

基于舷侧阵声纳的鱼雷远程自导性能研究*

周 涛¹ 杨秀庭^{2†} 王 军²

(1 海军装备研究院 北京 100161)
(2 海军大连舰艇学院 战术学博士后流动站 大连 116018)

摘要 针对鱼雷的远程自导问题,研究了恶劣水文条件下浅海波导中鱼雷舷侧阵声纳对主动声纳信号的探测能力和测向精度,计算结果表明:在潜艇反舰作战中,通过利用水面舰艇发射的主动声纳信号,可实现潜射鱼雷对目标的远程被动探测,其被动测向精度一般可满足自导精度要求。

关键词 鱼雷自导; 舷侧阵声纳; 作用距离; 方位估计

中图分类号: TB55 O427.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2012)01-0049-05

Investigation of torpedo long-range homing performance by using flank array sonar

ZHOU Tao¹ YANG Xiuting² WANG Jun²

(1 Naval Academy of Equipments, Beijing 100161)
(2 Postdoctoral Station of Tactics, Navel Academy, Dalian 116018)

Abstract The capability of long-range homing forms a key problem in torpedo engineering. In this paper, the detection range and bearing accuracy of active signals by using torpedo flank array sonar under atrocious propagation conditions in shallow water have been investigated for the long-range homing performance of torpedo. The numerical results show that the surface ship can be easily detected by torpedo flank array sonar at long-range distance by interception of the transmitted active pulse signals, and the bearing accuracy can also meet the need for torpedo self-guidance.

Key words Torpedo homing, Flank array sonar, Detection range, Bearing estimation

1 引言

长期以来,鱼雷一直是海军主要的水下作战兵器,在海军遂行反潜、反舰、鱼雷防御等作战中扮演着十分重要的角色。为有效提高鱼雷的综合作战性能,近年来,远航程、大航深、

多速制鱼雷已成为世界各国鱼雷工程领域的研究重点^[1]。

鱼雷自导距离是鱼雷的关键战术指标之一,对于提高鱼雷毁伤能力和保护发射平台的安全都具有十分重要的作用。目前的声自导鱼雷,其主被动自导距离一般不超过2~3 km^[2]。对潜艇

2011-07-18 收稿; 2011-10-12 定稿

*国家自然科学基金资助项目(11074308); 中国博士后基金第三批特别资助项目(201003754)

作者简介: 周涛(1972-), 男, 浙江宁波人, 工学硕士, 高级工程师, 研究方向为鱼雷自导及信号处理。

杨秀庭(1973-), 男, 副教授, 硕士生导师。

王军(1972-), 男, 副教授, 博士研究生。

†通讯作者: 杨秀庭, E-mail:yangxiuting@yahoo.com.cn

而言,为提高潜射鱼雷的杀伤力,潜艇必须在与目标较为接近的有利阵位上发射鱼雷,但这会增加潜艇被敌方反潜兵力发现的概率,导致潜艇战场生存概率降低。为解决这一矛盾,必须积极探索可有效提高鱼雷声自导距离的技术与方法。

此外,近四十年来,随着潜艇声隐身技术所取得的长足进步,迫使水面舰艇大力发展中低频(低于10kHz)主动声纳技术^[3]。可以预见,在未来海上作战中,中低频主动声纳将成为水面舰艇及编队最主要的对潜探测手段。

主动声纳发射的脉冲信号具有声源级高、传播距离远、易于探测等特点,有可能成为鱼雷实施远程导引的有效目标信号源。因此,研究如何利用水面舰艇的主动声纳信号来提高鱼雷的自导距离,以解决鱼雷远程自导难题,是鱼雷工程技术领域面临的新课题,具有重要的现实意义。

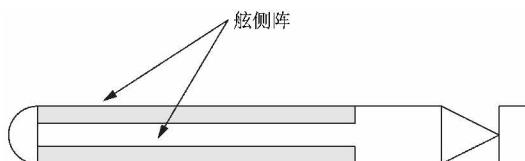


图1 鱼雷舷侧阵声纳示意图

目前,布设于鱼雷雷顶的自导声纳,其工作频段较高(20~40kHz),难以有效探测水面舰艇发射的中低频主动声纳信号。因此,本文提出了一种使用鱼雷舷侧阵声纳(如图1所示)进行远程自导的方法,并以浅海作战使用为背景,从理论上分析了鱼雷中频舷侧阵声纳对主动脉冲信号的被动探测性能,计算了声纳作用距离和目标测向精度,验证了该方法的有效性,为解决鱼雷的远程自导难题提供了研究思路。

