

“十二五”国家重点图书出版规划项目
现代声学科学与技术丛书

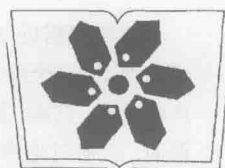
主动声呐检测信息原理

下册：主动声呐信道特性和系统优化原理

朱 埜 著



科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版

“十二五”国家重点图书出版规划项目

现代声学科学与技术丛书

主动声呐检测信息原理

下册：主动声呐信道特性和系统优化原理

朱 堃 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书根据近 50 年来国内外关于主动声呐的检测理论和技术,从信息和通信观点上,全面、系统地讨论主动声呐检测的信息原理和方法,并着重讨论声呐波形、信道、接收机以及它们之间的适配问题。全书共分十一章,分上下两册,上册讨论声呐波形时变信号和信道以及声呐匹配滤波器的基本知识,下册具体讨论主动声呐信道(包括水下声传输、目标散射和海洋混响)的基本信道特征以及声呐信号、信道和接收机三者最佳适配的基本原理。

本书内容全面,观点新颖,适合从事水声物理和水声工程设计等研究人员阅读,也可供大专院校有关专业的教师和研究生参考。此外,对从事雷达、通信,以及诸如医疗超声、海洋开发和地质勘探等领域的研究设计人员也有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

主动声呐检测信息原理. 下册, 主动声呐信道特性和系统优化原理/朱堃著. —北京: 科学出版社, 2014.12

(现代声学科学与技术丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-042572-0

I. ①主… II. ①朱… III. ①主动声呐-研究 IV. ①U666.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 273802 号

责任编辑: 刘凤娟/责任校对: 韩 杨

责任印制: 赵德静/封面设计: 王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 12 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2014 年 12 月第一次印刷 印张: 21 3/4

字数: 412 000

定价: 118.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



“现代声学科学与技术丛书”编委会

主 编：田 静

执行主编：程建春

编 委：（按姓氏汉语拼音排序）

陈伟中	邓明晰	侯朝焕	李晓东
林书玉	刘晓峻	马远良	钱梦騄
邱小军	孙 超	王小民	王威琪
谢菠荪	杨德森	杨 军	杨士莪
张海澜	张仁和	张守著	

作者简介



朱楚，中国科学院声学研究所研究员，1937年3月1日生于江苏省靖江县，1958年10月毕业于南京大学物理系。50多年来一直从事主动声呐设计与应用研究，先后参加或组织水声岸用综合设备、声线仪、脉冲压缩声呐、水声信号综合分析仪等设备的设计和研制，1971年开始主动声呐信号、声呐信道和匹配滤波检测方面的信号处理理论和实验研究，1984年后着重复杂声呐波形设计、近场水下目标声散射特性以及声呐接收机最佳适配等工作。

序

这是一本在国防领域水声学中,关于主动声呐检测方面的专著。

50年代,从雷达中发展起来的匹配滤波检测理论和脉冲压缩技术,由于时间压缩相关技术的出现,在声呐的理论和实践中很快得到推广和应用。新技术的出现,特别是微电子计算机和信号处理技术的发展,又促使主动声呐检测进入信息科学技术的新时代。

虽然雷达检测理论已日趋完善,其中很多原理和技术都可以移植到主动声呐中,但是,由于使用环境和载波的不同,声呐同雷达的信息检测和处理,在原理和技术上都存在着本质的差别。在主动声呐中,获得目标信息的最佳检测效果,不但与所采用的声呐波形和接收处理方法有关,而且因声呐使用环境或信道的不同而有很大的差异。正如本书重点之一,第十章“最佳接收机”中所指出的,这不仅要求从事声呐技术研究和设计乃至操作人员,必须对声呐使用环境和所要检测的目标特性(书中统称为声呐信道)有基本的了解,以便设计或选择与其相匹配的最佳声呐波形和接收机形式,而且也要求从事为声呐服务的水声物理研究工作者,不能只限于从能量关系上来研究水声现象。

