

高等学校教材

声信号处理及其应用

肖国有 屠庆平 编著



西北工业大学出版社

高等学校教材

声信号处理及其应用

肖国有
屠庆平 编著

西北工业大学出版社

1994年12月 西安

(陕)新登字 009 号

【内容简介】 本书从声纳系统和信号流程图出发,围绕声纳目标检测、估值、定位、分辨、分类与识别等中心问题,系统地讨论了声信号的产生、信道传输、接收与显示处理等方面的理论与技术问题。本书的侧重点放在声信号的多维处理上,包括预处理、空间处理、时间处理和频率处理等原理与方法的讨论。在本书的最后还分别举例介绍了主、被动声纳信号处理系统的设计方法。此外,附在每章后面的思考题可促使读者深入思考有关的问题。

本书共分十章,内容丰富,系统性强,理论与应用密切联系,很适合作有关专业的研究生教材,也可供有关专业的工程技术人员参考。

高等学校教材
声信号处理及其应用
肖国有、屠庆平 编著
责任编辑 李珂
责任校对 钱伟峰

*

©1994 西北工业大学出版社出版发行
(710072 西安市友谊西路 127 号 电话 4253407)

陕西省新华书店发行

西北工业大学出版社印刷厂印装

ISBN 7-5612-0693-3/TN·24

*

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 13.125 字数 312 千字

1994 年 12 月第 1 版 1994 年 12 月第 1 次印刷

印数: 1—1 000 册 定价: 7.80 元

前 言

《声信号处理及其应用》是作者在前些年给研究生讲授“Digital Signal Processing for Sonar”^①和“Sonar Signal Processing”^②这两篇名著的基础上，又参考了大量的有关文献，结合多年科研成果，经过充实内容和增加必要的数学分析而编著成的。它自成体系，内涵丰富，理论与实用兼顾，有助于读者迅速、全面、深刻地了解声信号处理的理论和实现技术以及它的当代最新成就。

本书主要论述水下声信号处理问题，共十章，分为五个大部分。第一部分由第一章的内容构成。它是概述性的，主要涉及声纳系统和声信号处理机的一般概念；第二部分是关于声信号、信道与声信号预处理，由第二章到第五章的内容构成，主要讨论声源、声场与信道，解析信号与频带转移，波形设计与信号产生，数字化与动态范围压缩；第三部分是空间信号处理，由第六章的内容构成，主要论述波束形成与频率波数谱估计；第四部分内容是时域与频域信号处理，由第七章至第九章的内容组成。它包括滤波与平滑，判决处理（检测、估计、跟踪与分类）和现代谱分析；最后一部分是综合应用性质的，由第十章的内容构成，主要概述声信号处理机的设计方法，并且具体分析主动声纳系统和被动声纳系统声信号处理机设计问题。每章后均附有思考题与练习及参考文献。

声信号处理的应用不仅涉及到水下声信号检测、定位、分类、跟踪、参数估计、通信、导航、武器制导、水声对抗、遥测遥控，而且它与雷达、通信、地球物理、语言、音乐、图象、生物医学、超声检测等学科领域中的信号处理有许多共同之处。事实上它们各自的发展是互相促进甚至是结合的。所以，本书除供学习声信号处理的研究生作教材外，还可供在上述领域学习的研究生、本科生和有关的工程技术人员参考。

本书除第九章由屠庆平编著外，其余由肖国有编著并负责统稿。

编 著 者

1994年1月于西安西北工业大学

① Proc of The IEEE V. 69, No. 11, Nov. 1981.

② A. V. Oppenheim, Applications of Digital Signal Processing, ch. 6, 1978 by Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J. 07632

04081/94



作者简历——

肖国有 1939 年 11 月生,1964 年毕业于西北工业大学水声工程专业留校任教。1988 年任副教授。长期从事水声工程与声信号处理方面的科学研究与教学工作,参与了多部声纳系统的设计与研制。近年侧重于 VLSI 信号处理系统与声纳模拟技术的研究。



作者简历——

屠庆平 1945 年 8 月生,1968 年毕业于西北工业大学水声工程专业,1979 年在北京大学进修“信号处理与信号检测”,主要从事水声工程与信号处理方面的教学和科研工作。1991 年晋升为副教授。现任西北工业大学声学工程研究所副所长,兼任陕西省信号处理学会理事和秘书长。

