



工业和信息化部“十二五”规划专著



多基地声呐原理与应用

● 王英民 刘若辰 王成 著



 中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

工业和信息化部“十二五”规划专著

多基地声呐原理与应用

王英民 刘若辰 王 成 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书主要论述多基地声呐的基本原理、定位算法和实际应用,内容包括:多基地声呐概述,多基地声呐发展历史,多基地声呐基础理论和算法,如双/多基地声呐定位的几何原理、双/多基地声呐定位误差分析、基于波达时间的定位算法、基于波达方向的定位算法、基于马尔可夫估计的定位优化算法和基于最佳线性加权数据融合定位优化算法等。本书对多基地条件下的混响和目标特性进行了较为详细的分析,包括多基地声呐混响特性、双基地海底、海面和体积散射模型与收发分置时水下目标特性等。最后给出了典型条件下多基地声呐配置方法和效能分析的最新研究成果。

本书相关技术和算法对雷达信号处理、地震信号处理等领域有重要参考价值,可供相关领域工程技术人员学习、参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

多基地声呐原理与应用 / 王英民, 刘若辰, 王成著. —北京: 电子工业出版社, 2015.11

工业和信息化部“十二五”规划专著

ISBN 978-7-121-27335-3

I. ①多… II. ①王… ②刘… ③王… III. ①声呐—研究 IV. ①U666.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 234063 号

策划编辑: 王晓庆

责任编辑: 王晓庆

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 12.75 字数: 326 千字

版 次: 2015 年 11 月第 1 版

印 次: 2015 年 11 月第 1 次印刷

定 价: 58.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

多基地声呐是一种特殊的声呐系统，严格地讲，多基地声呐并不是一个独立的声呐设备，它需要多个声呐设备的配合，应该说是一种涉及多种声呐设备应用的多设备声呐系统。正因为如此，再加上较强的军事背景，有关多基地的专著或教材相对较少，对于多基地声呐系统中常用的算法分析和应用研究等也相对缺乏，目前在国内还没有系统的论述专著，有关材料和研究成果均散布在各种研究报告和论文中。在国内有关多基地声呐的教学和科研活动中主要采用国外教材，这种局面非常不利于多基地声呐技术的系统研究，不利于多基地声呐技术人才（本科和研究生）的培养。因此，迫切需要一本系统讨论、分析多基地声呐系统设计的专门著作。本书尝试对多基地声呐系统的设计和应用进行系统地分析、总结，通过对这些研究成果的总结，系统地介绍多基地声呐系统的最新研究进展，希望能推动多基地声呐技术的进步和发展，促进水声信息对抗专门人才的培养。

本书主要从多基地基础理论和算法、多基地混响和目标特性的研究、多基地声呐系统配置等三个方面介绍分析有关研究成果。书中许多内容是作者和研究团队多年来从事多基地声呐科研和教学实践的总结，相关结果和讨论对从事声呐信号处理、雷达信号处理和地震信号处理等领域的科技工作者、专业技术人员及高等院校师生有一定参考价值。

全书共 10 章，王成编写并审校第 8 章和第 9 章，刘若辰编写并审校第 5 章、第 6 章和第 10 章，其余章节由王英民撰写，王英民负责全书的审校。

需要说明的是，本书中的研究成果主要来源于西北工业大学航空声呐研发中心团队，有关内容是在中心研究成果基础上总结完成的，因此作者要感谢声呐团队的全体老师和同学们。西北工业大学航空声呐研发中心承担大量水声工程方面的研究课题，并取得了丰硕的研究成果。这些研究成果得益于总装、海军有关部门和合作单位的支持和帮助，因此，作者要感谢相关研究工作的主要资助与合作单位：总装预研局、总装海军局、海军装备研究院、海军装备部、国家自然科学基金、西北工业大学、中航庆安集团和中船重工辽海机械厂等。

感谢工业和信息化部“十二五”规划专著出版项目的支持，也感谢电子工业出版社编辑们的辛勤工作。

由于作者的学识和水平所限，书中难免存在缺点和错误，恳请广大读者给予批评指正。

作 者

2015 年 11 月于西安

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 军事需求与国内外研究状况	1
1.2 多基地声呐工作体制特点分析	5
参考文献	8
第 2 章 双基地声呐定位理论	10
2.1 双基地声呐的几何原理	10
2.2 双基地声呐方程	10
2.2.1 声呐方程	10
2.2.2 收发分置对声呐方程的影响	12
2.3 双基地声呐的作用距离	13
2.4 双基地声呐定位理论	15
2.4.1 双基地声呐定位原理	15
2.4.2 双基地声呐定位误差表示方法	17
参考文献	18
第 3 章 双基地声呐二维定位方法及误差分析	19
3.1 双基地声呐系统模型及定位误差	19
3.1.1 双基地声呐系统模型	19
3.1.2 影响定位误差的因素	20
3.2 利用发射站信息的定位方法分析	21
3.2.1 定位方法	21
3.2.2 定位误差分析	21
3.2.3 仿真结果分析	22
3.3 利用接收站信息的定位方法分析	24
3.3.1 定位方法	24
3.3.2 定位误差分析	25
3.3.3 仿真结果分析	26
3.4 利用距离信息的定位方法分析	28
3.4.1 定位方法	28
3.4.2 定位误差分析	29
3.4.3 仿真结果分析	30
3.5 利用角度信息的定位方法分析	32
3.5.1 定位方法	32