近二十年来,国内外水声和声呐研究设计人员就这些问题,开展了广泛的研究,并取得了很大进展,可以查考的相应文献或内部资料,也有相当的数量,但却十分零散。据我所知,至今国内外还没有一本就这个问题进行系统讨论的专著。霍顿的《水声信号处理》,只着重于检测理论和信号处理的基本原理阐述,没有就声呐的全过程、特别是声呐信道问题作全面深入的讨论。乌立克的《水声工程原理》虽然讨论了声呐的全过程,但也只是着重于以声呐方程为基础研究能量关系,而有关声呐过程中的信息关系,讨论是不多的,当然,这两本书有许多优点,深受我国水声科学界的欢迎。

随着我国国防水声科学技术的发展,以及海防的实践需要,关于主动声呐检测理论和技术的問題,已日见其重要,本书就是受这种情势的促进而问世的。本书作者从事主动声呐的理论和实验研究已近三十年,这本专著就是作者在自己长期研究成果的基础上,根据二十多年来国内外关于主动声呐检测理论和技术的最新成就撰写而成。作者从信息论和通信理论观点出发,全面地、系统地讨论了主动声呐全过程,着重讨论了主动声呐三要素:声呐波形、声呐信道和声呐接收机,以及它们之间的互相匹配。就涉及的内容深度和广度而言,迄今还未见国内外有关类似的专著。

本书观点明确,取材丰富,内容全面,在编排上由浅入深,既重视基本概念的阐

述, 避免过多的数学推导, 又充分体现了国内外有关主动声呐检测的最新理论和技术, 同时也在一定程度上反映了我国主动声呐研究和发展的水平。本书不但适用于从事主动声呐研究、设计乃至操作使用人员阅读, 也适用于广大从事水声学科研究和有关大专院校教师和研究生参考; 对从事海洋开发、地质勘探、雷达和通信领域的研究设计人员, 也有一定的参考价值。

本书主要从时域上讨论主动声呐检测的信息过程, 有关噪声中的检测、空间布阵原理、参量估计和信号处理以及水声学专题, 在已出版的《水声学》《水声信号被动检测与参数估计理论》和《声呐信号处理——原理与设备》三本专著中已有系统深入的讨论。相信这四本专著的出版, 对我国水声事业的发展, 将起到很好的促进作用。

汪德昭

1990年5月

前 言

20 世纪 60 年代初,中国科学院声学研究所时任所长、学部委员汪德昭教授授意下,由侯自强同志倡导在新一代主动声呐设计中引入脉冲压缩技术,但随后经课题组多年海上实验发现,其效果远不是设计者所想象的那样,进一步理论和实验分析证明,声呐中引用脉冲压缩技术,要获得最佳检测效果,必须全盘考虑声呐信号、声呐环境和声呐接收机三者之间的互相适配,也就是说,必须根据给定的声呐环境和要求,选择或自适应选择声呐波形和接收机,这也是作者在汪德昭院士鼓励和指导下,撰写本书的宗旨。本书原版由汪院士作序,并于 1990 年 10 月由海洋出版社出版,至今已二十多年了。

在过去的二十多年中,主动声呐一方面随着冷战的结束,面对的是由远海到近海的战略转移以及高速隐身潜艇目标的远程探测使命,另一方面也随着现代化高科技的发展,尤其是几乎无处不有的网络信息和信号处理技术的发展,声呐也开始由数字声呐时代进入智能网络声呐时代,在技术上广泛认定低频、宽带、大功率和长基阵新型声呐的必要性,以此为基础构成的多基地网络声呐系统研究也成为近代主动反潜声呐发展的主要方向。此外,随着信号处理对浅海声学和海洋工程的渗入,水声学三大分支即水声物理、水声工程和水声信号处理的不断融合,声呐工程学也成为跨行业的学科。

尽管如此,声呐信号、声呐信道和声呐接收机的相互适配仍然是主动声呐设计者和使用者所面临的关键问题,尤其对浅海环境。实际上,为了提高主动声呐检测和跟踪性能,对环境的监测和评估已经成为近代声呐设计必须考虑的前提。

