时间不太长的条件下,一般可把它看为准平稳的高斯噪声,其包络遵从瑞利分布。抗此类噪声所采取的措施与无线电通信的措施基本相同。问题在于海洋环境噪声级高,具有强的随机时-空-频变特性,而且由低频向高频衰减式地分布于整个水声通信工作频段。如 5 kHz 的 3 级海况的风浪噪声的谱级为 50 dB 左右。如接收机的频带宽度为 1 kHz,则噪声级达 80 dB,可能使水声通信接收机处于弱信号检测的工作状态。

在舰载移动通信的情况下,舰船自噪声级高,即使在 5 节的低航速下,舰船自噪声级就可达 3 级海况的风浪噪声级,而且在连续谱的背景下出现了线状谱,如图 1.2.6 所示<sup>[10]</sup>,线状谱对应于螺旋桨叶片转动和主机工作的基频和谐波分量。线状谱有时可高出