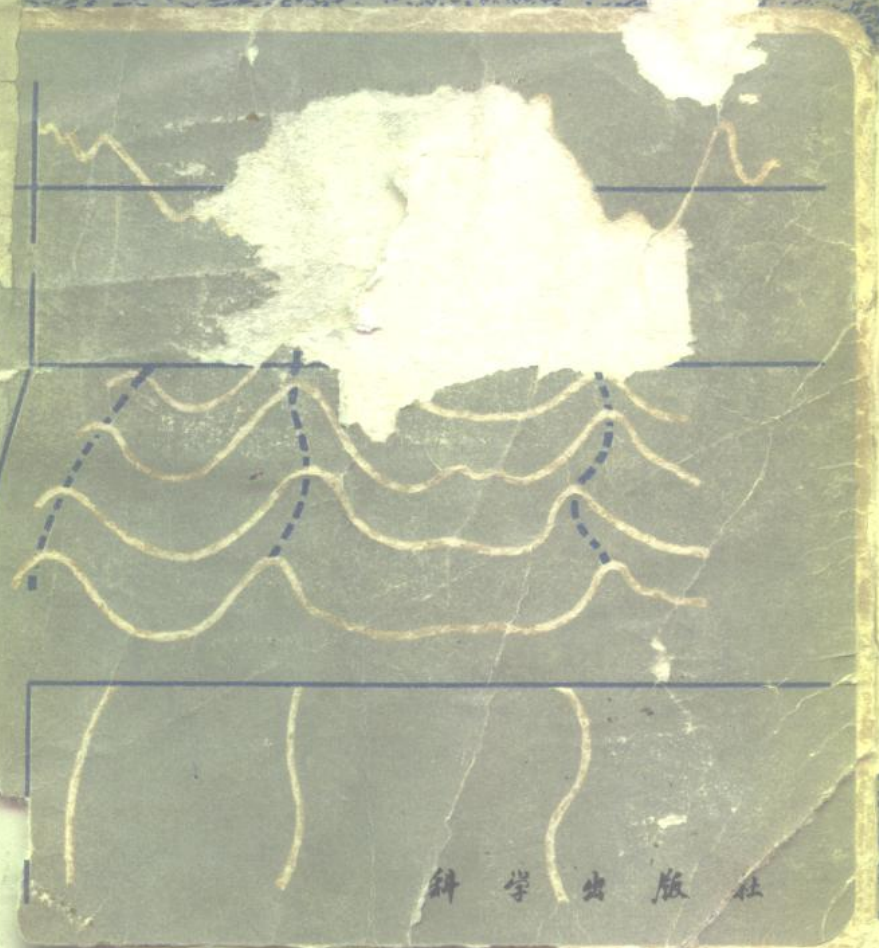


水声信号被动检测 与参数估计理论

沈元宁 王天威 著



科学出版社

水声信号被动检测与 参数估计理论

郑兆宁 向大成 著

科 学 出 版 社

1983

内 容 简 介

本书阐述水声信号被动检测与参数估计理论，共分两部分。第一部分为被动声呐检测理论。首先介绍了最佳接收系统的基本概念，然后从时空统一处理的角度导出水声多元阵接收系统在各种准则要求和各种噪声以及信号条件下的最佳结构，进而探讨最佳系统的物理机理，进行性能计算，并讨论有实用意义的各种次最佳系统以及常规系统最佳化问题。最后讨论用自适应方法实现最佳系统的自适应波束形成器。

第二部分为被动声呐参数估计理论。首先论述与被动声呐有关的参数估计基本理论。在此基础上导出最大似然测向系统，方位与距离联合的有效估计系统，以及它们的各种等效结构，并进行性能计算和讨论次最佳实现问题。最后详细讨论功率谱估计及其在近代线谱检测与跟踪技术中的重要应用。

书末附有四个附录，主要论述与正文有关的预备知识，是一般教科书中没有或叙述过于简略的内容。

本书可作为大学教学参考书，研究生教材，或供水声设备科研、设计人员学习和参考使用。对雷达、通信、地球物理领域中有关科研设计人员也有一定参考价值。

水声信号被动检测与参数估计理论

郑兆宁 向大威 著

责任编辑 赵惠芝

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1983年3月第一版 开本：850×1168 1/32
1983年3月第一次印刷 印张：22
印数：0,001—2,150 字数：562,000