3.5.2	定位误差分析	32
3.5.3	仿真结果分析	33
3.6	基于加权最小二乘的优化算法定位精度分析	35
3.6.1	定位方法	35
3.6.2	仿真结果分析	37
3.7	基本结论	39
	参考文献	40
第4章	双基地声呐定位优化算法	41
4.1	基于马尔可夫估计的定位优化算法	41
4.1.1	双基地马尔可夫定位算法	41
4.1.2	马尔可夫定位算法的改进	44
4.1.3	仿真结果分析	46
4.2	基于最佳线性加权数据融合的双基地声呐定位优化算法	50
4.2.1	最佳线性加权数据融合原理	50
4.2.2	基于最佳线性数据融合的定位优化算法	51
4.2.3	算法性能仿真	52
4.3	基于最优化理论的双基地声呐定位算法	55
4.3.1	双基地声呐定位的非线性规划模型建立	55
4.3.2	基于模拟退火理论定位优化算法	56
4.3.3	基于遗传理论的定位优化算法	61
	参考文献	66
第5章	双基地声呐三维定位方法及误差分析	68
5.1	双基地声呐三维定位	68
5.2	基于参数 r_T 、 r_Σ 和 θ_T 的定位方法	69
5.3	基于参数 r_T 、 r_Σ 和 θ_R 的定位方法	73
5.4	基于参数 r_T 、 θ_T 和 θ_R 的定位方法	78
5.5	基于参数 r_Σ 、 θ_T 和 θ_R 的定位方法	81
	参考文献	86
第6章	多基地声呐定位算法	87
6.1	多基地声呐距离信息定位算法	87
6.1.1	T/R-R ⁿ 型多基地定位系统	87
6.1.2	T-R ⁿ 型多基地定位系统	91
6.1.3	(T/R) ⁿ 型多基地定位系统	94
6.2	基于最小二乘估计的多基地声呐定位优化算法	97
6.2.1	线性最小二乘定位算法	97
6.2.2	加权最小二乘定位算法	105
	参考文献	113

第 7 章	多基地声呐混响特性	114
7.1	双基地海底散射模型	114
7.1.1	模型	115
7.1.2	模型仿真	117
7.2	双基地海面散射模型	125
7.2.1	模型	126
7.2.2	模型仿真	128
7.3	双基地体积散射模型	134
	参考文献	135
第 8 章	收发分置时水下目标特性	138
8.1	水中目标特性理论	138
8.1.1	理论模型	138
8.1.2	计算声散射特性的基本方法	139
8.2	球形目标的目标强度	141
8.2.1	球形目标的声散射机理	141
8.2.2	数学模型的建立	141
8.2.3	仿真试验研究	143
8.3	有限柱长的目标强度	144
8.3.1	基本假设	144
8.3.2	参数 B_n 的确定	146
8.4	椭球目标声散射模型	148
8.4.1	声散射模型建立	148
8.4.2	仿真试验研究	149
8.5	收发分置时目标特性试验	151
8.5.1	试验方案	151
8.5.2	实验内容及结果分析	153
	参考文献	160
第 9 章	多基地数据融合算法	161
9.1	统计检测的基本模型及分布式 N-P 融合系统	161
9.2	最优 N-P 融合系统	163
9.2.1	最优融合规则	164
9.2.2	各部传感器的最优判决规则	165
9.2.3	固定融合规则下融合系统的全局最优解	166
9.3	声呐检测系统融合算法	168
9.4	声呐融合系统检测概率的计算	171
9.4.1	单部声呐检测概率的计算	171
9.4.2	融合系统检测概率的计算	172
	参考文献	172

第 10 章 多基地声呐配置	174
10.1 多基地声呐检测覆盖范围	174
10.2 多基地声呐系统配置策略	177
10.2.1 多基地声呐系统配置假定	177
10.2.2 航空声呐的多基地配置	179
10.2.3 航空声呐浮标布阵方案	184
参考文献	195

第1章 绪 论

1.1 军事需求与国内外研究状况

国际形势的发展对我海军的现代化建设提出了迫切的要求，主要体现在我国经济高速发展的成果需要保护、国家领土完整需要维护，超级大国的“坚艇利炮”离我们并不远，中国的东海、黄海海域、大陆架和大量海域面临外国的主权要求和控制，在中国的海洋国土上，有150万平方千米被外国提出主权要求而处于争议之中，其中相当部分已经被外国实际控制或蚕食分割。因此，我们需要先进的海洋技术和强大的海军力量。

从第二次世界大战开始，潜艇已发展成为威力巨大的战略力量，从冷战时期的美苏对抗中不难发现潜艇所具有的重要位置。携带远程核导弹的核潜艇早已被视为战略威慑力量之一。冷战结束后，世界各国的潜艇技术也在快速发展，拥有潜艇的国家越来越多，潜艇的威力和威胁也在日益增长。

