

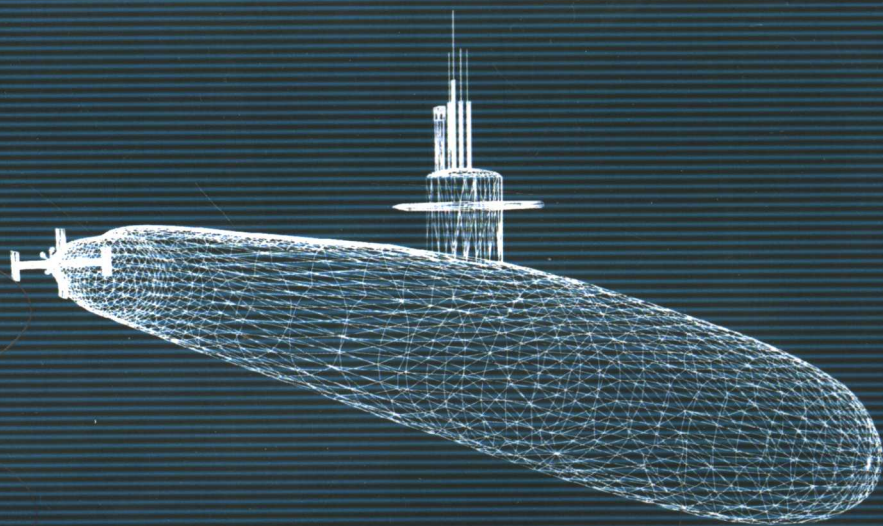
船舶与海洋工程



国防
科工委
「十五」
规划
教材

水下多传感器 阵列信号处理

●孙超 编著



西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

北京理工大学出版社

哈尔滨工程大学出版社

TP212/156

2007



国防科工委“十五”规划教材·船舶与海洋工程

水下多传感器阵列信号处理

孙 超 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

内容简介

本书主要介绍水下声基阵的基础理论,涉及的信号处理方法以及主要应用场所。本书共10章,第1章介绍水下多传感器阵列的工作方式和环境,第2~4章主要从物理学及数学角度介绍孔径理论等,第5~7章主要从信号处理角度来考虑阵列信号处理,第8章讨论目标方位估计问题,第9章介绍匹配场处理技术,第10章介绍全成孔径技术。本书是水声专业的教材,也可供有关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水下多传感器阵列信号处理/孙超编著. —西安:西北工业大学出版社,2007.6
ISBN 978-7-5612-2160-0

I. 水… II. 孙… III. 水下声阵—传感器—信号处理 IV. TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第063862号

水下多传感器阵列信号处理

孙超 编著

责任编辑 傅高明

责任校对 方敏

西北工业大学出版社出版发行

西安市友谊西路127号

市场部电话:029-88493844 88491757

<http://www.nwpup.com>

陕西东江印务有限责任公司印制 各地书店经销

开本:787 mm×960 mm 1/16

印张:23 字数:496千字

2007年6月第1版 2007年6月第1次印刷

印数:1~2000册

ISBN 978-7-5612-2160-0 定价:35.00元(平装) 50.00元(精装)



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。党的十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济做出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,产生和传播国防科技



新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入 21 世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提



升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



前 言

本书系国防科工委“十五”重点建设教材之一,主要介绍水下声基阵的基础理论,涉及信号处理方法及其主要应用场所。本书是高等院校水声专业的教学用书,同时也为从事水声工程的专业技术人员提供一个有用的参考。

本书共 10 章。第 1 章主要介绍水下多传感器阵列的工作方式和环境,以及一些典型的应用场所。第 2 章至第 4 章是本书的基础理论部分,主要从物理学及数学角度出发,介绍孔径理论与多传感器的基阵理论;讨论指向性的物理成因,引入表征指向性的主要物理参数、常见阵形的指向性,以及阵增益的计算方法等。第 5 章至第 7 章主要从信号处理的角度出发考虑阵列信号处理问题;在建立空间采样概念及空域信号模型之后,着重讨论常规空域滤波、最佳阵处理、自适应阵列等通用方法和技术,内容包括波束形成,空域匹配滤波,加窗波束形成,广义旁瓣抵消器,干扰抵消性能分析等。第 8 章讨论目标方位估计问题,分别从各类方法不同的内在机理讨论其实现目标方位估计的基本原理以及可达到的性能。第 9 章介绍匹配场处理技术,包括常用的水声信道传播模型、线性和非线性处理器等。第 10 章以合成孔径技术在声呐中的应用为主线,着重讨论涉及的各种概念及原理,以及基于合成孔径技术的声呐成像基本原理和主要算法。

