



国防特色规划教材·信息与通信技术

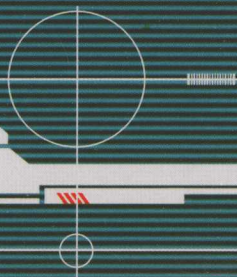
TEXTBOOK  
National Defense



# 水声通信理论与应用

SHUISHENG TONGXIN LILUN YU YINGYONG

张 歆 张小蓓 编著



西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社

· 013325295

TN929.3  
09



国防特色规划教材·信息与通信技术

# 水声通信理论与应用

张 歆 张小蓊 编著



西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社  
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社



北航

C1632782

TN929.3  
09

01332232

## 内容简介

本书系统、深入地阐述了水声通信系统的基本概念、基本原理和基本分析方法。在重点论述水声通信技术基本理论的基础上,力求充分反映当前国内外水声通信技术的最新发展成果。

全书共 10 章。内容包括绪论、水声信道的传播特性与声场模型、时变多径水声信道的分析与仿真、水声通信系统中的调制技术、多径水声信道中的自适应均衡技术、水声信道中的多普勒频移估计与补偿、水声衰落信道中的分集技术、扩频水声通信技术、正交频分复用技术、水声网络技术

等。本书内容丰富,概念清晰,理论分析严谨,由浅入深,注重理论联系实际。每章还列举了一定数量的例题,并附有思考题和练习题,便于读者深入学习和研究。

本书可以作为水声通信专业高年级本科生和研究生的教科书,也可以作为从事水声通信研究的工程技术人员的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

水声通信理论与应用/张歆,张小蓓编著. —西安:西北工业大学出版社,2012.11  
(国防特色规划教材·信息与通信技术)

ISBN 978-7-5612-3505-8

I. ①水… II. ①张… ②张… III. ①水声通信—高等学校—教材 IV. ①E96

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 246044 号

## 水声通信理论与应用

张歆 张小蓓 编著  
责任编辑 李阿盟

\*

西北工业大学出版社出版发行

西安市友谊西路 127 号(710072) 发行部电话:029-88493844 传真:029-88491147

<http://www.nwpup.com>

陕西兴平报社印刷厂印装 各地书店经销

\*

开本:787×960 1/16 印张:22.75 字数:487 千字

2012 年 11 月第 1 版 2012 年 11 月第 1 次印刷 印数:2000 册

ISBN 978-7-5612-3505-8 定价:45.00 元

# 前 言

随着海洋研究与海洋开发以及国防建设的发展,对水下各种探测、采集、勘探数据的需求大增。借助于水声信道进行水下信息的传送,具有其他通信方式所不可替代的作用和优势。因此,在近二三十年间,水声通信技术与理论得到迅速发展,受到国内外水声物理学与无线通信领域研究人员的广泛重视。

水声通信是一门涉及水声物理学与无线通信技术的综合性新兴学科。本书作为水声通信专业的教材,全面、系统地介绍了水声通信的基本理论与技术。本书在重点论述水声通信基本理论的基础上,结合笔者的研究成果和文献收集,力求充分反映当前国内外水声通信技术的最新研究成果及其发展趋势。

本书为“十一五”国防特色规划教材,内容丰富,概念清晰,理论分析严谨,逻辑性强,由浅入深,注重一般通信理论与水声通信的结合。为了帮助读者掌握基本理论与分析方法,每章都列举了一定数量的例题。笔者在水声信道和通信技术方面的部分研究成果也以例题的形成给出,为了方便读者深入研究,每章还附有相关的参考文献。