经过近一个世纪的发展，潜艇已经向着核动力、大深度、高速、远航程、超低辐射噪声等方向发展，对反潜作战提出了严重挑战。现代潜艇技术的发展主要体现在核动力和新材料的采用。目前的潜艇大多采用核动力，这使得潜艇的大深度、高速机动成为可能，可以轻松地下潜到500m以下，这样许多近水面探测装置，如红外、磁探等均失去了作用，加之使用核动力和先进的通信手段后，潜艇露出水面的技术要求时间越来越短，被发现的概率变得非常小，隐蔽性显著提高。潜艇技术的另一个主要进展是辐射噪声越来越小，这主要得益于降噪技术的进步和大量采用消声瓦，大量消声瓦敷设在潜艇表面，大幅度降低了潜艇的反射本领和自噪声的辐射，导致依靠中高频探测的水声设备无效或性能严重降低，因此，研究开发水声探潜新技术迫在眉睫。世界各军事强国均十分重视反潜装备的发展，目前已逐渐形成了空中、水下、多方位和多手段的立体综合反潜体制。

由于潜艇技术的革新和声隐身技术、水声对抗技术的进步，使得传统的声呐作用距离大幅度减小，在应用效能上面临严重的挑战。如何提高对安静型潜艇的探测能力，成为现代反潜战的关键。提高声呐作用距离主要依靠以下几种手段：①发展新的信号处理技术；②发展声信息载体之外的新信息载体探测技术，如红外辐射、二氧化碳分析、蓝绿激光探测等；③新体制声呐综合探测系统，即依靠吊放声呐、声呐浮标、舰壳声呐、潜艇声呐或其他声源，构成多基地或双基地探测系统。就目前的发展来看，第①和第②种方法的发展速度缓慢，目前还不具备大幅度提高检测性能的可能性，而多基地体系综合探测有可能较大幅度地提高探测距离，解决对安静型潜艇的探测问题。双（多）基地声呐具有以下特点。①良好的隐蔽性。接收机和发射源可以相距较远，有效遏制敌潜艇的反对抗措施，可实现对潜艇攻击的突然性。例如，吊放声呐和水面舰艇声呐相配合的双基地反潜组合，可由舰壳声呐在指定海域发射大功率声源，利用吊放声呐实施对潜探测和攻击；由于吊放声呐的检测不受载体自噪声的影响，可实现极弱信号的检测，同时还可利用直升机的高速机动性，达到对潜艇的多点大范围检测，

进而由反潜直升机利用空投鱼雷或深弹,对潜艇实施攻击。②强抗干扰性。双基地声呐可有效回避敌方实施的强方向性干扰。③更远的检测距离。由于在极限状态,接收机可置于敌方潜艇附近,传播损失可近似为单程,因此可有效提高检测距离(发射源到潜艇)。④较丰富的目标信息。当采用舰壳声呐作为发射源时,舰壳声呐本身可获得目标信息,与被动接收机相结合,可以获得比单基地声呐更多的目标信息。

当前世界上先进国家的海军(包括我国海军)均装备了各种水面舰声呐、岸基声呐、潜艇声呐和航空声呐等,对这些设备稍加改进或简单加装组建,即可构建基于这些声呐的多基地探潜体系,有效提高海军反潜作战能力。

总之,多基地声呐通过对各种声源、各种类型被动接收检测配置的效能分析、探测态势数据库和自动配置研究,可以为水面舰声呐、潜艇声呐、航空声呐综合配置的双基地、多基地探测新体系,提供效能理论分析依据和作战实施智能方案(可以根据发射源和接收点类型,自动配置多基地探测方案),实现最佳探测效果的多基地探测最优配置,使得安静型潜艇探测性能大幅度提高。

双/多基地声呐的研究,借鉴了双/多基地雷达技术,约始于20世纪50年代。美国是最早开展双基地声呐研究的国家,为了增大舰载声呐或固定声呐的检测范围,在20世纪50年代就开始研究双基地声呐的有关问题,并在实验中使用了由舰载声呐与声呐浮标组成的双基地声呐系统,但实验和研究结果认为双基地声呐没有单基地声呐有效,随后对双基地声呐的研究失去了兴趣。

20世纪70年代初,美国的雷锡公司在北大西洋和地中海进行了多次双基地声呐实验,实验证明用双基地声呐定位是可行的,其目标发现概率在95%以上,是具有相同检测性能CASS声呐的4倍。但由于受当时各方面技术条件的限制,进一步的研究被搁置。

到了20世纪80年代,随着双基地雷达的成功应用,美国又恢复了对双基地声呐的研究。1980年,Varadan^[1]等人运用 T 矩阵的方法,研究了球、椭球、有限柱等简单形状目标的双基地散射目标强度随频率的变化关系,为运用声散射理论来研究双基地声呐目标的散射特性做了开创性工作。

20世纪80年代中期,美国的CoustesyXonTech公司在两艘远洋船上进行了双基地实舰试验,此后,相继发表了多篇有关双/多基地声呐的研究报告和理论文章^[2-6],这些文献研究的主要内容包括双基地表面混响、双基地声呐总体性能、双基地目标强度等。