本书新版除了对原版印刷或某些观念错误作必要修改、某些章节重新调整以及某些插图更新(软件编绘)外,还增加了几部分与主动声呐信息检测有关的高新技术原理章节,其中包括:

- (1) 声呐信号和目标回波高分辨时频特性分析和小波变换原理;
- (2) 适用于宽带高分辨检测的浅海海底混响 K 分布特性;
- (3) 新型复合声呐波形对混响中低速目标检测和跟踪的多普勒分辨性能;
- (4) 浅海传输信道相干性和波导不变性;
- (5) 基于物理模型的时空信号处理——匹配场和时间反转镜的基本原理;
- (6) 用于网路声呐的波形分集、MIMO 或多基地声呐系统的基本工作原理。

所增章节只是简单介绍,具体分析可见书后给出的对应参考文献。

由于本书涉及内容较多,因此新版分为两册出版,上册讨论声呐波形、时变信

号和信道以及通用接收机的基础知识,下册具体讨论主动声呐信道(即水声传输,目标散射和海洋混响)的基本信息特征以及声呐信号、信道和接收机最佳适配的基本原理和方法。

这里要补充说明的是,原版在撰写过程中,除参阅大量公开文献外,初稿曾与作者所在课题组成员陈庚、徐俊华等共同讨论,很多资料取自课题组(声学研究所原 708 或 208 组)的研究成果报告,因此包含了课题发起人侯自强和团队所有成员——单荣华、魏学环、孙增、刘莉蕾、李云言、宗杰琨、王质、周桂琴、周庆铭、陈培根、范树江、孙福安、宋文敏和李敏哲等同志对系统研制、海上实验和数据分析等方面的合作和奉献。同样,再版的一些内容亦多取自作者所在研究组的国家或国防研究基金报告,当然包含了研究组成员倪伯林、王荣庆、杨明亮、籍顺心、王磊、李坚、龚素英等在软件编制和实验分析等方面的辛勤工作。

要特别指出,声学研究所关定华(已故)、侯朝焕、黄曾阳、向大威、高天赋等研究员对原版书出版的大力支持,声学研究所现任领导以及第 12 研究室主任孙长瑜研究员等对本书再版的热情鼓励和支持,作者在此深表谢意。

此外海军电子工程学院郑兆宁教授(已故)对原书稿的认真审阅,海洋出版社专著编辑部陈泽卿等同志对原著的认真编辑,中国科学院科学出版基金及其办公室卢秀娟女士和科学出版社刘凤娟编辑等对本书再版的热情支持和认真排校,在此一并感谢。

由于本书内容繁杂,观点难免不一,加之作者水平有限,疏漏与不妥之处,敬请批评指正。

作者仅以本书新版的成功出版作为对导师、我国水声界先驱汪德昭院士逝世 15 周年的纪念,同时也是对中国科学院声学研究所成立 50 周年的祝贺。

朱 堃

2014 年 3 月

《现代声学科学与技术丛书》已出版书目

(按出版时间排序)