本书由西北工业大学孙超教授编著。东南大学陆信人教授详细审阅了全部书稿并提出了宝贵的修改意见和建议,在此深表谢意。在编写过程中,编著者的朋友和学生也给予了大量的鼓励、支持和帮助。感谢你们。

由于编著者水平和经验有限,本书在选材及叙述中有诸多不当之处,同时也存在其他缺点和错误,恳请读者批评指正。

编著者
2007 年 2 月

国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主任：张华祝

副主任：王泽山

编委：王 祁

乔少杰

杨志宏

陈国平

贺安之

郭黎利

陈懋章

王文生

仲顺安

肖锦清

陈懋章

夏人伟

屠森林

屠森林

王泽山

张华祝

苏秀华

庞思勤

徐德民

崔锐捷

田 蔚

张近乐

辛玖林

武博祎

聂 宏

黄文良

史仪凯

张耀春

陈光禡

金鸿章

贾宝山

葛小春

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 主动与被动声呐	1
1.2 声呐工作平台与阵形	3
1.3 典型海洋环境与处理问题	5
1.4 全书的内容安排	7
第 2 章 声场的传递函数及体积孔径的指向性	10
2.0 引言	10
2.1 理想流体介质中的波动方程	10
2.2 均匀介质中的波传播	17
2.3 具有任意源分布的线性三维非齐次波动方程的解	21
2.4 体积孔径与格林函数的近似	26
2.5 远场指向性函数	32
2.6 指向性函数的表征	35
习题	39
参考文献	39
第 3 章 平面及线性孔径	40
3.0 引言	40
3.1 平面孔径和远场指向性函数	40
3.2 平面孔径和近场指向性函数	50
3.3 线性孔径和远场指向性函数	51
3.4 线性孔径和近场指向性函数	71
习题	73
参考文献	75
第 4 章 基阵理论	76
4.0 引言	76
4.1 基阵的主要性能参数	76
4.2 线列阵和远场指向性函数	80
4.3 线列阵和近场指向性函数	99
4.4 平面阵与远场指向性函数	102
4.5 平面阵与近场指向性函数	109
4.6 体积阵与远场指向性函数	110



习题	114
参考文献	116
第 5 章 信号的空间采样与常规处理	118
5.0 引言	118
5.1 基阵上的信号与噪声	118
5.2 阵列信号模型	127
5.3 波束形成	135
5.4 空域匹配滤波器	138
5.5 加窗波束形成	143
习题	150
参考文献	151
第 6 章 基阵的空域滤波处理	153
6.0 引言	153
6.1 延迟求和波束形成	153
6.2 空时滤波	161
6.3 滤波求和波束形成	165
6.4 频域波束形成	169
6.5 阵增益	171
6.6 分辨率	175
6.7 波束形成的数字实现	182
习题	194
参考文献	198
第 7 章 自适应波束形成与最佳阵列信号处理	199
7.0 引言	199
7.1 自适应原理与基本算法	200
7.2 自适应波束形成	202
7.3 最佳阵列信号处理	214
7.4 最佳波束形成器的实现	221
习题	226
参考文献	227
第 8 章 目标方位估计	230
8.0 引言	230
8.1 常规技术	230
8.2 信号子空间类方法	242
8.3 子空间旋转法	255
8.4 解卷积类方法	261



8.5 子空间拟合类方法	264
附录 8A: AIC 和 MDL 准则	269
习题	269
参考文献	270
第 9 章 匹配场处理	278
9.0 引言	278
9.1 匹配场处理技术的发展历史	278
9.2 信号与噪声模型	283
9.3 匹配场处理中常用的处理器	288
9.4 匹配场处理技术的应用	294
9.5 其他问题	301
参考文献	305
第 10 章 合成孔径技术	310
10.0 引言	310
10.1 合成孔径技术的发展历史	311
10.2 合成孔径技术的概念与原理	312
10.3 合成孔径声呐的波束形成及分辨率	326
10.4 合成孔径声呐成像原理及算法	333
10.5 非聚焦与聚焦	338
10.6 窄带与宽带	343
参考文献	351