全书共 10 章。第 1 章为绪论,概述了水声通信系统的基本组成、性能指标,水声信道与水声通信技术研究的历史、现状与发展趋势。第 2 章为水声信道的传播特性与声场模型,介绍水声信道的主要传播特性以及描述声场传播的声场模型。第 3 章为时变多径水声信道的仿真与分析,介绍了水声信道衰落的类型、时变多径信道的仿真方法。第 4 章为水声通信系统中的调制技术,介绍频移键控调制和相移键控调制技术。第 5 章、第 6 章是水声通信系统中的信号处理方法,介绍了均衡器结构和自适应均衡算法,多普勒频移估计与多普勒补偿的方法。第 7 章为水声衰落信道中的分集技术,概述了水声信道中的分集技术、MIMO 系统与空时编码。第 8 章为扩频水声通信技术,介绍了直接序列扩频和跳频扩频的基本原理、性能及其在水声通信中的应用。第 9 章为正交频分复用技术,介绍了 OFDM 的基本原理、关键技术及在水声通信系统中的应用。第 10 章为水声网络技术,介绍了水声网络的概念、拓扑结构和网络协议体系结构,并介绍了水声网络的应用实例。

本书由张歆主持编著,并撰写了其中第 1,2,3,5,6,9,10 章,张小蓓撰写了第

4,7,8章,赵瑞琴参与了第10章的撰写工作,刘宗伟博士提供了第2章 Kraken 模型的部分仿真结果,孙超教授、黄建国教授在百忙之中对本书进行了详细的审稿,并提出了大量宝贵的改进意见。本书在撰写过程中还得到了笔者单位的支持和其他同事的帮助,得到了西北工业大学教务处和出版社的大力支持,本书的责任编辑同志也付出了辛勤的劳动,在此一并表示感谢。

由于经验与水平有限,本书在内容选材及论述中难免有不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编著者

2012年7月

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 水声通信系统的组成和主要性能指标 .....	1
1.2 水声通信系统的特点 .....	6
1.3 水声通信系统的分类 .....	7
1.4 水声通信系统的研究与发展 .....	8
1.5 本书的概貌 .....	17
思考与练习题 .....	18
参考文献 .....	18
<b>第 2 章 水声信道的传播特性与声场模型</b> .....	22
2.1 水声信道的传播特性及对水声通信的影响 .....	22
2.2 水声信道中的环境噪声 .....	38
2.3 声场模型 .....	43
2.4 常用声场分析模型与方法 .....	49
2.5 通信信道的一般模型 .....	60
2.6 加性噪声的数学模型 .....	68
2.7 信道容量的概念 .....	70
思考与练习题 .....	72
参考文献 .....	72
<b>第 3 章 时变多径水声信道的分析与仿真</b> .....	74
3.1 时变多径水声信道的表示 .....	74
3.2 信道冲激响应的时变模型 .....	76
3.3 信道的扩展与相关性 .....	80
3.4 水声信道冲激响应及其统计特性的测量与分析 .....	82
3.5 时变多径信道中的信号传输 .....	95
3.6 时变多径信道的仿真方法 .....	101
3.7 时变多径水声信道的仿真与通信系统性能分析 .....	105
思考与练习题 .....	110
参考文献 .....	111

目 录	
<b>第 4 章 水声通信系统中的调制技术</b> .....	112
4.1 通信信号与系统的表征 .....	112
4.2 频移键控调制 .....	117
4.3 相移键控调制 .....	130
4.4 加性高斯白噪声信道中的最佳接收机 .....	148
4.5 水声通信系统中的数字调制技术 .....	155
思考与练习题 .....	157
参考文献 .....	158
<b>第 5 章 多径水声信道中的自适应均衡技术</b> .....	159
5.1 带限时变多径信道中的码间干扰 .....	159
5.2 有 ISI 的 AWGN 信道的最佳接收机 .....	160
5.3 线性均衡器 .....	164
5.4 判决反馈均衡器 .....	167
5.5 分数间隔均衡器 .....	168
5.6 格型滤波器 .....	169
5.7 自适应均衡算法 .....	170
5.8 联合同步与自适应均衡技术 .....	180
5.9 多信道均衡 .....	185
5.10 盲均衡 .....	187
5.11 其他抗多径技术 .....	192
思考与练习题 .....	194
参考文献 .....	194
<b>第 6 章 水声信道中的多普勒频移估计与补偿</b> .....	196
6.1 基于信号模糊函数的多普勒频移估计 .....	196
6.2 基于数据分组长度的多普勒频移估计 .....	206
6.3 多普勒补偿的方法 .....	209
思考与练习题 .....	213
参考文献 .....	213
<b>第 7 章 水声衰落信道中的分集技术</b> .....	215
7.1 分集与合并技术的基本概念 .....	215
7.2 水声信道中的分集技术 .....	225