目 录

第一部分 概 述

第一章 声纳系统与声信号处理	1
1.1 声纳系统	1
1.1.1 定义与分类	1
1.1.2 水声信号传播特点	2
1.1.3 声纳系统性能估计	3
1.1.4 水声技术应用及新技术的影响	5
1.2 声信号处理与声信号处理机	5
思考题与练习	7
参考文献	8

第二部分 声信号、信道与声信号预处理

第二章 声源、声场与信道	9
2.1 信号与噪声模型	9
2.1.1 主动声纳信号	9
2.1.2 被动声纳信号	11
2.1.3 海洋环境噪声	12
2.1.4 混响	12
2.2 声场及其性质	13
2.2.1 声场的数学模型	13
2.2.2 声场的性质	13
2.3 信道模型及其性质	15
2.3.1 传播/散射效应	15
2.3.2 信道模型	17
2.3.3 信道的性质	18
2.4 声源与声场的关系	20
2.5 扩展信道——抽头延迟线模型	21
思考题与练习	23

参考文献	24
第三章 解析信号与频带转移	25
3.1 解析信号.....	25
3.2 HILBERT 变换	27
3.2.1 HILBERT 变换的定义	27
3.2.2 HILBERT 变换的性质	28
3.3 窄带信号复数表示.....	29
3.3.1 确定性窄带信号复数表示.....	29
3.3.2 随机窄带信号复数表示.....	31
3.4 正交解调及其实现.....	33
3.4.1 正交解调原理.....	33
3.4.2 正交解调的实现.....	34
3.5 线性窄带信号与系统.....	35
3.5.1 线性窄带系统复数表示.....	35
3.5.2 线性窄带系统对窄带信号的响应	36
思考题与练习	37
参考文献	38
第四章 波形设计与信号产生	39
4.1 模糊度函数.....	39
4.1.1 接收信号模型.....	39
4.1.2 匹配滤波.....	40
4.1.3 模糊度函数及其性质.....	41
4.1.4 模糊度函数计算举例.....	42
4.2 脉冲压缩.....	44
4.3 波形设计.....	45
4.3.1 分辨率与模糊度函数.....	45
4.3.2 参数估计精度与模糊度函数.....	46
4.3.3 检测性能与模糊度函数.....	50
4.3.4 中心频率选择.....	53
4.4 信号产生.....	53
4.4.1 信号产生方法.....	53
4.4.2 典型的数字信号发生器.....	54
思考题与练习	56
参考文献	57
第五章 数字化与动态范围压缩	59
5.1 时域采样与频域采样.....	59

5.1.1 低通信号采样	59
5.1.2 带通信号采样	63
5.1.3 随机信号采样	64
5.1.4 频域采样	64
5.2 带通信号采样技术	65
5.2.1 正交采样	65
5.2.2 延迟采样	65
5.2.3 解析信号采样	66
5.2.4 欠采样(undersampling)	68
5.3 量化	68
5.3.1 量化概念	68
5.3.2 量化噪声与 SQNR	70
5.4 动态范围压缩	73
5.4.1 问题的提出	73
5.4.2 动态范围控制技术	73
思考题与练习	75
参考文献	75

第三部分 空间信号处理:波束形成与频率波数谱估计

第六章 空间信号处理	77
6.1 基阵与空间采样	77
6.1.1 基阵(传感器阵)	77
6.1.2 空间采样	78
6.2 波束形成与基阵图案	81
6.2.1 波束形成	81
6.2.2 基阵图案	82
6.2.3 波束形成举例——离散线阵	83
6.3 空间-时间类比与多维滤波	89
6.3.1 空间-时间类比	89
6.3.2 多维滤波	92
6.4 波束形成的实现	93
6.4.1 数字延迟求和波束形成	94
6.4.2 “downsampling”波束形成	96
6.4.3 内插(upsampling)波束形成	98
6.4.4 正交波束形成(复数波束形成)	99
6.4.5 相移波束形成	100
6.4.6 频率域波束形成	102

6.5 自适应波束形成与频率波数谱估计	105
6.5.1 自适应波束形成器	105
6.5.2 频率波数谱估计	106
6.6 综合孔径声纳(SAS)	111
6.6.1 SAS 基本原理	111
6.6.2 SAS 信号处理	113
6.7 随机阵	115
6.7.1 随机阵的概念	115
6.7.2 波束形成与波束图案的统计性质	115
6.7.3 指向性指数	117
思考题与练习	117
参考文献	118