1986年,美国海军海洋系统中心完成的“双基地主动声呐方程”的研究中,给出了双基地主动声呐方程,并研究了多次散射对双基地声呐定位性能的影响。

20世纪80年代以来,美国的Jackson等人^[7-10]对双基地混响特性进行了很多研究,提出了各种混响模型,来研究各种环境参数对海洋声散射的影响,并通过海上试验对模型进行了验证。1989年,美国BBN系统工程公司在《水下数据处理》文集中发表了“双基地主动声呐基础^[7]”一文,阐述了双基地声呐的理论基础,还对双基地配置时系统的混响特性、多普勒及直达波抑制等问题进行了研究。

进入20世纪90年代,更多国家意识到双基地声呐的重要性,纷纷开展双基地声呐技术的研究,使双/多基地声呐成为声呐技术和海洋监视技术研究的一个热点问题。在这些研究中,进行了大量有关双/多基地声呐探测、海底散射、海面混响、双基地声呐浅海前向散射特性的理论和实验研究,同时还进行了双/多基地声呐实验系统的研制。1991年,美国宾夕法尼亚大学应用研究实验室进行了有关双基地海洋表面混响模型的研究,提出了几种理论模型并进行

了仿真,取得了较好的效果。1992年,美国海军进行了以航空吊放声呐为主要设备的浅海多基地声呐试验,首次将航空声呐应用于多基地声呐系统,该试验为多基地声呐系统配置提供了借鉴。1993年,美国华盛顿大学给出双基地海底混响的理论模型和实验研究,并进行双基地海底混响的实舰测量,把理论模型和试验测量数据进行了比对。

1993年,法国的FOA组织进行了多基地海洋监视系统的大型海上试验,采用多部声源和多部接收机。该试验应用GPS来解决收发设备之间的时间同步问题,还利用了具有先进数字信号处理能力的硬件,由于军事保密,具体的海上试验情况未见公开的报道。1994年,英国国防机构研制了一套基于航空声呐浮标的多基地主动声呐系统。该系统由一个声源、一个模拟的目标和至少6个散置的声呐浮标组成,接收设备与发射设备之间通过无线电波进行通信,采用多基地波束形成与显示技术来提供实时处理和显示不同接收声呐浮标的的数据,应用波束形成器的输出来确定目标的距离和方位,来实现目标声定位。

1995年,瑞典介绍了其多基地声呐的研究计划,目的是研究多基地技术在波罗的海的应用,并开发用于实验的设备,用来研究多基地声呐的各种主要特性参数,如目标强度、混响检测、目标定位等,这些工作为以后实验设备的完善和研究方法的更新提供了科学的依据。

意大利SACLANT(Supreme Allied Commander atLANTic)水下研究中心在1995—1999年间,运用DUSS(Deployable Underwater Surveillance Systems)进行了大量的多基地声呐的实验和理论工作,研究内容主要包括:进行多基地声呐可行性理论、多基地声呐概念的建立和系统参数的设计,如建立环境模型、设置工作频率、发射声源级、电池的耐久性、空间加权、阵尺寸、目标强度、阵列增益等参数。通过实验,获得了大量的宝贵资料,并和理论设计相比对,对理论模型和性能参数做进一步的完善,还对多基地网络的数据融合进行了初步的研究。

在1999年的第五届IEEE关于信号处理及应用的国际会议中,澳大利亚国防科技组织发表了题为“澳大利亚多基地主动声呐计划的概述”的文章,重点介绍了该国在多基地声呐方面的研究。

在2002年UDT(Undersea Defence Technology)国际会议上,韩国的S.Cho、J.Chun等发表了“基于总体最小二乘方法的多基地声呐定位^[11]”一文,说明韩国在近几年也在对双基地声呐进行着研究。

我国双/多基地声呐也从20世纪90年代开始,目前尚处于起步阶段。国内一些相关院校和研究所进行了有关双基地声呐定位原理、定位方法、测向精度、目标强度、作用距离估计等方面^[12-20]的理论研究工作,并进行了部分的实验研究。

1991年,赵俊渭等“双基地声呐的性能与展望^[12]”一文发表,重点对双基地声呐的特点和实现上所存在的关键问题进行了论述,随后一直进行着对双基地声呐问题的研究。1993年,张全^[13]在“双基地声呐性能研究”硕士论文中,对双基地声呐的性质、技术特点和定位方法等进行了概括研究。1996年,阎宜生^[14]等利用双基地声呐方程,对双基地声呐作用距离进行估计,得出“如果配置得当,多基地声呐作用距离比单基地声呐作用距离可提高数倍,甚至一个数量级”的结论。

2001年,凌国民^[15]综述了目前国外声呐技术的发展概况,并对国外多基地声呐发展和研究趋势进行了论述。2002年,霍国正^[16]等进行了简单的海上试验,证明了多基地声呐定位的可行性。2002年,张小凤^[17]等应用变形柱建立了椭球目标散射声场的数学模型,并进行仿真和实验研究,给出了非入射方向椭球目标声散射强度随姿态角的变化曲线。2003年,张小凤

等根据双基地定位方法的特点,提出 TOL (Time-Only-Localization) 双基地声呐定位算法^[18],并进行仿真分析,得到一些有意义的结论,可为实际双基地声呐定位提供参考。