---

---

7.3 多径分离技术与 Rake 接收 .....	227
7.4 MIMO 系统与发射分集 .....	233
7.5 空时编码 .....	245
思考与练习题 .....	260
参考文献 .....	261
<b>第 8 章 扩频水声通信技术 .....</b>	<b>263</b>
8.1 扩频通信系统的模型 .....	263
8.2 直接序列扩频 .....	265
8.3 跳频扩频 .....	272
8.4 伪随机编码 .....	276
8.5 扩频系统的同步 .....	279
8.6 扩频技术在水声通信系统中的应用 .....	285
思考与练习题 .....	289
参考文献 .....	289
<b>第 9 章 正交频分复用技术 .....</b>	<b>291</b>
9.1 OFDM 技术概述 .....	291
9.2 OFDM 的基本原理 .....	295
9.3 OFDM 信号的差分检测与相干检测 .....	302
9.4 信道估计 .....	304
9.5 OFDM 系统的同步技术 .....	313
9.6 OFDM 中的峰均功率比问题 .....	319
9.7 OFDM 在水声通信系统中的应用 .....	325
思考与练习题 .....	326
参考文献 .....	327
<b>第 10 章 水声网络技术 .....</b>	<b>329</b>
10.1 水声网络的概念 .....	329
10.2 水声网络的拓扑结构 .....	336
10.3 水声网络的网络协议体系结构 .....	341
10.4 水声信道对水声网络技术的影响 .....	352
10.5 水下网络的应用——Seaweb 介绍 .....	353
思考与练习题 .....	357
参考文献 .....	358



# 第 1 章 绪 论

21 世纪是人类全面认识、开发、利用和保护海洋的世纪。开发和利用海洋资源,对于我国的长远发展具有越来越重要的意义。现代海洋开发的突出特点是融合了高科技成果,其深度和广度取决于海洋科学技术的突破和发展的程度。

随着海洋开发和国防建设的发展,利用水声通信技术传递信息的需求大为增加。水声通信以声波为信息的载体,借助于海洋信道进行数据或控制信息的传输。20 世纪初,水声通信系统就开始用于海面控制平台与水下潜水员之间控制信息的传递。1945 年,美国研制出第一套运行良好的水下无线电话系统,用于潜艇间的通信。在 20 世纪 80 年代前,水声通信主要用于军事领域,其技术研究和应用范围都受到限制。而今,从军事领域到商用领域,水声通信都得到了广泛的应用,水声通信的研究吸引了越来越多的关注,各种通信技术,从数字相干调制、扩频技术、自适应均衡到多载波调制、多输入多输出系统、水下通信网络技术等都已成为水声通信技术的研究领域。

从通信的角度看,水声通信系统与无线电通信系统无论在信道特性还是在系统组成上都许多相似之处,但在性能指标以及技术实现等诸多方面,两者都有很大的不同。其关键在于水声信道具有复杂多变的传输特性,对高数据率、高可靠性的水声通信提出了很多挑战,也使得水声通信技术的发展落后于无线电通信技术。从 20 世纪 80 年代起,随着水声通信系统商用价值的凸现和水声通信技术的进步,特别是在相干检测通信技术的成功应用之后,水声通信系统得到迅速的发展,在信道特性和通信技术方面都出现了许多新的研究课题。这些研究课题的最新成果又促进了水声通信系统的发展,扩大了水声通信系统的应用,使得水声通信逐渐成为综合了水声物理学与无线通信技术的新的研究学科。

下面将对水声通信系统的组成、水声通信系统的特点、水声通信的研究现状及其发展等做简要概述。

## 1.1 水声通信系统的组成和主要性能指标

### 1.1.1 水声通信系统的基本组成

目前,水声通信系统大多为数字通信系统,其主要组成部分包括发射/接收换能器、编码器/译码器、调制器/解调器、水声信道等,如图 1-1 所示。下面就系统中各部分的基本功能做一简要说明。