第 1 章 绪 论

阵列信号处理研究如何从传感器阵列上接收到的信号中提取信息的问题,其应用领域非常广泛,包括雷达、声呐、地震、生物医学、通信、天文学以及成像等。水下多传感器阵列信号处理关心的是如何从水下声传感器阵列接收数据中获取有关目标的有用信息,主要应用场合是声呐系统。

1.1 主动与被动声呐

水声换能器基阵广泛地应用于声呐系统中,包括主动声呐和被动声呐系统。

在主动声呐系统中,声基阵向水中发射声能量,并处理接收到的回波信号。主动声呐理论与雷达有许多相似之处。然而,声呐和雷达一个最基本且最重要的差别是,海洋中声能量的传播远比大气中电磁能量的传播复杂得多。这些传播特性对声呐系统的设计有重要影响。

传播的因素包括扩展损失、吸收、波导等。这些因素将随感兴趣的距离、水体深度以及边界条件等变化。噪声背景包括环境噪声、自噪声和混响噪声。环境噪声是海洋中诸如行船、工业活动、海洋生物、降雨、爆炸等各种声源产生的声学噪声。典型地,这些噪声在时间和空间上都是扩展的。自噪声是由平台产生的,包括空化噪声、流噪声和机械噪声。自噪声可能是按频率扩展的,也可能是单音,通常情况下在空域上是集中的。混响噪声是由发射信号的反射产生的,与雷达系统中的杂波类似。其他因素包括与边界的相互作用,声波的空间相干性,并且海洋环境的恶劣程度也必须考虑在内。

图 1.1 所示为一个典型的主动声呐工作环境。船只下方的线状声源向外发射信号,能量在海洋波导传播到达潜艇目标,反射后传播回到船只后方拖曳接收基阵上。除目标潜艇以外,海底/海面散射,以及水体中鱼群等非均匀体也将对发射信号产生响应,并有一部分散射能量返回到接收基阵中。同时,海面行船以及其他工业或自然活动产生的环境噪声也对接收目标信号带来一定的影响。对基阵接收数据进行处理以从中提取有关目标的有用信号,是非常必要和十分重要的。

被动声呐系统接收入射到水下声基阵上的声能量,并利用这些声能量估计被观测信号场的时域和空域特性。被动声呐最重要的功能是对潜艇的检测和跟踪。在主动声呐中有关传播和噪声的所有讨论都适用于被动声呐的情况。图 1.2 所示为一个典型的被动声呐工作环境。

相对而言,这是一个更加简单的环境。目标辐射的声能量经水下信道传播到接收基阵,他们与环境噪声一起共同构成了接收数据。基阵信号处理的目的是通过对这些数据的处理,得到有关目标的多种信息。