2 鱼雷舷侧阵声纳的数据模型

鱼雷舷侧阵声纳的阵元通常以等间隔方式均匀敷设于鱼雷的两舷,可看成均匀线列阵。在远场平面波条件下,当存在J个目标时,M元鱼雷舷侧阵声纳的数据接收模型可表示为

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta})\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t). \quad (1)$$

式中,t时刻的数据、噪声和信号向量分别为

$$\mathbf{x}(t) = [x_1(t), \dots, x_M(t)]^T;$$

$$\mathbf{n}(t) = [n_1(t), \dots, n_M(t)]^T;$$

$$\mathbf{s}(t) = [s_1(t), \dots, s_J(t)]^T.$$

均匀线列阵的阵列流形矩阵 $\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta})$ (简写为 \mathbf{A})为

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1), \dots, \mathbf{a}(\theta_J)]^T. \quad (2)$$

式中,多目标的参数向量为 $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \dots, \theta_J]^T$ 。

$$\mathbf{a}(\theta) = \left[1, e^{-j\frac{2\pi d \cos \theta}{\lambda}}, \dots, e^{-j\frac{2\pi(M-1)d \cos \theta}{\lambda}} \right]^T. \quad (3)$$

根据式(1),鱼雷舷侧阵声纳通过波束形成和平方积分等信号处理方法对接收数据进行空时联合处理,便可实现目标的被动检测和方位估计。

下面,我们以常规波束形成为例,通过作用距离和测向精度两个关键战术指标,来分析鱼雷舷侧阵声纳的自导性能。

3 鱼雷自导性能分析

鱼雷自导性能与实际战场环境是密切相关的,因此,分析鱼雷的自导性能,必须基于一定的海区环境进行。实际上,鱼雷的作战使用环境复杂多样,可以是潜艇或水面舰艇的所有活动海区。冷战结束后,潜艇的主要作战海区已从深海大洋转变为深度一般不超过200m的浅海水域。为贴近实际使用背景,本文以浅海作为鱼雷作战使用的主要环境,分析鱼雷舷侧阵声纳的被动自导性能。

浅海水声环境非常复杂,其水文通常具有强烈的时间变化特征,难以穷举。为分析鱼雷舷侧阵声纳的自导探测性能,我们选取一种水声传播条件较为恶劣的浅海环境:海深95m,底质为砂-粘土,声速剖面如图2左侧所示。发射深度为10m,中心频率为6kHz的窄带主动声纳信号,其传播损失^[4]如图2右侧所示。从图2可以看出,由于声波与海面、海底的强烈交互作用,声场强度具有明显的跨度特征,这会导致在鱼雷接近目标的过程中,舷侧阵声纳的接收信号会存在较强的起伏。

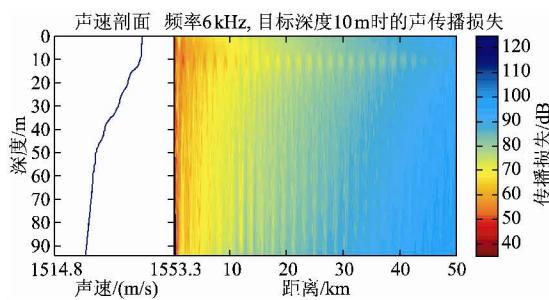


图2 一种浅海环境中的水声传播

3.1 作用距离

鱼雷舷侧阵声纳对主动声纳脉冲信号实施被动探测时,其作用距离可通过声纳方程进行分析。由于被动声纳通常采用波束形成和能量积分进行信号的空时联合处理,此时声纳方程可写为

$$SL - TL - (NL - AG) = DT - 5 \log_{10} BT. \quad (4)$$

式中, SL 为目标声源级, 由发射声信号或辐射噪声的强度决定; TL 为声传播损失; NL 为 1 Hz 带宽内背景噪声的谱级; AG 为空间处理增益; DT 为检测阈; BT 为信号的时间带宽积。