统一书号：13031·2184

本社书号：2990·13-3

定价：4.00元

序 言

在第一次世界大战以后，由于反潜战争的需要，在很大程度上促进了水声学的发展。反潜战有四个基本任务，这就是对潜艇进行探测、定位、识别和攻击，其中前三个任务主要是由水声设备担任的，因为在人类目前所能利用的各种物理波中，只有声波在水中传播最远。近廿年来，随着运载核导弹的核潜艇的出现，反潜战的战略地位变得空前重要，从而对水声设备也提出了更高的要求，迫切要求在技术条件和设备造价允许范围之内，尽可能远地探测到水中目标，尽可能准地进行定位和识别。为此许多工业先进国家在水声学（包括基本研究和应用设备）方面投入的科研力量和经费都是相当惊人的。在最近廿年间，水声学无论在理论方面还是在声呐技术及设备方面，都有了迅速的发展，声呐的探测距离已达到几百海里以上。显然，要达到这样远的探测距离，只有最大限度地利用水声传播理论、水声信号检测理论和信号处理技术的最新成就才有可能。

近年来，信号检测和参数估计理论发展很快，已成功地应用于雷达、声呐和通讯等各个领域。水声信号检测与参数估计理论是从经典的信号检测与参数估计理论引伸出来的。在声呐信号处理方面，声场的最佳时空外理理论的建立和发展，对声呐信号处理技术起了很大的推动作用。数字多波束、正交相关、自适应波束形成以及被动测距等新技术的应用，改善了声呐在复杂干扰背景中的检测能力，提高了参量测量精度。从六十年代初期以来，国内外在这方面虽然作了大量工作，但还没有一本系统的专著，大多数资料都只散见于杂志、会议录和各种内部报告，其中还有相当部分与保密相联系，查阅诸多不便。在六十年代，美国虽曾

出版过 Horton 著的《水声信号处理》，但该书涉及面较广，内容也不免失于简略；而且从那时到现在又有了许多新的成果。因此，本书的出版，正是填补了这方面的一个空白。

本书以声场的最佳时空处理理论为重点，较全面系统地介绍了被动声呐的检测和参数估计理论，着重讨论了下列四个方面：什么是最佳系统？如何实现最佳系统？现用常规系统与最佳系统在性能上有什么差距？应该如何改进？这些问题的探讨，无论对于声呐设计师或水声物理学家都是有益的。

本书概念清楚，有条有理，而且比较注意数学的严谨性与物理意义的阐明，内容前后呼应，大体自成体系，重要结论一般都次第推证到底，书末附录中介绍了基础知识。本书可作为大学教学参考书、研究生教材，或供水声设备科研、设计人员参考使用，对于初学者，本书可在信号检测和参数估计的基本理论和现代声呐信号处理科研论文之间起一个桥梁作用。