2004年,王成^[19]对双基地声呐目标特性进行了详细的研究,并进行了水下目标声散射特性的水池实验,取得了有关双基地声呐目标声散射特性的一些有价值的研究结论。

2005年,孙志洁在硕士论文“双/多基地声呐定位算法研究”^[20]中对双基地声呐的各种定位算法进行了研究,研究了二维目标定位的6种基本方法及优化方法和三维定位的4种方法,并采用 GDOP (Geometrical Dilution Of Precision) 来表示双基地声呐的定位误差。赵宝庆^[21~23]对双基地条件下的混响特性进行了研究,建立了基本的混响模型,并进行了仿真研究。2005年后,对于多基地声呐的应用研究受到重视。王英民、刘若辰、李东洋、曾广荣等^[24~30]对基于航空声呐的多基地配置方法、编队条件下多基地配置技术进行了研究,完成了算法建模计算机仿真,并建立了较为大型的效能展示平台,对于多基地声呐技术的实际应用有重要的推动作用。

虽然目前我国双基地声呐的研究还相对比较落后,但随着我国经济的飞速发展和综合国力的增强,以及声信号处理水平的不断提高,双/多基地声呐的研究能力和水平也必将进一步增强。

综合国内外的情况可见,双/多基地声呐已经成为现阶段和未来声呐技术领域研究的热点。随着潜艇隐身技术和水声对抗技术的迅速发展,迫切需要开展双基地声呐方面的研究,而我国关于双/多基地声呐的研究不多。

目前国内研究者主要完成了以下研究工作:①对双/多基地声呐工作体制特点进行了深入分析;②利用多基地雷达的多基地探测技术对双基地声呐定位方法、定位精度等进行了较为深入的理论分析和仿真研究,对多基探测条件下的性能有了初步的了解;③对双基地探测的若干关键技术进行了初步研究,如系统定时与控制技术、双基地综合信息处理与融合技术、接收端直达波拟制和回波分离技术、双基地探测条件下的混响特性分析等;④对多基地条件下的目标强度进行了深入的理论 and 仿真研究,利用模拟潜艇目标对其目标特性进行了同比尺度水池实验研究,获得了双基地情况下模拟潜艇目标强度的初步数据分析和实验研究;⑤对航空声呐、水面舰声呐、潜艇声呐的多基地探测体制构成进行了初步研究,给出了各种配置情况下的理论效能分析,给出了水面舰艇声呐及反潜直升机吊放声呐双基地使用的改造方案和水面舰艇及多架反潜直升机组成的多基地探潜体系配置建议;⑥利用某吊放声呐系统在湖上完成了双基地目标探测的原理验证试验。相关结果为进一步开展多基地研究工作打下了基础。

由于受经费和试验条件的限制,有关研究结果还不够深入,大多数研究结果建立在理论分析基础上。例如,对探测机制的研究,目前还没有实际试验的性能验证,所以无法给出实际配置时的效能分析。目前急需加大投资力度,进一步深入研究各项关键技术,如系统定时与控制技术、接收端直达波拟制、抗混响技术、目标强度等。此外,由于水声传播的复杂性,仅有理论分析是远远不够的,还需要大量的水池和实艇试验来验证理论计算结果,积累试验数据,建立实用模型和方法,测试相关信号处理和数据融合技术等。因此,极有必要继续开展相关研究,尤其是试验研究工作,进一步推动双基地或多基地声呐技术向实用化方向迈进。

1.2 多基地声呐工作体制特点分析

1. 声呐的工作方式

水下监视系统的主要作用是通过接收水中目标的辐射噪声或主动声呐信号的回波信号来进行目标的检测、分类、跟踪及参数估计。现代作战系统中，用被动声呐来监听目标的辐射噪声，用严格的单基地主动声呐进行回声定位。两类声呐都用于进攻和防御，但主动声呐较多地应用于水面舰艇，而被动声呐则较多地应用于潜艇。

多基地声呐同时具有主动和被动声呐的工作特点。在多基地条件下，声源（发射机）与接收设备是远距离分开的。声源向水中发射声脉冲，如果目标存在，将与单基地工作方式一样，向空间辐射声能。在这种情况下，可以把目标视为被动工作方式的声源。

在双基地条件下，传播损失是双程的。但声波所经历的两个传播距离、吸收因子是不同的。测向可以通过测量回波的反射方向来进行。而测距则是利用双基地声呐收发设备之间存在的几何关系，通过解算声呐定位方程，解得目标到接收机的距离。作为仅以被动方式工作的接收机，其位置是不易被目标发现的，因而，双、多基地声呐可以同时完成主动声呐和被动声呐的各项功能。正因为如此，采用多基地声呐的水下监视系统，其反潜作战能力将会获得大幅度提高。