第四部分 时域与频域信号处理

第七章 滤波与平滑	121
7.1 滤波器的信号处理功能	121
7.2 数字滤波器的分类及其特性比较	122
7.3 数字滤波器的技术规格	124
7.4 数字滤波器的实现	125
7.4.1 时域硬件实现	125
7.4.2 频域软件-硬件相结合的实现	125
思考题与练习	128
参考文献	128
第八章 判决处理	129
8.1 检测与估计理论	129
8.1.1 假设检验	129
8.1.2 最佳估计	134
8.1.3 检测与估计理论小结	137
8.2 目标检测	138
8.2.1 慢起伏点目标的检测(白噪声中严格已知波形的检测)	138
8.2.2 随机相位和振幅信号的检测(Rayleigh 起伏目标的检测)	139
8.2.3 扩展目标的检测	141
8.2.4 被动声纳信号的检测(高斯背景噪声中完全未知信号的检测)	143
8.3 参数估计与定位	144
8.3.1 被动声纳方位估计	144
8.3.2 被动声纳测距	147

8.3.3 单通道被动声纳频谱估计	147
8.3.4 频率波数谱估计	149
8.4 目标跟踪(目标运动分析)	149
8.4.1 状态空间表示	149
8.4.2 信号模型与观测模型	151
8.4.3 卡尔曼滤波器	151
8.4.4 目标运动分析举例	153
8.5 目标分类与识别	156
8.5.1 目标分类与识别概述	156
8.5.2 模式识别引论	157
8.5.3 样板匹配自动模式识别系统	158
8.6 归一化	159
8.6.1 归一化的定义与分类	159
8.6.2 自适应归一化方法	160
8.7 显示处理	161
思考题与练习	161
参考文献	163
第九章 现代谱分析	164
9.1 经典谱分析基础	164
9.1.1 经典功率谱密度分析方法	164
9.1.2 经典谱分析的数据模型	165
9.1.3 频谱估计质量的改善——平均短时间周期图	166
9.1.4 经典谱分析在声纳中的应用	167
9.2 现代谱分析基础	168
9.2.1 现代谱分析产生的背景	168
9.2.2 现代谱分析的数据模型	168
9.3 现代谱分析技术	169
9.3.1 自回归(AR)PSD估计	169
9.3.2 滑动平均(MA)PSD估计	173
9.3.3 自回归滑动平均(ARMA)PSD估计	174
9.3.4 最大似然谱估计(MLSE)	175
9.3.5 Pisarenko 简谐分解(PHD)	176
9.4 结论	180
思考题与练习	182
参考文献	183

第五部分 声信号处理机设计与设计举例

第十章 声信号处理机设计.....	185
10.1 设计方法概述.....	185
10.1.1 声信号处理系统透视.....	185
10.1.2 设计过程与设计方法论.....	186
10.1.3 性能要求与载荷计算.....	188
10.2 主动声纳信号处理机设计.....	190
10.2.1 用户要求与技术规格.....	190
10.2.2 系统功能与算法.....	191
10.2.3 逻辑系统设计.....	191
10.2.4 详细的技术设计.....	192
10.2.5 硬件实现体系结构.....	196
10.3 被动声纳信号处理机设计.....	196
10.3.1 用户要求及技术规格.....	196
10.3.2 系统功能与算法.....	197
10.3.3 详细的技术设计.....	197
10.3.4 硬件/软件实现体系结构	200
参考文献.....	200

第一部分 概 述

本部分由第一章的内容构成。论述的中心之一是声纳系统。主要是讨论声纳系统的定义、水声信号传播特点、声纳系统性能评估方法、水声技术应用及高新技术对它的影响；论述的中心之二是声信号处理机。主要是讨论声信号处理机的定义、组成、功能及其粗略的结构划分。

第一章 声纳系统与声信号处理

1.1 声纳系统

1.1.1 定义与分类

Sonar (声纳)是“SOund NAvigation and Ranging”的缩写,即声波导航与测距的意思。Winder 在“Sonar Syatem Technology”一文中定义声纳为“用水声方法确定海洋中物体的存在、位置或者性质的方法或设备”^[4]

