

◇ 研究报告 ◇

浅海动态环境下蛙人探测声呐布放深度优化技术*

岳文蓉^{1,2} 杨娟^{1†} 许枫¹

(1 中国科学院声学研究所海洋声学技术实验室 北京 100190)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 蛙人探测声呐的探测性能及作用距离不仅与目标海区的声速剖面 and 自身性能参数有关, 还与其布放深度有关, 其布放深度的选择对于水下目标探测具有重要意义。以射线跟踪理论为基础, 建立了基于探测概率感知的声呐性能评估模型; 提出了一种声呐布放深度自适应优化算法, 该算法以不同准则进行两次筛选优化后可得到声呐最佳布放深度。仿真结果表明: 在不同水文情况下, 所提优化算法可以有效选择最优布放深度, 进而提高声呐对目标的探测性能。

关键词: 蛙人探测声呐; 布放深度; 探测概率; 浅海

中图分类号: P756.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2023)02-0243-06

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2023.02.006

Deployment depth optimization method of diver detection sonar in dynamic shallow sea

YUE Wenrong^{1,2} YANG Juan¹ XU Feng¹

(1 Ocean Acoustic Technology Laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The detection performance and detecting range of diver detection sonar are not only related to the sound speed profile and work parameters, but also related to its underwater depth. It is important for underwater target detection performance to select deployment depth. The sonar performance evaluation model using detection probability perception is established based on ray tracing theory. An adaptive optimization algorithm for sonar underwater depth is proposed. The optimal underwater depth of sonar can be obtained by twice screening with different criteria. The simulation results show that the optimization algorithm is effective and can improve the target detection performance of the sonar.

Keywords: Diver detection sonar; Underwater depth; Detection probability; Shallow sea

2021-12-20 收稿; 2022-02-24 定稿

*国家重点研发计划项目 (24103), 海南省重大科技计划项目 (ZDKJ2020010)

作者简介: 岳文蓉 (1997-), 女, 山东聊城人, 博士研究生, 研究方向: 信号与信息处理。

†通信作者 E-mail: yangjuan@mail.ioa.ac.cn

0 引言

以水下蛙人、水下无人平台为代表的水下运动小目标是港口及近岸水域反恐的重要防范对象。为了保障我国经济的发展和社会的安定,迫切需要发展智能化的水下安保系统,保障沿海设施的安全。蛙人探测声呐不仅可以探测水下蛙人,还可实现自动报警、监控及跟踪。在对目标进行搜索的过程中,蛙人探测声呐的探测概率会受到作用距离的直接影响,而作用距离又会随着其布放深度的不同产生差异。因此有必要研究在给定环境信息情况下,最佳声呐布放深度的计算方法。

目前已有学者对声呐最佳布放深度的获取方法展开研究。郁红波等^[1]通过潜艇在不同深度航行的概率分布,计算出吊放声呐不同入水深度下的平均探测距离,得到了不同声速剖面下吊放声呐的最佳入水深度;战和等^[2]提出的方法能够自动识别声速剖面类型并利用规律快速给出吊放声呐最佳工作深度;熊雄等^[3]以等效作用距离最大准则为基础,提出距离调节因子的声呐工作深度优化选择模型,得到不同战术任务下声呐的最优工作深度。上述研究都是基于声呐的作用距离最大准则选择最佳工作深度,实际声呐应用中常常对某海区固定区域进行探测,以声呐对目标区域的探测概率最大为准则去选择最佳工作深度暂时还未见报道。

本文提出一种声呐布放深度自适应调整算法,该算法以声呐对目标区域的探测概率最大为准则,使得声呐对目标位置的探测概率达到最高,且又能保证声呐的作用距离尽可能的远。仿真考虑浅海动态环境变化尤其是声速剖面变化对蛙人探测声呐性能影响,使用所提优化算法调整声呐布放深度。

1 问题描述

假设目标位置已知,当浅海海洋环境变化时,声呐发射的声信号传播路径改变会影响声呐方程中的传播损失项,从而影响声呐对目标的探测性能。研究表明声呐的探测性能受其布放深度的影响较大,因此适当调整布放深度可优化其性能。以图1为研究思路,其中基于探测概率感知的声呐性能评估模型是计算声呐最佳布放深度的基础,具体过程将在第2节给出介绍。

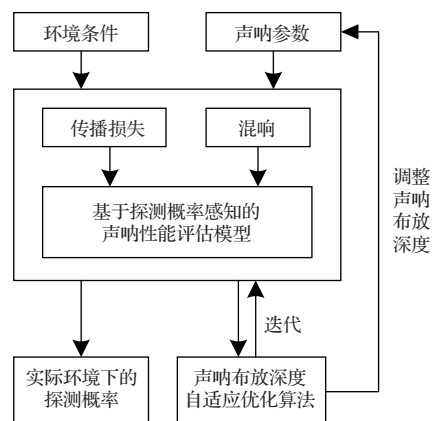


图1 声呐布放深度优化技术框架图

Fig. 1 Sonar deployment depth optimization framework diagram

2 算法模型

2.1 基于探测概率感知的声呐性能评估模型

为了直观、定量地对声呐的探测性能进行评估,以射线理论为基础建立基于探测概率感知的声呐性能评估模型。将声呐工作区域的目标海区栅格化,利用声呐方程将水声环境和声呐系统结合,计算每个栅格内的信号余量;然后根据信号余量与探测概率间的对应关系,求出每个栅格内声呐对目标的探测概率,其大小反映了声呐的探测性能。