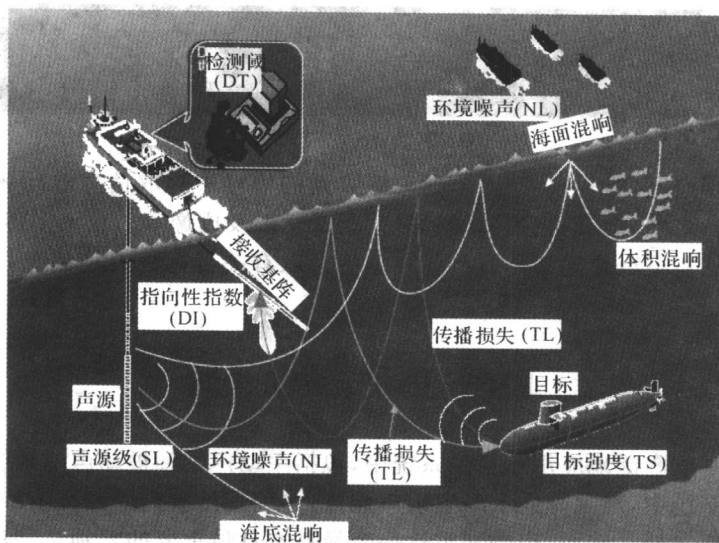


图 1.1 主动声呐工作环境

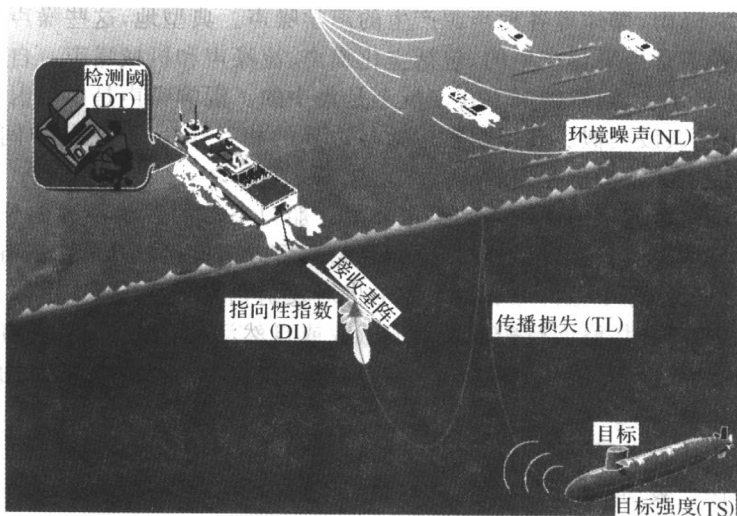


图 1.2 被动声呐工作环境



1.2 声呐工作平台与阵形

一、平台

声呐的工作平台主要包括水面舰、潜艇、航空母舰、飞机(固定翼、直升机)、水下自主航行器,此外还有通过不同方式布放的浮标声呐等。而在每种平台上,又可能安装不同形式的水下声传感器以构成实现不同功能的声基阵。图 1.3 所示为某潜艇上的声呐安装示意图,包括艇艏部指向前方的共形阵,指向前下方的水雷规避阵,艇侧的舷侧阵,以及艇艏的拖曳阵等等。水面舰上的声呐系统与之较为相似。图 1.4 所示为航空吊放声呐的扩展式体积阵和扩展式声呐浮标。

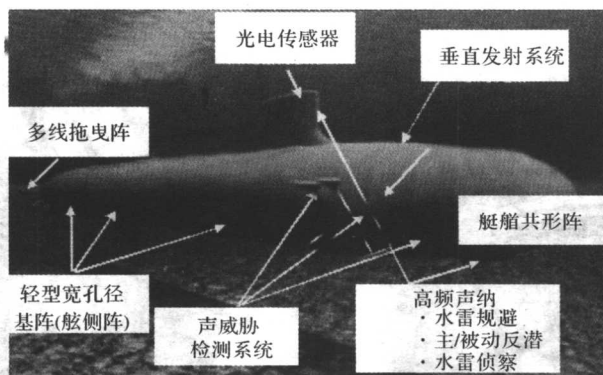


图 1.3 潜艇上的主要声呐系统

二、水下多传感器基阵

图 1.5 中分别为圆柱阵和球形阵,是声呐系统中的常见基阵形式,主要用于艇艏或舰艏,目的是观察声呐平台前方目标。用做这一用途时,又通称为前视声呐。这里,我们以前视声呐为例,简要说明水声基阵中主要关心的问题。

前视声呐(Forward Looking Sonar, FLS)通常又称作顶视声呐(Ahead Looking Sonar, ALS)或扇扫声呐(Sector Scan Sonar, SSS),是大多数水下自主航行器(Autonomous Underwater Vehicles, AUV)上不可或缺的一个系统,同时也广泛应用于扫雷和障碍物探测当中。许多船只和几乎所有的水下航行器均装备有 FLS。除潜艇声呐以外,FLS 主要工作在主动模式中,一个发射基阵向外发射声脉冲,然后由水听器基阵接收回波信号。当在浅海环境中使用时,发射机通常在垂直方向上是可调的,可以产生数个可选择垂直波束宽度和垂直指向角的波束。