声纳可以分为两大类:主动声纳(Active Sonar)与被动声纳(Passive Sonar)

主动声纳如图 1.1 所示。主动声纳本身要发射声波,它把接收目标的反射波作为检测与估计的基础。发射波通过介质传播和目标反射,均会发生能量损失。此外,进入接收机的还有环境噪声和混响,尤其是后者,它是限制主动声纳性能的主要因素。

被动声纳如图 1.2 所示。被动声纳本身不发射声波,它依靠目标辐射的声波作为检测与估计的基础。目标所辐射的声波可以是目标本身的机械噪声、流体动力噪声,或者目标的主动声纳发射的声波。影响被动声纳性能的因素除了传播损失和加性噪声之外,主要还受目标辐射特性不完全了解和海洋介质引起目标信号的时间弥散和频率弥散的限制。

表 1.1 列出了主/被动声纳的主要参数。

表 1.1 声纳的主要参数

主 动 声 纳	被 动 声 纳	主 动 声 纳	被 动 声 纳
振幅	振幅	历程	频谱
距离	方位	距离扩展	距离
方位	俯角	方拉扩展	
多普勒	历程	多普勒扩展	

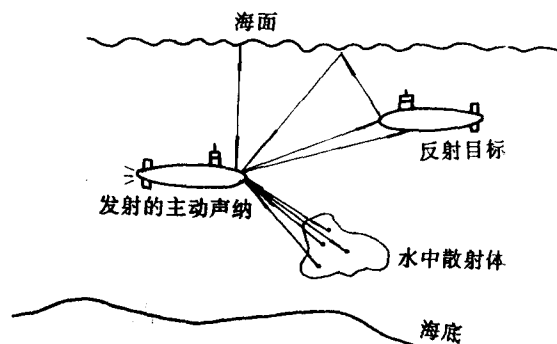


图 1.1 主动声纳

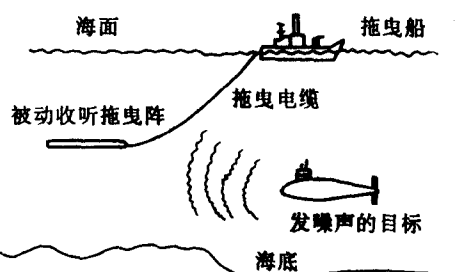


图 1.2 被动声纳

1.1.2 水声信号传播特点^{[1], [3]}

无论是主动声纳还是被动声纳,都是利用海水作为声信号传播的媒介。由于海洋结构,海水本身的运动,以及目标的特性,使得声信号在海水中的传播变得异常复杂。了解水声传播特点和它们对信号处理产生哪些影响是十分必要的。水声信号的传播特点如下:

(1) 多普勒效应。所谓多普勒效应是由于平台与目标之间有相对运动引起接收信号的频移。假定无相对运动时接收频率为 f_0 ,有相对运动之后接收信号频率变为

$$f_r = f_0 + f_d \quad (1.1)$$

式中

$$f_d = \pm f_0 (2\Delta v / c) \quad (1.2)$$

由于相对速度 Δv 与声速 c 可以比较,故在声纳中多普勒频偏比较显著,这比雷达中严重得多。多普勒效应是有害的,它可能使换能器失谐,并要求接收机有较宽的输入带宽。但是当需要估计目标的径向速度时,多普勒效应提供的信息又是有用的。

(2) 海水介质中的声速 c 是时空变的。海洋中声波传播速度并不是常数,它是深度与距离的时变函数。并且与地理位置和季节有明显的依赖关系。声速 c 与温度 T 、深度 D 、距离 R 、盐度 S 的关系如下:

$$\begin{aligned} c = & 1492.9 + 3(T - 10) - 6 \times 10^{-3}(T - 10)^2 \\ & - 4 \times 10^{-2}(T - 18)^2 + 1.2(S - 35) \\ & - 10^{-2}(T - 18)(S - 35) + D/61 \end{aligned} \quad (1.3)$$

式中 $-2 \leq T \leq 24.5^\circ\text{C}$ $0.03 \leq S \leq 0.042$ $0 \leq D \leq 1000 \text{ m}$