在四化建设中，海洋开发和保卫海防都要求积极地和卓有成效地发展水声事业。我相信，本书的出版，包括今后这类专著的相继问世，将对我国水声事业的发展作出令人鼓舞的贡献。

汪 德 昭

1981年4月于北京

目 录

绪论	1
----------	---

第一部分 被动声呐检测理论

第一章 单路输入的最佳接收系统理论	7
-------------------------	---

1.1 单路输入的最佳接收系统	7
-----------------------	---

1.1.1 判决规则	7
------------------	---

1.1.2 检测概率、虚警概率和最佳准则	11
----------------------------	----

1.1.3 奈曼-皮尔逊准则下的最佳接收系统——似然比接收系统	14
---------------------------------------	----

1.2 在高斯噪声中检测高斯信号的最佳接收系统	17
-------------------------------	----

1.2.1 在高斯条件下最佳接收系统的结构	17
-----------------------------	----

1.2.2 最佳系统物理意义的讨论	21
-------------------------	----

1.3 接收系统的工作特性 (ROC 曲线)	25
------------------------------	----

1.3.1 引言	25
----------------	----

1.3.2 末级为积分器的接收系统输出检验统计量 $z(f)$ 的概率分布	27
---	----

1.3.3 接收系统的工作特性 (ROC 曲线)	31
--------------------------------	----

1.3.4 关于输出信噪比定义的注记	38
--------------------------	----

第二章 若干实用被动声呐接收系统的输出信噪比计算	40
--------------------------------	----

2.1 引言	40
--------------	----

2.2 积分器的输出信噪比	46
---------------------	----

2.2.1 积分器输出信噪比的计算	46
-------------------------	----

2.2.2 积分器等效积分时间 T 的意义	49
-------------------------------	----

2.2.3 积分器输入噪声过程等效谱宽 W_y 的意义	51
-------------------------------------	----

2.2.4 公式 (2.10) 的意义	52
---------------------------	----

2.3	非线性电路的输出信噪比和输出噪声	
	等效谱宽 W_y	53
2.3.1	线性阵后的平方检波器	54
2.3.2	线性阵后的线性检波器	56
2.3.3	线性阵后的模拟相乘器	58
2.3.4	线性阵后的极性相乘器	59
2.3.5	线性阵后的混合相乘器	62
2.3.6	限幅阵后的平方检波器	64
2.3.7	限幅阵后的线性检波器	65
2.4	基阵加预选滤波器的输出信噪比	66
2.4.1	线性阵加预选滤波器的输出信噪比	66
2.4.2	限幅阵的输出信噪比	68
2.5	最佳预选滤波器 $H(\omega)$ 作用的讨论	69
2.6	抽样工作方式和限幅抽样损失	73
2.6.1	抽样工作方式及其分析方法	73
2.6.2	抽样工作系统的输出信噪比表达式	75
2.6.3	限幅抽样损失及实例	78
2.7	小结与比较	83
第三章	基阵增益及最佳化	87
3.1	空间处理器的结构和基阵增益	88
3.2	单频平面波信号场与单频噪声场的归一化 协方差阵	91
3.2.1	水听器阵输出单频平面波信号的归一化协方差阵 P	91
3.2.2	水听器阵输出单频噪声的归一化协方差阵 Q	92
3.3	在基阵增益最大准则下的最佳空间处理器	94
3.4	在任意噪声场情况下, 最佳空间处理器作用 机理的讨论	99
3.4.1	最佳空间处理器的作用机理	99
3.4.2	最佳空间处理器作用机理的另一种解释	108
3.4.3	注记	110
3.5	常规阵的基阵增益及最佳化	112

3.6	基阵指向性图及其与基阵增益的关系	117
3.6.1	基阵指向性图的各种定义	117
3.6.2	基阵增益和指向性图的关系	122
3.7	在各向同性噪声场中, 最佳阵与标准阵的单频阵增益计算与性能比较	128
第四章	多元阵最佳接收系统 (时空统一处理)	133
4.1	引言	133
4.2	在高斯噪声中检测高斯信号的多元阵似然比接收系统 (平面波信号场情况)	141
4.2.1	多元阵似然比接收系统——形式 1: 滤波平方系统	145
4.2.2	形式 2: 估计相关系统	148
4.2.3	对信号进行预匹配处理的多元阵似然比接收系统	151
4.3	在高斯噪声中检测高斯信号的多元阵似然比接收系统 (一般信号场情况)	157
4.3.1	形式 1: 滤波平方系统	157
4.3.2	形式 2: 估计相关系统	161
4.4	波形估计	163
4.4.1	信号波形的最小均方误差 (MMSE) 估计	163
4.4.2	信号波形的无失真最小噪声估计	170
4.4.3	多元阵似然比检测与波形估计的关系	173
4.4.4	非随机未知信号波形的最大似然 (ML) 估计	176
4.5	在高斯噪声中检测非随机未知信号的多元阵广义似然比接收系统	180
4.6	小结	187
第五章	多元阵最佳系统与常规系统的性能计算及常规系统的最佳化	191
5.1	引言	191
5.2	多元阵最佳系统和常规系统的性能计算公式	194
5.2.1	多元阵最佳系统的输出信噪比 d_0^2	194
5.2.2	多元阵常规系统的输出信噪比 d_c^2	260