- | | | |
|---------------------------------------|--|---------|
| 1. 创新与和谐——中国声学进展 | 程建春、田静等 编 | 2008.08 |
| 2. 通信声学 | J.布劳尔特等 编 李昌立等 译 | 2009.04 |
| 3. 非线性声学(第二版) | 钱祖文 著 | 2009.08 |
| 4. 生物医学超声学 | 万明习等 编 | 2010.05 |
| 5. 城市声环境论 | 康健 著 戴根华 译 | 2011.01 |
| 6. 汉语语音合成——原理和技术 | 吕士楠、初敏、许洁萍、贺琳 著 | 2012.01 |
| 7. 声表面波材料与器件 | 潘峰等 编著 | 2012.05 |
| 8. 声学原理 | 程建春 著 | 2012.05 |
| 9. 声呐信号处理引论 | 李启虎 著 | 2012.06 |
| 10. 颗粒介质中的声传播及其应用 | 钱祖文 著 | 2013.06 |
| 11. 水声学(第二版) | 汪德昭、尚尔昌 著 | 2013.06 |
| 12. 空间听觉
——人类声定位的心理物理学 | J. 布劳尔特 著
戴根华、项宁 译 李晓东 校 | 2013.06 |
| 13. 工程噪声控制
——理论和实践(第4版) | D. A. 比斯、C. H. 汉森 著
邱小军、于淼、刘嘉俊 译校 | 2013.10 |
| 14. 水下矢量声场理论与应用 | 杨德森等 著 | 2013.10 |
| 15. 声学测量与方法 | 吴胜举、张明铎 编著 | 2014.01 |
| 16. 医学超声基础 | 章东、郭霞生、马青玉、屠娟 编著 | 2014.03 |
| 17. 铁路噪声与振动
——机理、模型和控制方法 | David Thompson 著
中国铁道科学研究院节能
环保劳卫研究所 译 | 2014.05 |
| 18. 环境声的听觉感知与自动识别 | 陈克安 著 | 2014.06 |
| 19. 磁声成像技术
上册: 超声检测式磁声成像 | 刘国强 著 | 2014.06 |
| 20. 声空化物理 | 陈伟中 著 | 2014.08 |
| 21. 主动声呐检测信息原理
上册: 主动声呐信号和系统分析基础 | 朱 埜 著 | 2014.12 |
| 22. 主动声呐检测信息原理
下册: 主动声呐信道特性和系统优化原理 | 朱 埜 著 | 2014.12 |

目 录

下册 主动声呐信道特性和系统优化原理

第七章 海洋中的声传输信道	331
7.1 声波传播的基本模型	331
7.1.1 主动声呐的波动方程	331
7.1.2 求解波动方程的几种近似模型	333
7.2 声传播的波导效应	336
7.3 声传播的多途效应	339
7.3.1 深海近表面声源-接收器情况	339
7.3.2 深海深水源-接收器情况	341
7.3.3 浅海多途	342
7.4 声传播的起伏效应	343
7.4.1 起伏声场的传统描述法	344
7.4.2 海面波浪的影响	345
7.4.3 湍流和非均匀水团的影响	346
7.4.4 内波的影响	348
7.4.5 其他因素的影响	349
7.5 声信道的线性源-场关系	350
7.5.1 源及其系统函数	350
7.5.2 源场关系	352
7.5.3 水下声信号传输过程的系统函数	355
7.6 声信道的随机散射模型	357
7.6.1 海洋声传输过程的散射滤波器模型	357
7.6.2 海洋声信道的传递函数	358
7.6.3 信道的随机成分的影响	359
7.7 声信道的衰落和模糊	360
7.7.1 两类衰落和模糊	361
7.7.2 信道的分类	361
7.7.3 传输信道的空间衰落和模糊效应	365
7.8 声信道的时空相干函数和散射函数	366

7.8.1	起伏单途信道相干函数	367
7.8.2	时空小起伏多途信道相干函数	368
7.8.3	时空快起伏传输信道相干函数	370
7.8.4	传输信道的散射函数有效性	371
7.9	浅海波导的相干性	372
7.9.1	浅海波导特性	373
7.9.2	波导不变性	374
7.10	声信道的二阶统计特性测量	377
7.10.1	相干函数和散射函数的测量实例	377
7.10.2	频率相干函数的测量	378
7.10.3	空间相干函数测量	379
7.10.4	散射函数测量图例	381
第八章	声呐目标散射特性	383
8.1	目标线性散射原理	383
8.1.1	照明场	383
8.1.2	目标散射场	385
8.1.3	高速运动目标散射特性	389
8.2	目标散射的物理特征	391
8.2.1	刚性小球声散射	391
8.2.2	弹性小球的散射	392
8.2.3	有限柱体散射	393
8.2.4	任意形状的目标散射	394
8.2.5	潜艇目标的反射	396
8.3	目标回波的基本信息提取	397
8.4	时变目标散射的分布亮点模型	402
8.4.1	时变目标回波的系统函数表示	402
8.4.2	目标分布亮点模型	403
8.4.3	近场目标情况	406
8.4.4	高速目标回波亮点	407
8.5	目标散射函数及其分类	408
8.5.1	目标散射信道的相干函数	408
8.5.2	目标散射函数	410
8.5.3	高速目标散射函数	411
8.5.4	目标按扩展特性分类	412
8.5.5	目标散射函数的有效性	415