2. 收发分置声呐的系统配置

典型收发分置声呐的系统配置如图 1-1 所示。图中，T 代表声源，R 代表接收机。

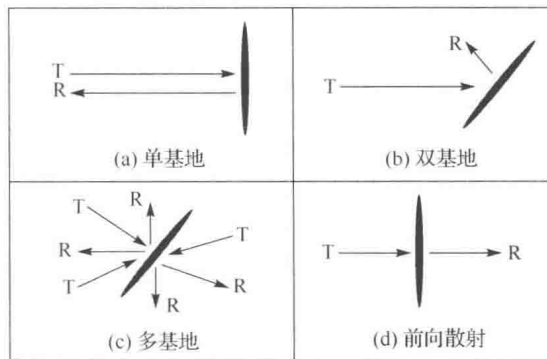


图 1-1 收发分置声呐的系统配置

图 1-1(a)所示为传统的单基地声呐系统配置，声源和接收机虽分开放置，但它们之间的距离比声波作用距离小得多，接收机所接收的声波主要来自目标的背向散射方向。这种配置是目前大多数声呐所采用的系统配置。

图 1-1(b)所示为典型的双基地声呐系统配置，是多基地声呐系统配置中最简单和最基本的一种。在这种几何配置下，一个声源发射声波，接收机布设在不同的位置接收目标回波。声源与接收机分开一定的距离，接收机所接收的目标回波主要来自声波的非入射方向。目前国外对双基地声呐系统的研究表明，采用双基地声呐进行水下监视，可以显著提高系统的探测距离。双基地声呐的定位精度明显高于同等条件下的单基地声呐。

图 1-1(c)所示为图 1-1(b)双基地声呐系统配置的进一步扩展,采用多部声源同时发射声波,接收也是由许多接收机组成的。在这种配置下,多部发射机和接收机组成多基地网络系统,协同工作。这样的配置显著增加了作用面积,使系统的检测性能大幅度增强。同时,由于使用了分置的多个声源和接收机,使目标潜艇的隐藏、规避、攻击的能力更加复杂,声呐的隐蔽性和抗干扰性都得到显著改善。此外,声源或接收机是自主工作,并且是和人工操纵平台分开的,这样的配置也保证了人工操纵平台的安全。目前,这种配置已经相当普遍地应用于国外一些海军装备,而且,还应用于石油和天然气的勘探中。

图 1-1(d)代表了一种对于单基地、双基地、多基地声呐概念变更的检测方式,这种配置主要利用目标的前向散射声能来检测目标。前向散射的目标位于声源和接收机的连线上。这种配置的突出优点是:由于目标的前向散射强度较大,因而可以大大降低发射站的声波发射功率,使目标难以用降低目标强度的方法来进行规避,从而可有效提高声呐系统的检测概率。而且,通过合理地配置双基地声呐发射机和接收机的位置,把发射站布设在比较安全的地方,接收站布设在离目标比较近的位置,不仅可以提高系统的工作能力,同时,还可以大幅度增强声呐的隐蔽性能。

3. 多基地声呐系统的特点和涉及的关键技术内容

多基地声呐与单基地声呐相比,其结构更加复杂。因而,多基地声呐具有一些不同于单基地声呐的特点。从自然特征上来看,多基地声呐主要具有以下几个特点。

1) 接收机在各个不同的方位接收目标回波,回波来自目标散射的不同方向,即在多数情况下,目标回波来自声波的非入射方向。

2) 收发分置的工作方式使测量数据的自由度和数据的冗余增加,对于系统的信息处理能力有了更高的要求。

3) 多个接收机公用一个或多个发射源,使系统的组成结构更加复杂,最为复杂的情况是多基地系统成为一个 MIMO (Multiple Input & Multiple Output) 声呐系统。

由于这些特点,在多基地声呐研究中,除了考虑通常声呐设计所设计的关键技术外,也出现了其他更为独特的研究课题,主要如下。

1) 收发分置情况下的目标特性研究

由于收发分置,接收点可以在目标的任意方向,因此必须对目标在各个方向的发射、散射特性进行研究,以便对声呐系统进行设计和评估。

2) 抗混响技术

收发分置后,检测点多样化,导致混响特性对声呐的影响发生变化,混响的影响不再仅限于对单个接收点(单基地时,就是发射点本身)的影响,还需要知道在更广范围内、立体方向的混响特性,并考虑其对检测性能的影响,因此有必要对海面、海底和海洋的体积混响进行深入研究,给出理论和实验结果,指导多基地探测系统的设计。

3) 多基地声呐定位算法研究

在多基地条件下,发射站和接收站可分别测得目标的距离和方位角,因而可分别利用距离信息和方位测量信息对目标进行定位。这种定位方式和单基地有很大不同,因此有必要对相关定位算法、定位性能进行理论和实验研究,以便最大化多基地的探测性能,同时为多基地声呐设计提供依据。

4) 多基地数据融合研究

由前面的分析知道,多基地系统可以理解为 T/R-R" 型双基地声呐,发射站和接收站都可以提供测量数据,于是存在冗余信息。所以,可以通过对此冗余数据进行数据融合,提高多基地声呐的定位精度。处理冗余信息就会增加数据处理的计算量,因此,需要对多级数据融合算法进行深入研究,解决定位融合算法的优化问题。

5) 系统定时与控制技术

多基地情况下,收发不在同一平台,无论采用以距离为基准的定位算法(DOL, Distance Only Localization)、以时间为基准的 TOL 算法(Time Only Localization)、以方位为基准的 BOL 算法(Bear Only Localization),或者这三种算法的混合,都需要精确的同步定时和控制技术,因此,在多基地系统中,系统的定时与控制是其重要研究内容之一。