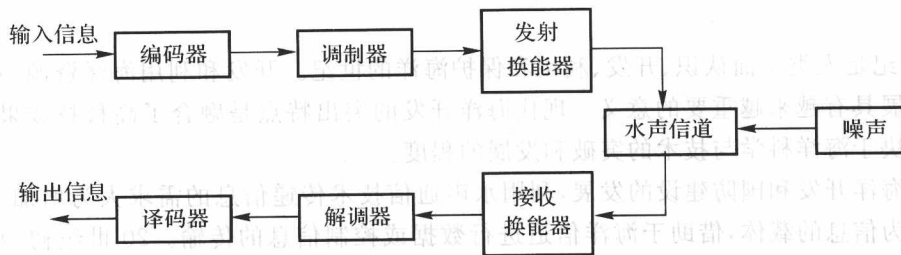


图 1-1 水声数字通信系统的组成

## 1. 信道和噪声

信道是指以传输介质为基础的信号通道,是由有形或无形的线路为信号传输提供的一条通道。抽象地说,它是指允许信号通过的一段频带,它让信号通过,同时又对信号加以限制和损害。

水声信道是指以声波为信息的载体,借助于海水介质的无线传输通道。海水介质以及海面、海底等边界条件具有复杂多变的传输特性,使得水声信道对信号的传输有着更为严重的影响。

信道的传播特性直接影响通信系统的性能。根据研究对象的不同,需要对实际的信道建立不同的数学模型,以反映信道对通信信号的影响。

噪声通常是通信系统中各种设备及信道所固有的噪声和干扰的统称。系统分析时,通常把噪声视为各种噪声和干扰的集中表现而抽象加入到接收机的输入端。按照噪声来源的不同,可将噪声分为内部噪声和外部噪声。内部噪声通常是指通信系统中各种设备的工作噪声,而外部噪声通常是从信道中引入的。

水声信道的噪声通常称为海洋环境噪声,其来源包括由鱼、虾、各种哺乳动物等引起的生物发声,由风、雨、地震扰动引起的潮汐、波浪、湍流等水静压力效应产生的噪声,以及行船、港口工业噪声等人为噪声等。与水声信道的传输特性一样,海洋环境噪声具有明显的时变性,并随频率发生变化。

## 2. 编码与译码器

编码与译码器通常包括信源编码器/译码器和信道编码器/译码器。在数字通信系统中,信源输出的模拟信号或数字信号,需要变成二进制数字信号进行传输。这种将模拟或数字信源的输出有效地变成二进制数字序列的过程,称为信源编码;将二进制数字序列转换为模拟或数字信源输出的过程称为信源译码。完成上述功能的器件,称为信源编码器/译码器。在某些

数字通信系统中,如图像传输系统中,信源编码除了要将模拟信号转换成二进制数字信号外,还需要完成数据压缩的任务,以便在有限的时间内传输动态图像显示所需的大量数据。

由于通信系统性能不完善,以及噪声和干扰的影响,数字信号在传输过程中可能会发生差错,导致信息传输质量下降。为了使这种差错控制在所允许的范围内,就需要采用差错控制技术。纠错编码技术就是其中的一种,其相应的实现电路称为纠错编码器/译码器或信道编码器/译码器。纠错编码/译码又称差错控制编码/译码,属信道编码范畴。信道编码技术主要研究检错、纠错概念及其基本实现方法。编码器是根据输入的信息码元产生相应的监督码元或冗余码元来实现对差错进行控制的,而译码器根据这些码元进行检错或纠错。

除此之外,若在通信系统中采用了其他旨在提高系统性能的编码技术,则在系统中要有相应的编码器/译码器。例如在水声多输入多输出(MIMO)系统中,通常采用空时编码来获得空间分集,因此系统中还将包括空时编码器/译码器。

### 3. 调制器与解调器

编码器输出的信号是数字基带信号,若将它直接送至信道中传输,就称为数字信号的基带传输。基带传输使用有线信道,传输的距离有限。

进行远距离无线信号的传输需要借助于载波。将数字基带信号调制在载波上,变成数字载波信号的过程称为调制。调制的作用是将输入的基带数字信号变换为适合于信道传输的频带信号。常见的数字调制方式有振幅键控(ASK)、频移键控(FSK)、相移键控(PSK)等。在水声通信系统中应用的主要是后两种。反过来,从已调载波信号中分离出基带信号的过程称为解调。