式(4)表明: 主动声纳信号强度、海洋水声环境、鱼雷自噪声强度及指向性、工作带宽及信号处理方法、检测置信级等因素都会影响鱼雷舷侧阵声纳的作用距离。

根据惯例, 我们取检测概率为 0.9 时所对应的目标检测距离(给定虚警概率)作为声纳的作用距离。

3.2 测向精度

利用鱼雷舷侧阵声纳的测量数据, 通过常规波束形成可估计目标方位。

通过控制各阵元的时间延迟量, 常规波束形成通过波束空间扫描实现目标检测与方位估计, 即

$$\hat{f}(\theta) = \mathbf{a}^H \hat{\mathbf{R}} \mathbf{a}. \quad (5)$$

式中, $\hat{f}(\theta)$ 为常规波束形成的输出功率; $\hat{\mathbf{R}}$ 为阵列数据的协方差矩阵, 在实际信号处理中, 该矩阵是未知的, 当满足遍历性条件时, 由 N 个独立抽样所得的估计为

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathbf{x}(n) \mathbf{x}^H(n). \quad (6)$$

为便于鱼雷舷侧阵声纳测向精度的理论分析, 需作如下假设:

- (1) 各阵元所接收噪声为空间均匀、互不相关的零均值高斯随机噪声, 服从 $N(0, \sigma_n^2)$ 分布;
- (2) 噪声和信号相互独立。

根据上述假设, 鱼雷舷侧阵声纳的协方差矩阵为

$$\mathbf{R} = E[\mathbf{x}(t) \mathbf{x}^H(t)] = \mathbf{A} \mathbf{P} \mathbf{A}^H + \sigma_n^2 \mathbf{I}. \quad (7)$$

式中, $\mathbf{P} = E[\mathbf{s}(t) \mathbf{s}^H(t)]$ 为信号协方差矩阵。

在多目标情况下, 各目标的方位满足式(6), 只需用式(7)中的协方差矩阵 \mathbf{R} 代替其估计 $\hat{\mathbf{R}}$ 即可。此时, 第 k ($k = 1, \dots, J$) 个目标方位估计的渐近误差可表示为^[5]

$$\text{var}(\theta_k) \approx \frac{\mathbf{a}^H \mathbf{R} \mathbf{a} \cdot \mathbf{d}_k^H \mathbf{R} \mathbf{d}_k - |\mathbf{d}_k^H \mathbf{R} \mathbf{a}|^2}{2N \cdot \{\mathbf{d}_k^H \mathbf{R} \mathbf{d}_k + \text{Re}[\mathbf{h}_k]\}^2}. \quad (8)$$

这里需要指出: 式(8)适用于任意几何构形的声纳阵列, 并不仅局限于线列阵。

此外, 还可进一步给出目标方位估计方差的 Cramer-Rao 下界为^[6]

$$\text{CRB}(\theta) = \frac{\sigma_n^2}{2N} \left\{ \text{Re}[U \odot (D^H P_A^\perp D)^T] \right\}^{-1}. \quad (9)$$

式中, “ \odot ”为 Khatri-Rao 积,

$$\begin{aligned} U &= P(A^H A P + \sigma_n^2 I)^{-1} A^H A P; \\ P_A^\perp &= I - A(A^H A)^{-1} A^H; \\ D &= \left[\frac{\partial \mathbf{a}}{\partial \theta^{(1)}}, \dots, \frac{\partial \mathbf{a}}{\partial \theta^{(J)}} \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

4 仿真分析

根据上述理论推导, 下面对鱼雷舷侧阵声纳的远程自导性能进行举例分析。

算例: 鱼雷采用 32 元(间距 0.25 m) 中频均匀舷侧阵实施水下目标的探测、定位与跟踪, 鱼雷计算参数见表 1; 主动声纳发射阵深为 10 m, 其发射信号的参数具体见表 2^[7]。

根据图 2 的浅海传播环境及表 1、2 中给定的计算参数, 可计算浅海波导中鱼雷舷侧阵声纳对主动声纳信号的检测能力, 如图 3 所示。

表1 鱼雷计算参数

参数	单位	取值
鱼雷自噪声谱级 (@1kHz)	dB	130
鱼雷航行深度	m	40
舷侧阵空间增益	dB	6
舷侧阵积分时间	s	2
舷侧阵工作频带	kHz	6~8
虚警概率	/	$10^{-6}, 10^{-5}, 10^{-4}$

表2 目标信号参数

参数	单位	取值
主动声纳脉冲宽度	s	1
主动声纳脉冲形式	/	FM
主动声纳脉冲带宽	Hz	600
主动声纳脉冲中心频率	kHz	6.7
主动声纳脉冲声源级	dB	227