(3) 海水是有界的。海面 and 海底是海洋的上下两个边界,声波与海洋边界的相互作用也会引起复杂的难以预测的折射传播。这种现象在浅海中显得特别突出。

(4) 信号的色散。海水质量的运动以及海面、声纳平台和目标的运动,将导致信道产生各种时间、频率和方位角的色散,其结果使接收波形畸变和解相关。

(5) 声吸收。声信号在海水传播,由于海水的声吸收现象,声能要发生损失。声吸收的本质归因于海水介质本身的剪切粘滞性、容积粘滞性和离子弛豫现象,它与频率有关即

$$\alpha = 16\pi^2 \mu_r / [3\rho c^3 (\mu_r + 3/4\mu_v) f^2] \quad (1.4)$$

式中 α ——吸收系数；
 μ_s ——剪切粘滞性系数；
 μ_v ——容积粘滞性系数。

这种频率相关性吸收损失会限制声纳系统的作用距离。

(6) 海洋噪声。海洋本身充满了各种干扰声源，它们可能来自航行的机械噪声、流体动力噪声、波浪噪声、生物噪声以及人为的干扰。噪声的存在可能淹没弱小的有用信号。

(7) 混响。海水介质充满不均匀的悬浮粒子以及海面 and 海底的粗糙不平，这一切将引起主动声纳发射时产生各种混响，混响是主动声纳不可避免的一种严重干扰。

(8) 海水介质的微结构及内波引起声信号传播起伏。

综上所述，由于目标和声纳平台的动态特性以及海洋介质的影响，回波信号除了衰减、延迟和多普勒频移之外，还可能发生严重的波形畸变、解相关、波形起伏、目标方位、距离与频率的扩展。图 1.3 总结了作为声信道的海水介质和目标受到的各种复杂因素的影响^[2]。

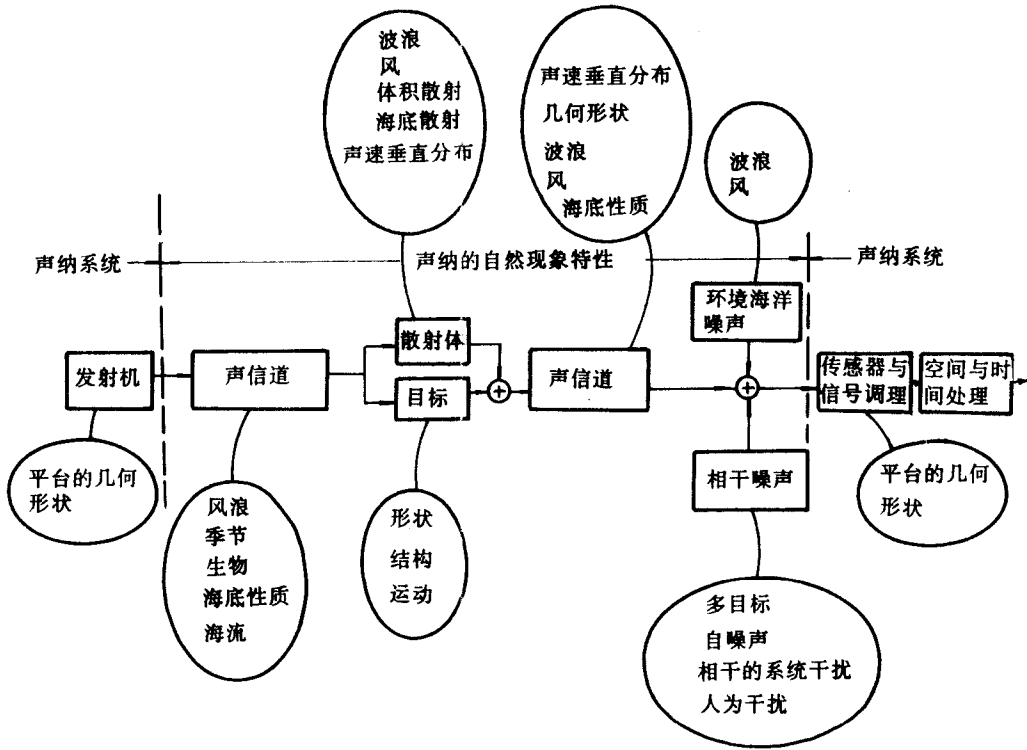


图 1.3 声纳及影响声纳特性的一些因素

1.1.3 声纳系统性能估计^[3]