除了基本的载波调制技术外,水声通信系统通常还采用其他调制技术,如多载波调制技术等,来改善通信系统的性能。在这种情况下,系统中要包括相应的调制器/解调器,如多载波调制器/解调器等。

调制与解调是数字通信系统的核心,是最基本的也是最重要的技术之一。

### 4. 同步

同步是数字通信系统中必不可少的一部分。所谓同步就是要使通信系统的收发两端在时间和频率上保持步调一致。这种同步通常包括载波同步、位同步、帧同步等。数字通信离不开同步,同步系统性能的好坏,直接影响着通信系统性能的优劣。

以上为水声数字通信系统的一般模型,实际应用时,因要求和功能不同,其组成框图会发生变化。例如在保密通信中,还要增加加密器/解密器等。通信中的保密问题,不论在军事中,还是在经济生活中,都显得越来越重要,保密通信已成为数字通信的重要技术之一。

### 1.1.2 水声通信系统的主要性能指标

通信的任务是快速、准确地传递信息。因此评价一个通信系统优劣的主要性能指标是系统的有效性和可靠性。有效性是指在有限时间、给定信道内所传输的信息内容的多少,即指传输的效率问题;而可靠性是指接收信息的准确程度,也就是传输的质量问题。对于大多数水声通信系统来说,有效性可用传输速率和频带(谱)利用率(或称频谱效率)来衡量,可靠性可用差错率来衡量。

#### 1. 传输速率

##### (1) 码元(符号)速率

码元(符号)速率是指单位时间内通信系统所传输的码元或符号数目,记为  $R_B$ ,其单位为 B(波特)。码元传输速率又称传码率或波特率。

数字信号有多进制和二进制之分,码元速率与进制数无关,只与传输的码元时间  $T$ (单位:s)有关,即

$$R_B = \frac{1}{T} \quad (\text{B}) \quad (1-1)$$

##### (2) 信息速率

信息速率是指单位时间内通信系统所传输的信息量,记为  $R_b$ ,其单位是 b/s。信息传输速率又称为传信率或比特率。

根据信息量的定义,每个码元或符号都含有一定比特(bit)的信息量。因此,码元速率和信息速率有确定的关系,即

$$R_b = R_B H \quad (\text{b/s}) \quad (1-2)$$

式中  $H$ ——信源中每个码元所含的平均信息量(熵)。

当每个码元都等概率传送时,信息量有最大值  $\lg M$ ,信息速率达到最大,即

$$R_b = R_B \lg M \quad (\text{b/s}) \quad (1-3)$$

式中  $M$ ——码元的进制数。

对于二进制码元( $M=2$ ),码元速率和信息速率在数值上是相等的。

不同传输速率的通信信号会受到不同的信道传输特性的影响。例如,在浅海水平方向传输的水声信道中,多径效应会使高速率传输的信号中出现码间干扰,造成严重的信号失真;而在深海垂直传输的信道中,这种信号失真就会少很多。因此,水声通信系统能够达到的传输速率与其应用的信道环境有很大的关系。

##### (3) 频带利用率

由于水声信道的传输速率与通信系统的应用环境有很大关系,所以,当比较不同通信系统

的有效性时,单看它们的传输速率是不够的,还应看在这样的传输速率下所占信道的频带宽度。因此,真正衡量数字通信系统传输效率的应该是频带利用率,即数字通信系统在每单位频带内所允许的码元传输速率,记为  $\eta$ ,即

$$\eta = \frac{R_B}{W} \quad (\text{B/Hz}) \quad (1-4)$$

式中  $W$ ——数字信号所占用的系统带宽,它取决于码元速率  $R_B$ 。

频带利用率(或称频谱效率)也可以用每单位频带内所允许的信息传输速率来表征。这时式(1-4)中的  $R_B$  用  $R_b$  代替,其单位为  $\text{b} \cdot \text{s}^{-1}/\text{Hz}$ 。