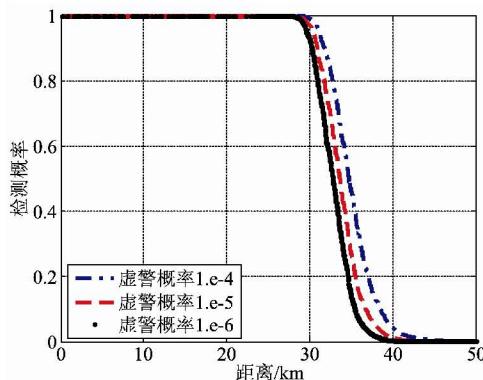
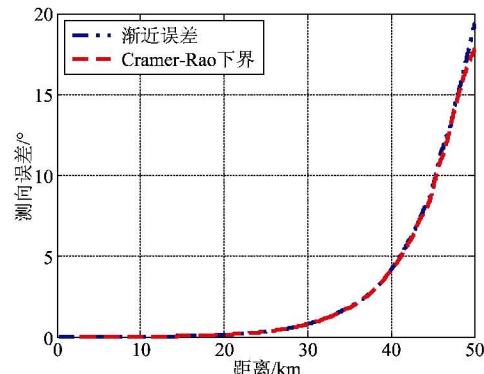


图3 鱼雷舷侧阵声纳对不同距离上主动声纳信号的检测概率

从图3可以看出：检测概率取值为0.9时，在不同的虚警概率(10^{-4} , 10^{-5} 和 10^{-6})条件下，利用式(4)计算鱼雷舷侧阵声纳对声源级为227 dB的主动声纳信号的作用距离，分别为31.8 km、30.9 km 和 30.3 km，远大于对噪声目标的检测能力(通常仅为数公里)，因此，通过检测水面舰艇发射的主动声纳信号，潜射鱼雷使用舷侧阵声纳即可实现目标的远程被动探测，从而为鱼雷远程自导的实现提供物理基础。

取检测概率 $P_D = 0.9$ ，虚警概率 $P_{FA} = 10^{-5}$ ，假设因测频误差导致的增益损失为3 dB，由式(8)、(9)计算鱼雷舷侧阵声纳对声源级为227 dB的主动声纳信号的测向误差如图4所示。

由图4可知：采用常规波束形成时，鱼雷舷侧阵声纳测向误差的渐近值和理论值十分接近。

图4 鱼雷舷侧阵声纳的测向误差($P_D = 0.9, P_{FA} = 10^{-5}$)随目标距离的变化

当目标处于声纳作用距离之内(由图3计算结果，此时水面舰艇至鱼雷的水平距离小于30.9 km)，根据式(8)计算得到的渐近测向误差小于0.96°，理论误差小于0.93°，这说明常规波束形成具有较高的目标测向精度，一般可满足鱼雷自导对测向精度的要求(这里需要指出的是，该结论仅针对平面波假设成立的情况，并未考虑声波水平折射效应对测向精度的影响)。

5 结论

本文针对潜艇反舰作战中潜射鱼雷的远程自导问题，从作用距离和测向精度两个方面分析了潜射鱼雷利用舷侧阵声纳对水面舰艇主动声纳脉冲信号的基本探测性能，并以一种浅海传播环境为例进行了计算，结果表明：

(1) 在水声传播条件恶劣的浅海波导中，鱼雷舷侧阵声纳对水面舰艇中频主动声纳信号的作用距离通常可达数10 km。这说明发展基于舷侧阵声纳的鱼雷自导技术，以提高鱼雷的自导距离，在理论上是可能的；

(2) 鱼雷中频舷侧阵声纳的测向精度受接收信噪比的影响明显，当目标处于声纳作用距离之内时，测向精度可满足鱼雷自导所需的精度要求。

此外，还应指出两点：(a) 主动声纳信号具有脉冲特点，在时间上是间歇的，因此，需要发展专门的鱼雷自导逻辑；(b) 受声纳构造和鱼雷自噪声影响，鱼雷舷侧阵声纳存在艏部弱视区和艉部盲区，无法做到目标的全景探测，因此，鱼

雷远程自导的导引弹道也是必须要研究解决的课题。

参 考 文 献

- [1] 李志舜. 鱼雷自导信号与信息处理技术[M]. 陕西西安: 西北工业大学出版社, 2004:4-9.
- [2] 孟庆玉, 张静远, 宋保维. 鱼雷作战效能分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003:277-281.
- [3] ASHLEY W. Sonar for Practising Engineers[M]. 3rd Edition, London England: John Wiley&Sons Press, 2002:156-165.