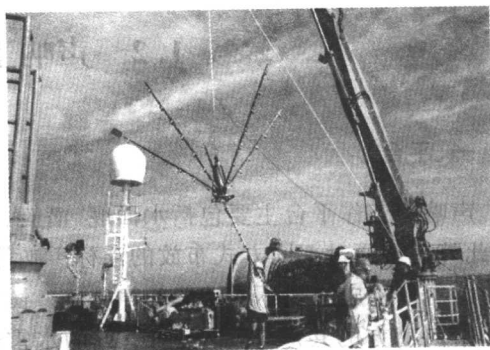
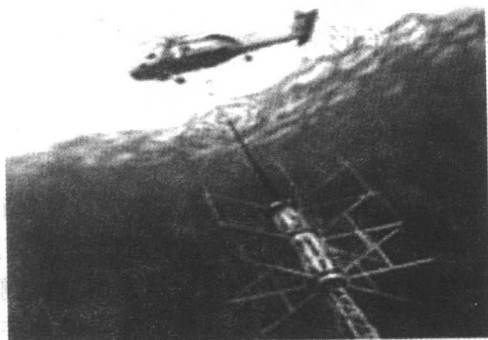


图 1.4 航空吊放声呐和扩展式声呐浮标

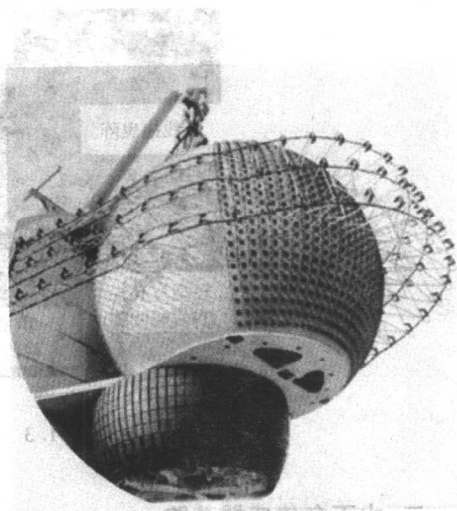
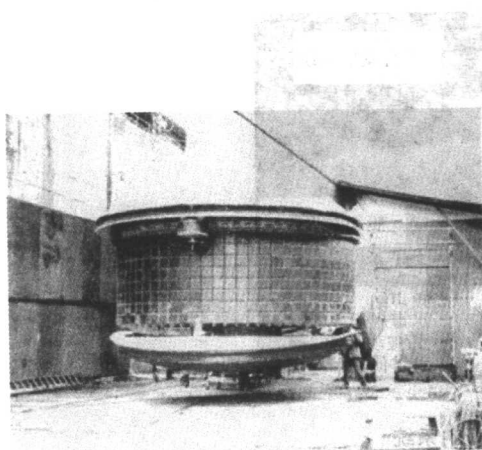


图 1.5 圆柱阵和球形阵

图 1.6 给出了 FLS 产生的接收波束以及它们与发射水平和垂直波束之间的关系。左图是发射和接收波束的俯视图,使用一个宽的波束发射声脉冲,一组窄的波束接收目标回波。右图是侧视图,使用一个可调波束宽度和指向的发射波束,而接收则为宽波束。波束的宽度与采用的基阵阵形有关(如线阵、平面阵、圆周阵、圆柱阵、共形阵,等等),也与基阵的有效孔径大小有关。

基阵波束性能的优劣主要由波束宽度和旁瓣高度来衡量,它受基阵中多个参数的制约。在其他条件相同的前提下,基阵中阵元布放方式的不同也将产生不同的波束。图 1.7 所示为均匀线列阵和均匀弧形阵的波束图比较,两个基阵中使用了相同的阵元个数,并且有相同的孔