大多数水声信道由于受到通信距离和所用频率的影响,可用带宽严重受限,因此,从理论上说,频带利用率高的通信系统更适合应用于水声信道。

**【例 1-1】** 已知二进制数字信号在 2 min 内共传送了 72 000 个码元,(1) 其码元速率和信息速率各为多少? (2) 如果码元宽度不变,但改为八进制数字信号,则其码元速率为多少? 信息速率又为多少?

**解** (1) 在 2 min 即  $2 \times 60 \text{ s}$  内传送了 72 000 个码元,则码元速率  $R_{B2}$  和信息速率  $R_{b2}$  分别为

$$R_{B2} = 72\,000 / (2 \times 60) = 600 \text{ B}$$

$$R_{b2} = R_{B2} \lg 2 = R_{B2} = 600 \text{ b/s}$$

(2) 若改为八进制,则

$$R_{B8} = 72\,000 / (2 \times 60) = 600 \text{ B}$$

$$R_{b8} = R_{B8} \lg 8 = 1\,800 \text{ b/s}$$

## 2. 差错概率

衡量数字通信系统可靠性的指标是差错概率。差错概率也有几种含义不同的定义。

(1) 码元差错概率(误码率)

码元差错概率是指通信系统所传输的码元的总数目中发生差错的码元数目所占的比值,记为  $P_e$ ,即

$$P_e = \frac{\text{错误码元数}}{\text{传输总码元数}} \quad (1-5)$$

(2) 信息差错概率(误比特率)

信息差错概率是指通信系统所传输的信息(比特)的总数目中发生差错的信息(比特)数目所占的比值,记为  $P_b$ ,即

$$P_b = \frac{\text{错误比特数}}{\text{传输总比特数}} \quad (1-6)$$

信息差错概率又称为误信率。在二进制码元的情况下,码元差错概率和信息差错概率在数值上是相等的。

影响误码率的因素有两个：一是系统设计不完善，二是各种干扰和噪声的存在。前者的影响原则上可以通过正确的设计加以消除，而后者的影响总是存在的，无法避免。通信系统中通常采用差错控制技术来降低误码率，提高可靠性。

**【例 1-2】** 已知一八进制数字通信系统的信息速率为 12 000 b/s，在接收端半小时内共测得出现了 216 个错误码元，试求系统的误码率。

**解** 信息速率  $R_{\text{bs}}$ 、码元速率  $R_{\text{B8}}$  和误码率  $P_e$  分别为

$$R_{\text{bs}} = 12\,000 \text{ b/s}$$

$$R_{\text{B8}} = R_{\text{bs}} / \lg 8 = 4\,000 \text{ b/s}$$

$$P_e = \frac{216}{4\,000 \times 30 \times 60} = 3 \times 10^{-5}$$

## 1.2 水声通信系统的特点

从系统组成、工作原理和性能指标来看，水声通信系统与无线电通信系统有很多相似之处。但由于信道特性的不同，水声通信系统具有一些不同于无线电通信系统的特点。具体来说，水声通信呈现以下主要的特点。

### 1. 水声通信是应用于水下的无线通信

水声通信是一种应用于水下的、特殊的无线通信，这有两方面的含义。第一，水声通信不同于通过电缆或光纤传输的有缆通信，是一种借助于水声信道来传送信息的无线通信。与空中的无线通信系统一样，水声通信系统会受到水下无线信道，即水声信道传播特性的影响。由于受到海面 and 海底反射、折射，以及海水中不均匀介质起伏的影响，海水介质形成的水声信道具有复杂的、时变多径的传播特性，会造成信号的衰落。第二，水声通信不同于空气中借助于电磁波传输的无线通信，而是一种借助于声波传输的无线通信。目前，声波是海水中最为有效的传输介质，相对于电磁波、光波来说，声波在海水中的传输距离最远。另外，声波的标称传播速度为 1 500 m/s，远低于电磁波的传播速度 ( $3 \times 10^8$  m/s)；而且，不同海域、不同深度的声速会随时间发生变化，形成不同的声速剖面。声速剖面及其时变性是造成水声信道时变多径传播特性的主要因素之一，会对水声通信信号造成严重影响。