5.2.3	计算多元阵接收系统输出信噪比所必需掌握的 已知条件	203
5.3	在各向同性噪声场中, 最佳检测系统与标准检测 系统的性能计算与比较 (M 元线阵)	208
5.3.1	最佳检测系统的输出信噪比 d_0^2	209
5.3.2	标准检测系统的输出信噪比 d_s^2	210
5.3.3	最佳检测系统与标准检测系统的性能比较	212
5.4	常规阵被动声呐预选滤波器的最佳化	214
5.4.1	推导和例子	214
5.4.2	常规阵被动声呐最佳预选滤波器的工程实现	219
5.5	存在平面波干扰时, 最佳检测系统与标准检测 系统的性能计算与比较 (M 元线阵)	221
5.5.1	最佳检测系统输出信噪比 d_0^2 的计算	223
5.5.2	标准检测系统输出信噪比 d_s^2 的计算	228
5.5.3	最佳检测系统与标准检测系统的性能比较	230
5.6	存在平面波干扰时, 最佳检测系统的结构及用常 规阵近似实现最佳阵	234
第六章	被动声呐自适应波束形成器	245
6.1	概述	245
6.2	LMS 自适应波束形成器的一般结构	255
6.3	LMS 自适应线性相加器的性能分析	264
6.3.1	采用最速下降算法的自适应线性相加器的性能分析	266
6.3.2	LMS 自适应线性相加器的性能分析	272
6.3.3	LMS 自适应线性相加器的实例	285
6.4	在被动声呐应用中, 期待响应的获得方式—— 约束 LMS 自适应滤波器	289
6.4.1	期待响应 $d(t)$ 取为零的约束 LMS 多通路自 适应滤波器	290
6.4.2	期待响应 $d(f)$ 取为输入过程的约束或无约束 LMS 多通路自适应滤波器(自适应噪声抵消器)	295
6.4.3	小结——分类表	302

6.5	LMS 自适应波束形成器的次最佳实现	302
6.5.1	次最佳自适应波束形成器性能计算实例	303
6.5.2	$K = 1$ 的无约束 LMS 自适应噪声抵消器的性能分析	305
6.6	维纳滤波器的物理实现性问题	316
6.7	注记	321

第二部分 被动声呐参数估计理论

第七章	参数估计理论	325
7.1	被动声呐参数估计模型	325
7.2	参数估计的性能指标	330
7.3	参数的无偏估计的 CR 下限和 CR 矩阵下限	333
7.3.1	单一参数的无偏估计的 CR 下限	334
7.3.2	多个参数联合无偏估计的 CR 矩阵下限	335
7.3.3	关于估计方差下限的小结和讨论	339
7.4	通过对参数函数的估计构成对参数本身的估计	343
7.4.1	问题的提出	343
7.4.2	单一参数 A 的函数 $\tau(A)$ 的估计	345
7.4.3	多个参数 A 的一组函数 $\tau(A)$ 的估计	348
7.5	估计的获得——最大似然估计	355
7.6	小结	365
第八章	被动声呐测向系统	368
8.1	二元阵最大似然测向系统	368
8.1.1	二元阵最大似然测向系统的各种等效结构	368
8.1.2	二元阵最大似然测向系统的性能	375
8.2	M 元线阵最大似然测向系统	382
8.2.1	M 元线阵最大似然测向系统的各种等效结构	382
8.2.2	M 元线阵最大似然测向系统的性能	389
8.2.3	等效二元阵和布阵问题	392
8.3	M 元线阵最大似然测向系统的次最佳实现	395
8.3.1	M 元线阵分裂波束微分相关系统	395
8.3.2	M 元线阵比幅单脉冲测向系统	407