若要定量地对声纳系统的初步性能作出评价，这可以借助于声纳方程。

主动声纳方程：

$$\text{SNRAV} = \text{SL} - 2\text{TL} + \text{TS} - (\text{NL} - \text{DI}) \quad (1.5)$$

被动声纳方程:

$$\text{SNRAV} = \text{SL} - \text{TL} - (\text{NL} - \text{DI}) \quad (1.6)$$

声纳方程中各项的含义如下:

SL——声源级,以分贝为单位。参考级为 $1\mu\text{Pa}$,它相当于均方根声压等于 $0.64 \times 10^{-22} \text{W}/\text{cm}^2$ 的平面波声强的单位。

TL——传播损失,以分贝为单位。它表示声信号由声源传到目标,或由目标传到接收机引起的能量损失(单程传播损失)。

TS——目标强度,以分贝为单位。它表示目标反射声波的能力。

NL——接收机处的噪声级,参考级为 $1\mu\text{Pa}$ 。

DI——接收基阵指向性指数,单位为分贝。它表示基阵抑制无方向噪声的能力。

SNRAV——接收机获得的有用信号噪声比,以分贝为单位。

对于主动声纳来说,在某种条件下,如果接收机处的噪声是混响占优势时,式(1.5)中的(NL-DI)项应当用混响级 RL 代替。如果声纳方程中包含的各项能够实际估算出来,则声纳系统的性能就能大致估计出来。值得注意的是,这里 SNRAV 是接收机实际获得的信噪比。另外,声纳接收机为了满足不同的目的(检测、估计……)需要一定的 SNR(即检测阈 DT),计算得到的 SNRAV 应该与要求的这个阈值比较。

SNRAV 和要求的 SNR 与目标、传播介质和声纳系统本身的参数与性质有关。表 1.2 指出了影响声纳方程中各项的某些因素。

表 1.2 影响声纳方程中诸项的一些因素

声纳方程中的项	影响该项的一些因素
SL	对主动声纳: 换能器效率 η 、电功率 P_e 、工作频率 f 、带宽 BW 、发射器工作深度。 对被动声纳: 目标深度、机械特性、目标的辐射能力
TL	频率 f 、距离 r 、发射器深度、接收器深度、声速、天气、季节
NL	频率 f 、接收基阵深度、带宽 BW 、接收基阵的机动性质、生物与交通航行密度
RL	声源级 SL、散射强度、脉冲长度 τ 、束宽
DI	频率 f 、基阵几何形状
TS	频率 f 、目标尺寸、组合结构形状(目标相对于接收机的取向)
要求的 SNR	信号结构、接收机结构、介质(信道)散射函数

1.1.4 水声技术应用及新技术的影响

1. 水声技术应用

1) 军事应用:

- | | |
|--------|--------|
| ① 检测 | ② 定位 |
| ③ 分类 | ④ 跟踪 |
| ⑤ 参数估计 | ⑥ 武器制导 |
| ⑦ 水声对抗 | ⑧ 水下通讯 |

2) 民用:

- | | |
|--------|----------|
| ① 鱼群定位 | ② 海底地貌测绘 |
| ③ 导航 | ④ 地震预报 |
| ⑤ 声海洋学 | ⑥ 水声遥控遥测 |
| ⑦ 无损检测 | ⑧ 医疗诊断 |

2. 新技术的影响

声纳技术的发展既取决于本学科自身不断丰富和深化的研究成就,也强烈地受到新技术和其他科学技术进步的影响。这些影响主要表现在:

- 1) 现代高速固态电子器件(例如:VLSI 可编程信号处理器)引入到信号处理中来。
- 2) 微处理器(μP)与微计算机(μC)用于信号处理、数据处理、系统管理与控制。
- 3) 数字信号处理理论与技术的发展,例如数字滤波、快速变换算法、自适应处理、人工神经网络等。
- 4) 雷达、声频、语言、无线电、通讯、图象处理、地震学、模式识别以及其他相关学科出现的新技术。

上述诸方面的发展给声纳技术进步以巨大的推动,使现代声纳系统的发展出现了三种趋势:

模拟处理→数字处理;

人工硬件为基础的系统→自动软件为基础的系统;