### 2. 水声信道是带限的、时变的和多径衰落的信道

与无线电通信系统一样，水声通信系统的性能与水声信道的传播特性密切相关。声波在传播时有能量损耗(传播损失)，且近似与频率的二次方成正比，随着传播距离的增加而显著增加。这使得信道的可用带宽受限，中、远距离信道中的传输带宽在几百赫到几千赫之间。

由于受到海水中不均匀介质和海面、海底的反射和折射，大多数水平方向传播的声波，特

别是浅海信道中的声波的传播都是多路径的,多径时延在几十到上百毫秒之间;这些传播路径(多径结构)是时变的,而且与信道的深度、传输距离、发射、接收换能器的位置等密切相关。

由于海水起伏以及多径传播,信号会受到信道衰落的影响,且按照传播方向和水文条件的不同,衰落过程有很大的不同,通常呈现频率选择性衰落;信道中相位起伏对相位调制系统中的相位跟踪及相干检测性能的影响很大。

除了发射和接收系统之间的相对运动引起多普勒频移外,发射和接收换能器之间深度的相对变化也会引起时变性,造成多普勒频移。由于声波的传播速度(1 500 m/s)远低于无线电通信系统中的电磁波传播速度,水声信道中多普勒频移的影响要比无线电信道中大得多。

水声信道的这些传播特性不仅影响了水声通信系统的性能和方案设计,也使得水声信道传播特性的分析和仿真成为通信系统研究的重要内容之一。

### 3. 大多数水声通信系统是数字通信系统

大多数水声通信系统是数字通信系统,这是因为随着数字技术的发展,可以更多地采用数字信号处理方法和来处理水声通信信号,使通信系统具有更好的抗信道干扰的能力,降低误码率,提高可靠性。

由于受到水声信道衰落,特别是相位起伏的影响,所以数字频率调制技术(如频移键控调制)及非相干检测一直被水声通信系统所采用。直到自适应相位跟踪和信道均衡技术在水声通信系统中取得成功后,相位调制和相干检测技术才在水声通信系统中得到应用。

### 4. 水声通信系统性能指标可以用数据率 $\times$ 距离性能表征

水声通信系统的性能与水声信道的传播特性密切相关,而信道的特性与信号频率、传输距离、信道水深等因素有关,因此,以某个单一指标来衡量水声通信系统的性能指标的优劣没有实际意义。D. B. Kilfoyle 等人通过对各种包含试验的文献汇总后发现,可以用数据率(kb/s) $\times$ 传输距离(km)来粗略比较各系统的性能。到目前为止,大多数水声通信系统的性能指标一般在 40 kb/s $\times$ km 以下。

## 1.3 水声通信系统的分类

目前,大多数水声通信系统都是数字通信系统,系统的分类可以按照所用信道的情况、调制解调的方式、通信的业务来进行划分,也可以按照发射机和接收机克服多径衰落的方式进行划分。

### 1. 按照在信道中传播的方向和条件来分

按通信系统所应用的水声信道的深度可以将系统分为浅海和深海水声通信系统;按照系

统传输距离的不同,可以分为近距离和远距离水声通信系统;按照信号是在海底和海面间传输还是在水平方向从一点到远距离另一点的传输,相应地分为垂直信道和水平信道水声通信系统。

## 2. 按照信号检测的方式来分

按照通信信号调制解调方式的不同,可以分成非相干检测和相干检测水声通信系统,如采用频移键控和差分相移键控调制的系统通常采用非相干解调方法,因而被称为非相干检测系统,而采用相移键控和正交幅度调制的系统通常采用相干解调方法,被称为相干检测系统。

## 3. 按通信的业务来分

按照通信的业务来分,水声通信系统有声遥测、声遥控、潜艇通信、水下电话、图像通信系统等。通信业务不同,对通信系统性能的要求也不同,如对声遥测、图像通信等涉及大量数据传输的系统,高数据率是必要的;而对于声遥控系统,可靠性是首要的性能指标。