8.3.3	M 元线阵比相单脉冲测向系统	411
8.3.4	其他方面的次最佳实现	414
8.4	测向系统的一种常用显示方式的分析	415
8.5	测向模糊问题	419
第九章	被动声呐联合测向测距系统	430
9.1	已知目标方位条件下的 M 元线阵最大似然 测距系统	430
9.1.1	结构	430
9.1.2	性能	432
9.1.3	等效三元均匀线阵和布阵问题	433
9.2	M 元线阵方位与距离联合有效估计系统	438
9.2.1	结构	438
9.2.2	性能	441
9.2.3	等效结构、定位不确定椭圆和最佳布阵问题	445
9.3	可独立调节时延的 M 元线阵方位与距离联合有效 估计系统	450
9.3.1	Gauss-Markov 估计	451
9.3.2	$\hat{\tau} = H\hat{\tau}_e$ 的联合有效性质	454
9.3.3	可独立调节时延的 M 元线阵方位与距离联合 有效估计系统的结构	461
9.4	可独立调节时延的 M 元线阵定位系统的 次最佳实现	462
9.4.1	三子阵次最佳定位系统的结构	466
9.4.2	三子阵次最佳定位系统的测向与测距精度	471
9.4.3	三子阵次最佳定位系统(方法2)与三子阵纯几何 定位系统(方法3)的比较	475
9.5	任意 M 元平面阵定位系统	477
9.5.1	几何参数向量 A 的Fisher信息阵	479
9.5.2	距离方差CR下界的计算	481
9.5.3	方位方差CR下界的计算	485
9.5.4	联合测向与测距系统的性能计算	488

第十章 功率谱估计及其在线谱检测与跟踪中的应用	491
10.1 概述	491
10.2 谱估计的傅里叶方法	497
10.2.1 模拟工作方式的滤波器组法	499
10.2.2 修正周期图的统计性质	505
10.2.3 分段周期图平均法	512
10.2.4 平滑周期图法	516
10.2.5 傅里叶谱估计法在被动声呐中的应用简评	522
10.3 谱估计的时间序列参数模型方法	528
10.3.1 时间序列的参数模型与谱估计问题	528
10.3.2 AR(自回归) 谱估计的获得	536
10.3.3 自适应线谱增强器 (ALE) 的稳态性能分析	543
10.3.4 自适应线谱增强器 (ALE) 的瞬态性能分析	554
10.4 线谱检测	560
10.4.1 在高斯噪声中检测线谱的多元阵广义似然比系统	560
10.4.2 周期图谱估计器的线谱检测性能	567
10.4.3 分段周期图平均谱估计器的线谱检测性能	571
10.4.4 ALE 权向量周期图谱估计器的线谱检测性能	573
10.4.5 ALE 输出周期图平均谱估计器的线谱检测性能	577
10.4.6 四种谱估计器的线谱检测性能比较	582
10.5 线谱跟踪	584
10.5.1 线谱频率的测量精度	585
10.5.2 线谱分辨力	589
10.5.3 ZOOM FFT	595
10.5.4 ALE 对白噪声中线性调频信号的跟踪能力	601
附录 A 信号分析、随机过程与矩阵的有关预备知识	616
A.1 限时限带函数的傅里叶展开与周期函数的帕塞瓦公式	616
A.2 随机过程及其傅里叶级数展开	619
A.2.1 随机过程的数字特征及其性质	619
A.2.2 单个零均值实值随机过程的傅里叶级数展开及 傅里叶系数的相关性	621

A.2.3	多个零均值实值随机过程的傅里叶系数 之间的相关性	624
A.3	矩阵 (主要是赫米特阵) 的若干性质	626
A.3.1	定义与符号	626
A.3.2	赫米特阵的性质	628
A.3.3	矩阵的数学期望	638
A.3.4	一个有用的矩阵求逆公式	639
附录B	高斯过程的若干性质	641
B.1	定义和性质	641
B.2	单个零均值实值高斯过程的傅里叶系数的复高斯密度 函数	643
B.3	多个零均值实值高斯过程的傅里叶系数的复高斯密度 函数	645
B.4	高斯过程通过非线性电路	651
B.4.1	普莱斯定理	652
B.4.2	高斯过程通过理想限幅器	655
B.4.3	高斯过程通过全波线性检波器	657
B.4.4	高斯过程通过平方检波器	659
B.4.5	高斯过程通过模拟相乘器	659
B.4.6	高斯过程通过混合相乘器	660
B.4.7	高斯过程通过极性相乘器	662
附录C	被动声呐信号与背景噪声的时空统计特性	665
C.1	深海自然噪声场的远场模型	666
C.2	噪声场时空相关函数计算方法总述	667
C.3	典型噪声场双边谱单频时空相关系数的计算	673
C.3.1	各向同性噪声场	675
C.3.2	均匀分布海面噪声场	675
C.3.3	科克斯模型	678
C.4	典型噪声场时空相关系数的计算	680
C.4.1	单边谱单频	680
C.4.2	限带白谱	682
C.4.3	限带 $1/ \omega ^{\nu}$ 谱	684
C.5	平面波信号场时空相关系数的计算	685
附录D	时间序列的傅里叶变换 (FT) 和离散傅里叶 变换 (DFT)	689