- [4] PORTER M.B. and BUCKER H.P. Gaussian Beam Tracing for Computing Ocean Acoustic Fields[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1987, 82(4):1349-1359.
- [5] YANG X T and ZHAO X Z. Performance Analysis of Pulse Signal Detection by Using Torpedo Flank Array[C], International Conference on Information Technology and Management Engineering (ITME2011), 2011:79-82.
- [6] HAWKES M. and NEHOARI A. Acoustic Vector-sensor Beamforming and Capon Direction Estimation[J], IEEE Trans. On Signal Processing, 1998, 46(9):2291-2304.
- [7] AMICO A D and PITTINGER R. A Brief History of Active Sonar[C], Aquatic Mammals 2009, 35(4):426-434.

第四届海峡两岸声学技术交流研讨会在杭州成功召开

2008 年起两岸三地即沪港台声学会之间在上海声学会名誉理事章奎生教授的倡议联络下, 经沪港台三地声学会的共同商议确定了开展学术交流研讨会的机制。2008 年 6 月中旬、2009 年 11 月下旬和 2010 年 7 月下旬先后在香港理工大学、台北科技大学和上海现代设计集团章奎生声学设计研究所召开了前 3 届两岸三地声学技术交流研讨会。今年的第四届会议经沪、港、台三地声学会商定, 确定 10 月 28~30 日在杭州市召开, 并由浙江省声学会和上海市声学会联名主办, 会议名称由原来的“两岸三地”改为“海峡两岸声学技术交流研讨会”, 参会代表也由原来仅沪、港、台三地扩展增加至台湾、香港和内地的 10 个城市, 代表人数由原前 3 届的数十人增加到一百人的规模, 表明两岸声学技术交流活动已经受到更多的关注和重视。

本次第四届海峡两岸由上海现代设计集团章奎生声学设计研究所和同济大学声学所合作协办, 由浙大建筑技术研究所和杭州爱华仪器有限公司承办。章奎生教授和章奎生声学设计所具体负责了两岸 5 个声学会的协调联络和筹备组织工作, 包括: 会议主题的确定; 专题学术报告的约请和落实; 会议论文集及纪念册的征稿、编辑和出版; 会议经费的筹集和会议程序的安排等, 并为论文集写了前言, 主持了会议的开幕式和闭幕式。

本届会议的主题是“环境噪声、交通噪声及城市声环境的保护与管理”, 会议内容包括专题学术报告、技术交流研讨和参业技术参观 3 个方面。台湾音响学会和台

湾振动噪音工程学会提出了“高铁运营期间噪音防治管理与执行”(台湾高铁公司李允中主任) 和“梯田式音乐厅室内声场设计策略”(台北科技大学建筑研究所江维华教授) 两篇报告; 香港音响学会提出了“对付高楼密集城市交通噪声的迷思与真相”(香港环保署首席环保主任杨国良先生) 和“噪音地图的应用与效能”(香港声学会前会长张迺聪) 两篇报告; 内地专家提出了“轨道交通噪声的分析与控制技术研究”(上海交通大学蒋伟康教授)、“交通噪声治理中若干问题刍议”(上海同济大学王季卿教授)、“高架轨道交通减振垫降噪效果研究”(同济大学毛东兴教授)、“城市轨道交通隔振技术的实践与思考”(北京劳保所邵斌总工) 和“低频噪声效应及评价”(浙江大学翟国庆副教授) 等 5 篇报告。报告内容精彩丰富, 应邀专家都作了精心准备, 交通噪声振动控制技术成为报告和研讨的突出重点, 反映了现阶段城市声环境保护的热点。与会代表开展了认真热烈的互动交流讨论, 会议还组织参观了浙江大学声学实验室和杭州爱华声学仪器公司。

会议既促进了两岸声学专业界的沟通交流, 也增进了交往和情谊。两岸与会代表一致认为本届会议开得十分成功, 收获很大, 在会议闭幕式上两岸学会之间还互赠了纪念品, 并商定明年金秋时光在香港召开第五届会议时再见面。

(上海声学学会)