6) 接收端直达波拟制技术

多基地情况下,接收端除了接收目标的发射或散射信号外,必然还会接收到发射源产生的直达波信号,此时,直达波信号成了目标检测的干扰信息;接收点相对于发射源的位置不同,直达波到来的方向也不同。所以,如何有效抑制直达波信号成为多基地声呐设计难以避免的问题之一。

7) 多基地声呐配置研究

多基地声呐属于多部声呐联合的综合声呐体制,其配置方式决定了它的探测性能,因此对配置方法的研究是多基地声呐的重要研究内容之一。此外,由于多部声呐综合配置、联合探测属于战术层面的任务,操作的主体是编队的指挥员,因此开展配置方式、探测性能预测的研究,并开发面向指挥员的配置软件,对于多基地声呐的应用成功至关重要。

本书主要结合多基地声呐研究中的关键技术(直达波拟制和系统定时控制除外),论述最新的研究成果,并探讨分析这些新技术的应用可能性。主要内容包括三大部分。第一部分是多基地基础理论和算法,主要包括:单基地声呐与多基地声呐概述、多基地声呐国内外发展趋势、多基地声呐技术设计的主要技术问题、多基地声呐定位方法及误差分析和多基地声呐数据融合及优化算法等。第二部分是有关多基地混响和目标特性的研究,主要有:多基地声呐混响特性分析、双基地海底散射模型、双基地海面散射模型、体积散射模型和收发分置时水下目标特性研究等。第三部分内容是关于多基地配置方法、联合探测效果分析等,重点给出了利用航空声呐进行多基地探测的配置方法和探测效果分析等研究成果。

本文的内容按以下顺序安排,第2章从双基地声呐定位理论入手,分析介绍双基地声呐的几何原理、双基地声呐方程、双基地声呐定位理论和双基地声呐定位原理、定位误差表示等。第3章讨论双基地声呐二维定位方法,包括双基地声呐系统模型及定位误差、利用发射站信息的定位方法分析、利用接收站信息的定位方法分析、利用距离信息的定位方法分析、利用角度信息的定位方法分析和基于加权最小二乘的优化算法定位精度分析等。第4章重点分析双基地声呐定位优化算法,包括基于马尔可夫估计的定位优化算法、基于最佳线性加权数据融合的双基地声呐定位优化算法和基于最优化理论的双基地声呐定位算法。第5章研究分析双基地声呐三维定位方法及误差分析。第6章研究分析多基地声呐的定位算法,包括基于距离信息的多基地定位算法和基于最小二乘估计的多基地声呐定位优化算法。第7章讨论多基地环境下的混响特性,包括双基地海底散射模型、双基地海面散射模型、双基地体积散射模型和仿真实验结果。第8章讨论收发分置时水下目标特性的研究成果,包括水中目标特

性理论、球形目标的目标强度、有限柱长的目标强度、椭球目标声散射模型和模拟潜艇的目标特性水池试验结果分析等。第 9 章研究分析多基地数据融合算法, 主要有多基地声呐统计检测的基本模型及分布式 N-P 融合系统、最优 N-P 融合系统、声呐检测系统融合算法和融合系统检测概率计算等。第 10 章探讨了多基地声呐的配置问题, 在建立了多基地声呐探测模型基础上, 分析了多基地声呐检测覆盖范围, 给出了多基地声呐系统配置策略, 重点研究了基于航空声呐的多基地配置问题, 利用计算机仿真给出了不同配置条件下的探测效果。

参考文献

- [1] V. K. Varadan. Acoustic Electromagnetic and elastic wave scattering Focus on T-matrix approach. J. Acoust. Soc. Am., 1980, Vol. 68, No.3.
- [2] On sonar performance estimation for separated source and receiver. AD-A068 956/2SL.
- [3] Application of the sonar equation to bistatic echo-ranging. AD-A115731/2,1982.
- [4] Cancellation of surface reverberation from a bistatic sonar. AD-A116 822/8,1982.
- [5] Azimuthal dependence of bistatic surface scattering: A comparison between theory and experiment. AD-A163 293/4,1985.
- [6] L. Goetberstcoem. Signal, noise and reverberation in bistatic sonar systems. PB88-21108 I/HDM, 1988.
- [7] Henry Cox. Fundamentals of bistatic active sonar, Underwater acoustic data processing. Kluwer academic publishers, 1989,3-24.
- [8] D. R. Jackson, D. P. Winebrenner and A. Ishimaru. Application of the composite roughness model to high-frequency bottom backscattering. Acoust. Soc. Am.,1986, Vol. 79:1420-1422.
- [9] Eckart, C. Scattering of sound from the sea surface. H.A.S.A.1953.
- [10] D.R.Jackson. A model for bistatic bottom scattering in the frequency range 10~100kHz. APL-UW TR 9305, Applied Physics Laboratory, University of Washington, August 1993.
- [11] S. Cho, Y.T. Chan. A total least squares algorithm for a target localization using multiple sonobuoys, UDT'2002, Korea.
- [12] 赵俊渭, 阎宜生, 丁玮, 张全. 双基地声呐的性能与展望. 声学与电子工程, 1991, (3): 29-33.
- [13] 张全. 双基地声呐性能研究. 西北工业大学硕士学位论文, 1993.
- [14] 阎宜生, 丁玮, 赵俊渭. 双基地声呐作用距离估计. 西北工业大学学报, 1996, (4): 545-547.
- [15] 凌国民. 海洋水声监视技术. 声学与电子工程, 2001, (1): 1-6.
- [16] 霍国正. 多基地声呐的实验研究. 声学与电子工程(增刊), 2002, 4-7.
- [17] 张小凤. 双/多基地声呐定位及目标特性研究. 西北工业大学博士学位论文, 2003.
- [18] 张小凤, 赵俊渭, 王荣庆. 双基地声呐定位精度和算法研究. 系统仿真学报, 2003, 15(10): 1471-1473.
- [19] 王成. 双/多基地主动声呐目标特性研究. 西北工业大学硕士论文, 2004.
- [20] 孙志洁. 双/多基地声呐定位算法研究. 西北工业大学硕士论文, 2005.
- [21] 赵宝庆. 双基地声呐混响特性研究. 西北工业大学硕士论文, 2006.
- [22] 赵宝庆, 王英民. 双基地声呐海面散射模型及仿真. 情报指挥控制系统与仿真技术, 2005, (6).
- [23] 赵宝庆, 王英民. 双基地海底散射与角度配置关系仿真研究. 计算机仿真, 2005, (9).
- [24] 刘若辰. 多基地声呐定位算法研究. 西北工业大学博士论文, 2012.