## 4. 按照采用分集的方式来分

对这种分类方式起重要作用的是分集的概念。分集技术是指将通信信号经过多个独立衰落的子信道进行冗余传输,从而获得分集增益,用来改善系统性能的技术。显分集是指通过信号设计、增加发射、接收设备等,在时间、频率、几何空间或波形空间上形成明显的独立衰落的子信道;而隐分集是指没有采用额外的设备,但利用信道中内在的独立衰落信道,如多径信道,通过信号处理来获得分集增益的技术。按照系统中是否使用了分集可以把通信系统分为三类:①没有采用分集的;②只采用显分集技术的;③至少有隐分集处理的。

# 1.4 水声通信系统的研究与发展

20世纪初,水声通信技术就开始被用来进行信息的传输,但水声信道恶劣的传播特性阻碍了其技术发展,使得水声通信系统的应用也受到局限。近年来,随着先进信号处理技术在水声通信系统中的应用,水声通信技术取得了长足的进步和发展,其研究也受到越来越多的关注。20世纪80年代初期以来,水声通信的进步可归纳为以下6个研究领域:①水声信道物理学的研究,包括水声信道的模化、仿真和测量;②接收机结构的研制,主要体现为功能强大的信号处理机的使用和各种自适应信号处理算法的研究;③各种应用于衰落信道的分集技术的研究;④编码技术,包括图像传输所需的压缩编码和提高系统可靠性的纠错编码技术的研究;⑤水下网络系统的研究;⑥能减少多径效应影响的新型调制方式的研究。下面将按水声信道研究和水声通信技术研究分别对上述领域已取得的进步和未来的发展趋势进行综述。



### 1.4.1 水声通信信道的研究

无论何种通信模式,水声信道的传播特性对水声通信系统的效率和可靠性等都产生了强烈的影响。在设计通信系统之前,研究人员都必须对水声信道的特性如传播损失、环境噪声、多径干扰和时变特性等有充分的了解。因此,信道研究是水声通信研究的一个重要方面,其研究内容包括影响通信的主要物理效应的测量与分析、时变多径信道的建模以及多径衰落信道中信号处理算法的性能仿真和系统的性能评估等。

在通信系统中,信道以两种方式影响信号。首先,当信号从发射机经由信道传输到接收机时,信道能改变它的形状。这种形状的改变除幅值变化和时间延迟外,还会出现频率的变化,产生与时间、频率和空间有关的选择性衰落。其次,信道会影响接收信号的信号噪声比。早期,由于水声通信系统的调制与解调方式比较简单,通信速率低,对信息处理的速度、实时性的要求也不高,信噪比是信道研究的重要性能指标,水声信道的研究重点放在传播损失等声场特性和信噪比等参量上,用声场模型和统计方法对各种信道条件下信道的传播损失、随机起伏等影响信噪比的因素进行分析和估计。

随着高速率水声通信的出现,波形失真对系统性能的影响越来越大,仅研究信噪比这个参量,或仅用增加发射功率等方法来改善通信质量,已远远不够。因此,信道的研究逐渐转移到信道的时变、多径特性,以及由此造成的信号衰落方面。

水声信道的研究主要是通过建立信道模型来为通信系统的设计和性能评估提供理论参考的。信道模型以数学或算法的形式来表征信道的输入输出关系,它可以通过测量或基于信道传播的物理模型得到。水声信道模型研究的焦点是如何更真实地模化水声信道的时变、多径衰落特性。水声信道模型主要有两类:一是反映信道主要物理效应和信号传输过程的物理模型,二是描述信号衰落的统计模型。一个最佳的水声信道模型是物理模型和统计模型的有效结合。

#### 1. 水声信道的物理模型

信道的物理模型是在信道测量的基础上建立的,模型的输入通常为信道测量的物理量,测量物理量的数量、精度及其时变性决定了模型的真实度。按照模型中是否引入了时变性,可将信道仿真方法大致分为两类。第一类模型通常采用二维(距离和深度)声线模型对信道进行模化,仿真信道的多径结构。模型的输入参数主要是水声信道中静态的声速值、信道/发射机/接收机深度、距离以及信号频率等。模型中考虑了造成信号传播损失的主要因素,可以给出本征声线及其传播损失、传播时间等,由此可得到信道静态的多径时延、冲激响应等。第二类模型是对海洋动态过程进行仿真,对引起信道时变性的主要因素如风动海面、内波的扰动及紊流影响