径,采用 Taylor 加权方式设计旁瓣为 -35dB 的波束图。两者的差异是明显存在的,尤其是在旁瓣结构上。

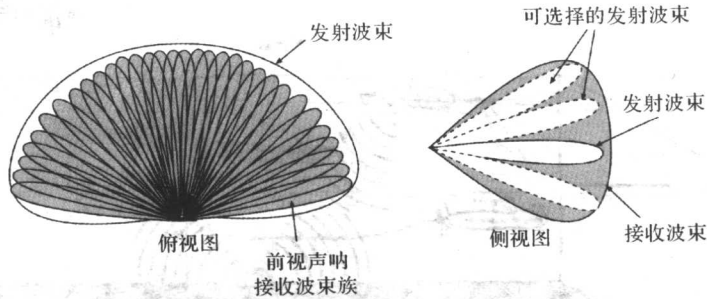


图 1.6 前视声呐的波束示意图

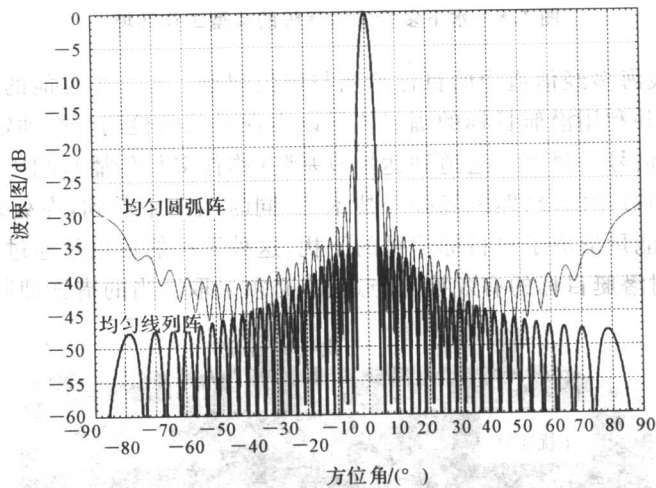


图 1.7 相同加权条件下线阵与圆弧阵波束图的比较

1.3 典型海洋环境与处理问题

声呐系统的工作环境使得水下多传感器基阵信号处理技术面临着许多具体困难。与空气中可以方便地假设的自由空间不同,水声环境受限于海面、海底这两个自然边界,并且,随温



度、深度、盐度变化的声传播速度加剧了水声环境的复杂程度。从图 1.8 中可以看出海面、海底对声波传播的影响。

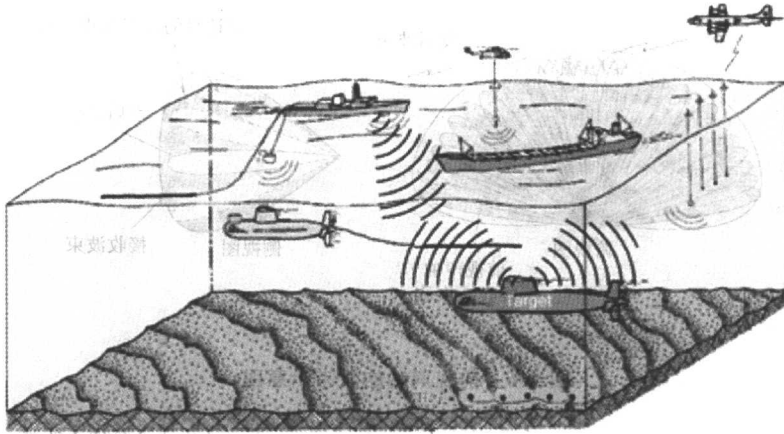


图 1.8 水下多传感器基阵的典型工作环境

图 1.9 描述了浅海多经信道中的目标检测与定位问题。在一个可能的空间位置上布放一个垂直线列阵,接收并利用潜艇目标的辐射能量以实现对其的检测与被动定位。由于海面、海底的存在,目标辐射信号经过多个通道到达接收基阵(称作多径传播),利用这种多路径传播特性可以实现对目标的被动定位(匹配场处理技术)。同时从图中看到,在处理接收数据的过程中,海面船只辐射的能量形成了对目标信号的干扰,这种干扰能量也是通过多条路径到达接收基阵的。要想实现对潜艇目标的有效检测与定位,必须采取适当的措施抑制干扰信号的影响。

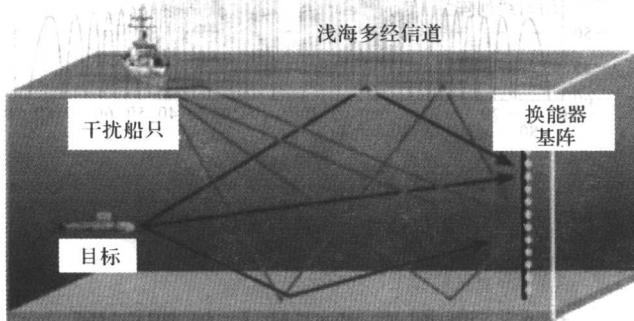


图 1.9 水下多传感器基阵的典型工作环境

这一问题不仅仅出现在浅海多经信道中的目标检测与定位当中,而是一个贯穿于多传感