8.6	时不变目标的几种特征分析方法	416
8.6.1	瞬时能谱特征	416
8.6.2	回波极点分布特征	417
8.6.3	瞬时频率和过零点间隔分布	418
8.6.4	延迟-频率能量分布	419
8.6.5	频域幂级数展开模型	419
8.7	起伏点目标强度统计模型	420
8.7.1	目标强度起伏的典型分布类型	420
8.7.2	斯威林起伏模型分类	422
8.8	目标回波的近似模型	423
8.8.1	目标回波状态变量模型	423
8.8.2	抽头延迟线模型	425
8.8.3	广义横向滤波器模型	426
8.9	目标回波时频分析	427
8.9.1	回波时频分布特性	427
8.9.2	回波 WVD 分析例	429
8.9.3	窄带 ZOOM 时频分析方法	430
8.9.4	RADON 变换的应用	432
8.10	目标回波相关输出分析	435
8.10.1	目标散射的相关分析	435
8.10.2	目标回波-回波相关分析	436
8.10.3	回波通过匹配滤波器的输出分析	438
8.10.4	宽带模糊度和小波变换分析方法	440
8.11	声呐波形对目标回波的影响	442
8.11.1	最大回波功率的信号	442
8.11.2	回波能量最大的信号	443
8.11.3	距离延伸不变波形	443
8.11.4	扩展目标对信号分辨的要求	444
第九章	海洋混响信道	447
9.1	混响的线性源-场关系	447
9.1.1	线性混响的源场关系	447
9.1.2	均匀介质空间固定点源散射情况	449
9.1.3	浅海波导的简正波混响模型	451
9.2	海洋混响的类别及特性	453
9.2.1	混响的分类	453

9.2.2	三类混响的散射几何模型	454
9.2.3	三类混响的平均强度	455
9.2.4	不同类型混响的物理特性	457
9.3	海洋混响的概率模型	458
9.3.1	混响统计模型的基本假设	458
9.3.2	散射体空间分布的泊松模型	459
9.3.3	元散射信号统计分布模型	461
9.3.4	混响过程的概率特性	462
9.4	混响信道的相干函数和散射函数	464
9.4.1	混响信道的传递函数	464
9.4.2	混响信道的时频相干函数	466
9.4.3	混响的广义平稳性	468
9.5	混响信号的概率分布特性	469
9.5.1	混响的瞬时均值和方差	469
9.5.2	混响瞬时值分布	470
9.6	混响包络和相位的统计特性	473
9.6.1	混响的正交分量及复数幅相形式	473
9.6.2	混响瞬时包络分布	474
9.6.3	混响强度分布	476
9.6.4	混响瞬时相位分布	477
9.7	混响的相关和匹配滤波分析	478
9.7.1	混响统计相关函数和功率谱	478
9.7.2	混响过程的时频分析	480
9.7.3	匹配滤波器输出混响统计特性	482
9.8	混响的空间相关性	485
9.8.1	一般原理	485
9.8.2	垂直空间相关	487
9.8.3	水平相关函数	488
9.8.4	实际海洋对混响空间相关的影响因素	490
9.9	基阵位移时的混响统计特性	491
9.10	混响的数值模拟	497
9.10.1	网格模型	497
9.10.2	自回归模型	500
第十章	主动声呐检测的最佳接收机	504
10.1	有关最佳检测的基本概念	504