- [25] 苟艳妮. 新型航空声呐浮标算法及应用. 西北工业大学博士论文, 2014.
- [26] 李东洋. 典型编队条件下多基地声呐性能分析. 西北工业大学硕士论文, 2015.
- [27] 刘若辰, 王英民, 朱婷婷. T-R²配置型多基地声呐距离信息定位算法精度分析. 2009年中国东西部声学学术交流会, 2009.
- [28] 王成, 王英民, 陶林伟. 多基地声呐距离信息定位算法研究及精度分析. 系统仿真学报, 2009, 21(6): 1570-1572.
- [29] 孙志洁, 王英民. 双基地声呐两坐标三维目标定位算法精度分析. 计算机仿真, 2006, 23(2): 14-17.
- [30] 王成, 王英民, 陶林伟. 数据融合与双基地声呐性能. 电声技术, 2008, 32(2): 40-42.
- [31] 徐贵英, 丁玮, 阎宜生. 双基地声呐目标特性实验研究. 西北工业大学学报, 1997, (3): 476-480.
- [32] 赵俊渭. 收发分置水下目标声散射特性的实验研究. 声学学报, 1997, (2): 123-131.
- [33] Ruo Chen Liu, Yingmin Wang, Tian Gan. Research on location algorithm with linear least squares method for bistatic sonar. PEITS 2010, Nov.20-21, 2010, Shenzhen, China, 195-198.
- [34] 刘若辰, 王英民. 一种改进的双基地声呐马尔可夫定位算法. 信息与控制, 2012, (1).
- [35] 刘若辰, 王英民, 张群. 基于线性最小二乘估计的双基地声呐定位优化算法. 鱼雷技术, 2011, (6).
- [36] 刘若辰, 王英民. 声呐浮标空投入水受力特性仿真研究. 电声技术, 2011, (10).
- [37] 刘若辰, 王英民, 甘甜. 基于线性最小二乘方法的多基地声呐定位算法. 电声技术, 2011, (6).
- [38] 刘若辰, 王英民, 朱婷婷. 配置型多基地声呐距离信息定位算法精度分析. 声学技术, 2009, (6).
- [39] 甘甜, 王英民, 刘若辰. 基于泰勒分布线阵特殊旁瓣技术的研究. 电声技术, 2009, (10).
- [40] 甘甜, 王英民, 刘若辰. 基于仿真退火算法的任意阵列带宽波束形成. 计算机仿真, 2010, (3).
- [41] Qi Hua, Zhu Tingting, Liu Ruo Chen. The research of optimization algorithm in the sonar emergency system. WICOM2009, Sep.24-26, Beijing, China.
- [42] 2000—2035年美国海军技术. 华盛顿: 美国国家科学出版社, 1997.
- [43] 阎福旺, 刘载芳, 荣新光. 现代声呐技术. 北京: 海洋出版社, 1998.
- [44] Wang Beide. The nature of bistatic and multistatic radar. Proceedings 2001CIE International Conference on radar, 2001, 882-884.
- [45] 田孝华. DS-CDMA蜂窝网中无线定位与参数估计技术. 西安电子科技大学博士学位论文, 2003.
- [46] Sergey Simakov. Localization in airborne multistatic sonars. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2008, Vol.33, No.3, 278-288.
- [47] 孙勇, 赵俊渭, 张小凤. 双基地声呐定位算法的研究与比较. 计算机仿真, 2006, 23(9): 129-132.
- [48] 孙勇, 赵俊渭, 张小凤. 关于双基地声呐定位及其优化算法的研究. 系统仿真学报, 2007, 19(4): 725-728.