绪 论

被动声纳的工作过程涉及到许多复杂因素。研究被动声纳首先要建立一个合适的数学模型，以便排除各种次要因素，把理论纳入适当的数学工具所能处理的范围之内。

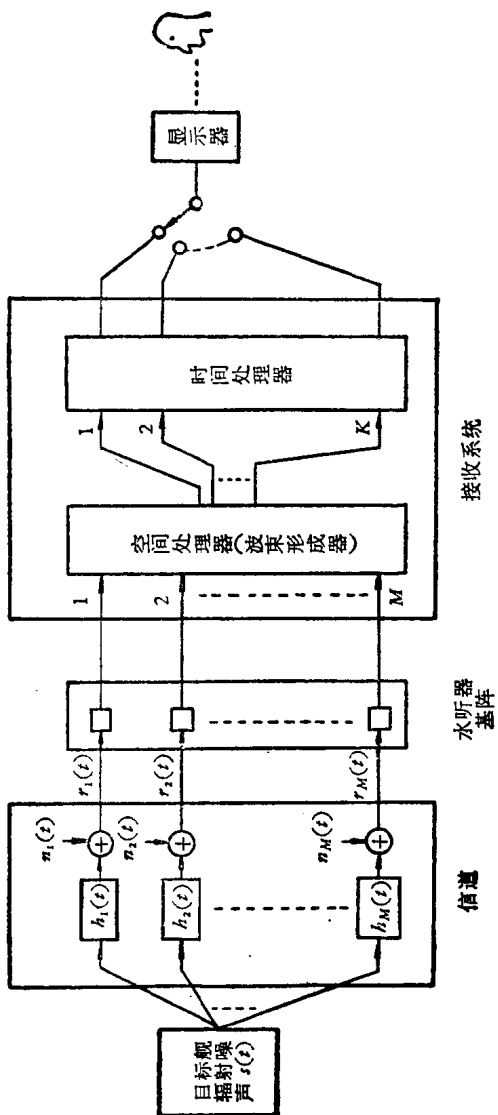
我们采用下面的方块图表示被动声纳模型。图中目标舰辐射噪声 $s(t)$ 是被动声纳要检测的信号，它经过海水媒质传播，到达由 M 个水听器所组成的基阵。从信号源到基阵的媒质空间称为信道。在实际情况下，信号传到某一个水听器时通常是经过多个途径而不只是一个途径，而且每条途径上传播媒质的性质是随机地时变的。为了简化讨论，我们将假定不存在多径传播效应，并可用时不变滤波器 $h_i(t)$ 描述从信号源到第 i 水听器的信道的作用。第 i 水听器表面附近海水的声压 $r_i(t)$ 不仅由信号 $s(t)$ 所造成，而且包含海洋自然噪声和本舰以及其它非目标舰的辐射噪声。这些噪声再加上接收系统各级噪声源折算到水听器输入端的等效自噪声，就构成了掩盖信号的背景干扰，今后统称为噪声，用 $n_i(t)$ 表示。水听器将声压变化转换为电压变化。被动声纳接收系统对水听器基阵输出的 M 个波形加以处理，以完成下列三项任务：