10.2	声呐检测的基本假设	509
10.2.1	检测问题中的基本假设	509
10.2.2	回波和混响的相关函数形式	510
10.2.3	矢量表示形式	511
10.3	似然比接收机	514
10.4	输出信干比最大的接收机	520
10.5	平稳过程的频域最佳检测	525
10.5.1	连续形式频域最佳接收机	526
10.5.2	两个特例	527
10.5.3	运动点目标回波检测情况	529
10.6	低信干比下的最佳接收	531
10.7	可分离核信号的最佳接收	536
10.8	起伏点目标回波的匹配滤波器检测	541
10.8.1	目标回波扩展损失	541
10.8.2	稳定无畸变点目标回波	542
10.8.3	随机起伏点目标回波	544
10.8.4	慢起伏运动点目标回波	545
10.9	快衰落信号的分集接收	546
10.9.1	扩展回波信号的分集接收	546
10.9.2	分集增益和积分损失	549
10.9.3	混响中衰落回波的检测情况	550
10.10	实时最佳接收及卡尔曼滤波	551
10.10.1	实时估计滤波的最佳接收机	551
10.10.2	卡尔曼-布西滤波器接收机	554
10.11	信道匹配和自适应接收机	559
10.11.1	回波-回波相关法	560
10.11.2	信道匹配接收机	561
10.11.3	自适应信道匹配	563
10.11.4	自适应白化滤波	564
10.11.5	自适应检测	566
10.12	时空信号的最佳检测	566
10.12.1	谱矢量过程的最佳似然比检测	567
10.12.2	小信噪比下的最佳时空接收	568
10.12.3	估计谱矢量相关器和广义矢量匹配滤波器	570
10.12.4	通用矢量匹配滤波器的输出信干比损失	571

10.12.5	声场匹配-模基匹配滤波	572
10.12.6	时间反转处理器	573
第十一章 声呐最佳波形		575
11.1	波形参数选择	575
11.1.1	声呐最佳频率	575
11.1.2	波形长度 T 的选择	578
11.1.3	波形带宽的选择	579
11.2	波形对匹配滤波检测的影响	580
11.2.1	匹配滤波检测中波形优化原理	580
11.2.2	混响中目标检测特例	583
11.2.3	最佳波形设计的实际限制	585
11.2.4	常用波形对声呐检测的适应性	586
11.3	常用波形检测双扩展目标的性能分析	587
11.3.1	目标回波匹配滤波检测的扩展损失	588
11.3.2	常用波形匹配滤波检测的输出信噪比增益	591
11.3.3	匹配滤波检测输出信混比损失与波形的关系	592
11.3.4	LFM 回波的 RADON 变换检测方法	594
11.4	混响中动目标检测的波形选择	594
11.4.1	波形模糊度 Q 函数和动目标检测	595
11.4.2	常用脉冲压缩波形在动目标检测中的适用性	595
11.4.3	梳状谱重复信号在低速目标检测中的应用	597
11.5	最佳“波形-滤波器对”	599
11.5.1	给定接收机设计最佳波形	599
11.5.2	最佳“波形-滤波器对”的设计	601
11.5.3	中心对称散射函数条件下的“波形-滤波器对”	603
11.6	宽容匹配滤波及其最佳波形	603
11.6.1	宽容匹配滤波器原理	604
11.6.2	宽容匹配滤波器设计	606
11.7	最小均方模糊度函数综合	609
11.7.1	萨斯曼综合法	609
11.7.2	相位迭代法	612
11.7.3	给定模糊度结构的波形综合	614
11.7.4	时频 HOP 信号的自适应信道匹配选择	616
11.8	由自相关函数综合波形	616
11.8.1	波形自相关函数的综合	617

11.8.2 由已知能谱综合波形	619
11.9 动物声呐信号	622
11.9.1 广义亮点目标回波检测的最佳波形	623
11.9.2 动物声呐信号的实际设计	625
11.9.3 ANM 信号的广义横向匹配滤波	627
11.10 时空分集和混合处理	627
11.10.1 分集的基本概念	627
11.10.2 时频分隔信号	628
11.10.3 时频分段或分片匹配处理	631
11.10.4 空间分集和 MIMO 声呐	632
参考文献	634
索引	649
缩写对照表	653
中英译名词汇对照表	655

上册 主动声呐信号和系统分析基础

第一章 绪论
第二章 声呐波形分析基础
第三章 匹配滤波器
第四章 常用声呐波形
第五章 水声信号的分析方法
第六章 线性时变系统分析