单个实现的子系统→综合的计算机控制的协同工作的系统。

1.2 声信号处理与声信号处理机

声信号处理是指在干扰背景下,通过对声场的时空抽样,分别或同时地在空域、时域或频域完成对信号加干扰的变换、处理、运算,以提高检测信号和估计其参数的能力的理论与实现。现代声信号处理一般都采用数字方法。数字信号处理指的是用数字逻辑硬件或计算机对信号(信息)进行装配、编辑、产生、解释、计算以及其他等作用。这种能用来加工和处理各种电类信号的硬件装置或系统就叫做信号处理机。

现在以声纳为例研究声信号处理机的组成与功能。图 1.4 和图 1.5 分别表示主动声纳和被动声纳处理机的主要组成功能部件。它们的主要处理功能如下:

- (1) 信号产生。

- (2) 时间采样与量化。
- (3) 空间采样与波束形成。
- (4) 频带转移。
- (5) 滤波与平滑。
- (6) 判决处理。

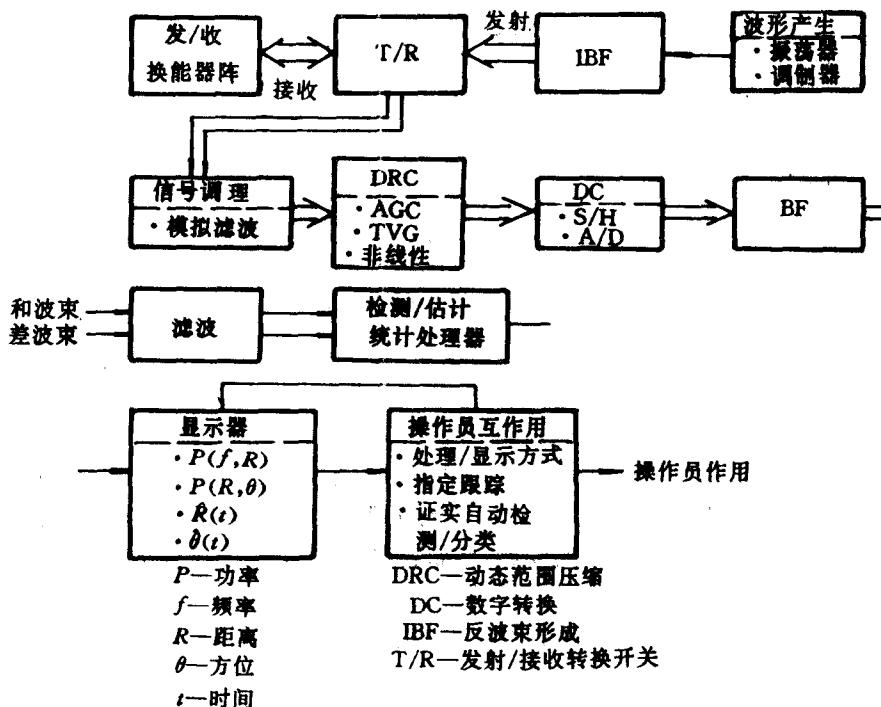


图 1.4 主动声纳系统组成

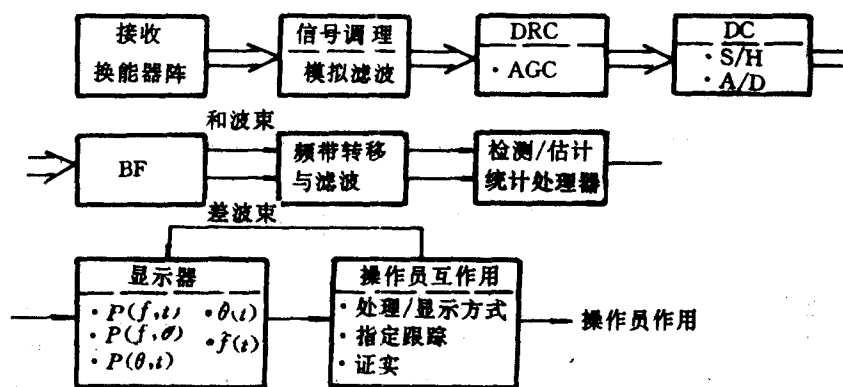


图 1.5 被动声纳系统组成

比较和综合主动声纳系统和被动声纳系统的组成框图,可以得出一个更具一般性的简洁的功能框图,如图 1.6 所示。按照信号处理领域它被大致分为三类:

空间处理;