(1) 判断这些波形中是否含有信号成分，从而发现目标的存在。这一任务称为目标的检测。

(2) 在发现目标的基础上，对目标参数诸如方位、距离、速度、谱级、谱宽和中心频率等参数中的一个或几个进行估计。这一任务称为目标的参数估计。

(3) 识别目标的类型。

本书只限于讨论检测和参数估计问题。不言而喻，我们希望



被动声呐模型图

发现目标的距离要尽可能地远，而参数估计的精度则愈高愈好。但是，远处传来的信号相对于干扰噪声总是很微弱的，因此，我们必须充分利用信号和噪声的各种差异点，才有可能从强大的噪声背景中区分出信号，以解决远和准的问题。信号与噪声的差异有两类。其中一类是空间上的，即信号通常是从远距离某一方向传来的平面波，而背景噪声则是从四面八方来的（其中也可能包括若干个平面波干扰），因此，只要使水听器基阵在信号方向上形成尖锐的波束，就可以有效地抑制其它方向的噪声，显著地提高信噪比。利用空间差异提高被动声呐的性能，叫做空间处理。另一类是时间上的，即单纯噪声的时间波形和信号加噪声的时间波形在统计特性上存在着差异。利用时间域内的差异改善被动声呐的性能，叫做时间处理。被动声呐接收系统一般包含空间处理器和时间处理器两个部分，而且目前大多利用多波束工作体制，即同时形成 K 个窄波束，覆盖着一个观察扇面，各波束经过时间处理后被送到显示器。操作员根据显示器上的图象判断各波束内有无目标，并测定各种目标参数。因为各波束的形成和处理方法都是相同的，所以就原理探讨而言，我们今后将只考虑单波束（ $K = 1$ ）的情况。

上面叙述了被动声呐模型。我们的目的是研究在所用模型下接收系统怎样才能“最佳”地完成检测和参数估计的任务。通常，一个系统若在指定约束条件下比起在相同约束条件下的其他任何系统按某一性能准则衡量是最好的，那末该系统就称为在该约束条件和该准则下是最佳的。根据被动声呐的实际工作情况，在检测问题中我们将主要采用最大信噪比准则（要求系统的输出信噪比比任何其他系统的都大）和奈曼-皮尔逊准则（在给定的虚警概率下具有最大的检测概率）；在估计问题中，将采用最小均方误差准则、最大似然准则等。至于约束条件，这里主要是指对被动声呐结构和对信号及噪声统计特性的事先的规定，同时也包括对信道、基阵和一切有关工作条件的规定。本书所采用的有关结构、信道

和基阵方面的最一般规定，如被动声呐模型图所示。以后将根据各章讨论的问题，再附加规定其他必要的工作条件。

最佳理论要解决两个问题，导出最佳系统的结构和计算最佳系统的性能。在通常情况下，最佳系统的结构是难于实现的，同时从最佳准则未能包括的一些要求，例如从对环境参数的敏感性、价格、易维护性等方面来考虑问题，最佳系统常常有这样或那样的缺点。因此，我们还必须讨论那些按给定准则来讲是非最佳或次最佳的实用系统。从实用上说，最佳接收系统的主要作用是给出在指定约束条件和准则下系统性能的上界，以作为其他系统的比较标准。一切实用系统的性能经过计算后，再与最佳系统的性能进行比较，就可以看出尚有多大的改善潜力；如果性能相差不远，我们一般宁愿采用较简单的次最佳系统，而不采用复杂的最佳系统。最佳系统的另一个作用是，它的结构常能启发我们用较简单的设备或自适应系统去近似地实现它。当然，近似程度如何，也要通过性能计算加以判断。

在理论发展中，还存在这样一类问题：某些较简单的常规系统的性能固然不如最佳系统，但是否能在保留其较简单的基本结构前提下适当选择系统的参数（例如预选滤波器的传输函数，基阵的幅度加权因子等等），使它的性能比普通常规系统尽可能地有所提高，从而较接近于最佳系统呢？这类问题叫常规系统的最佳化。

本书第一部分为被动声呐检测理论。第一章讨论单路输入的最佳接收系统理论，包括最佳接收系统的基本概念，如判决规则、最佳准则、最佳结构导出方法和系统性能计算的原则步骤，因而是以后各章的基础。第二章在各水听器噪声彼此独立的简化条件下，对多元阵的最佳系统和若干常用次最佳系统的性能进行计算和比较，重点放在时间处理器上。由于这一简化条件在许多实际场合大体成立，所以本章的结果具有实用价值。第三章至第六章讨论一般条件下的基阵检测理论。第三章在最大信噪比准则下导