2.1.1 基于射线理论的传播损失模型

假设声线声压 $u(s, n)$ 表示为

$$u(s, n) = A(s) \phi(s, n) e^{i\omega\tau}, \quad (1)$$

其中, A 为沿声线方向的振幅; ϕ 为垂直于声线中心方向的位移; s 为沿声线方向的弧线; n 为垂直于声线中心方向的位移; ω 为圆频率; τ 为沿声线的传播时间。

在柱坐标系下,控制方程为

$$\begin{cases} \frac{dz}{ds} = c\zeta(s), \\ \frac{d\zeta}{ds} = -\frac{1}{c^2} \frac{dc}{dz}, \\ \frac{dr}{ds} = c\xi(s), \\ \frac{d\xi}{ds} = -\frac{1}{c^2} \frac{dc}{dr}, \end{cases} \quad (2)$$

其中, r 和 z 分别表示水平距离和深度; ζ 和 ξ 为与掠射角有关的两个中间变量,

$$\zeta = \frac{\sin \theta}{c}, \quad \xi = \frac{\cos \theta}{c}, \quad (3)$$

其中, θ 为掠射角; c 为声速。

高斯射线束的变化过程通过引入两个变量 p 和 q 来控制, 如式 (4)、式 (5) 所示:

$$\frac{dq}{ds} = cp(s), \quad (4)$$

$$\frac{dp}{ds} = \frac{c_{nn}}{c^2(s)} q(s), \quad (5)$$

其中, c_{nn} 是声速在声线路径法线方向上的二阶导数。因此, ϕ 、 A 可表示为高斯声线宽度 W 的函数:

$$\begin{cases} \phi(n, s) = \exp[-(n/W)^2], \\ A(s) = \frac{1}{(2\pi)^{0.25}} \sqrt{\frac{c}{c(0)} \frac{\delta\alpha}{r} \frac{2 \cos \alpha}{W}}, \\ W = v(s) \frac{\delta\alpha}{c(0)}, \end{cases} \quad (6)$$

其中, $\delta\alpha$ 为临近声线的夹角。

然后把 $u_i(s, n)$ 转化为柱坐标系下的声压 $u_i(r, z)$, 用携带能量的声线叠加的到最后的声场。本文采用非相干的计算方式, 声压 p_s 为

$$p_s(r, z) = \left[\sum_{i=1}^N 2 \sin^2 \left(\frac{wz_0 \sin \theta}{c_0} \right) |u_i(r, z)|^2 \right]^{-1}, \quad (7)$$

其中, z_0 为声呐的入水深度; c_0 为声源处的声速。

传播损失 TL 可由式 (8) 计算:

$$TL = 20 \lg \left| \frac{p(r, z)}{p(1, z)} \right|. \quad (8)$$

2.1.2 探测概率

信号余量将水文、地理环境和声呐系统均考虑在内, 其结果在一定程度上反映了声呐系统性能。蛙人探测声呐大多工作在浅海或极浅海, 受混响的影响严重, 故在计算时选择混响受限的主动声呐方程,

$$SE(r, z_s, z_g) = SL - 2TL(r, z_s, z_g) + TS - NL(r, z_s, z_g) - DT, \quad (9)$$

其中, SE 为信号余量; SL 为声源级; TS 为目标强度; DT 为检测阈; RL 为混响级, 其计算可以参照文献 [4]; r 表示距离; z_s 表示声源深度; z_g 表示目标深度; 总噪声级 NL 可表示为

$$NL = 10 \lg \left(10^{\frac{AN-AG_N}{10}} + 10^{\frac{RL-AG_R}{10}} \right), \quad (10)$$

其中, AN 为环境噪声级, 其计算如式 (11); AG_N 为接收阵列的噪声增益; AG_R 为接收阵列的混响增益, 两者的计算参照文献 [5]。

$$N(f) = 10 \lg f^{-1.7} + 6S + 55, \quad (11)$$

式 (11) 中, f 为频率, 单位 kHz; S 为海况等级。

Ferla 等 [6] 将探测概率与信号余量的关系表示为式 (12), 使用该式将信号余量与探测概率相关联, 求得每个栅格内声呐对目标的探测概率:

$$p_D(SE(r, z_s, z_g)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{SE} \exp \left[-\frac{x^2}{2\sigma^2} \right] dx, \quad (12)$$

其中, SE 为前一部分求出的信号余量, 信号余量为 0 dB 是探测概率为 1/2。两者之间的关系如图 2 所示。

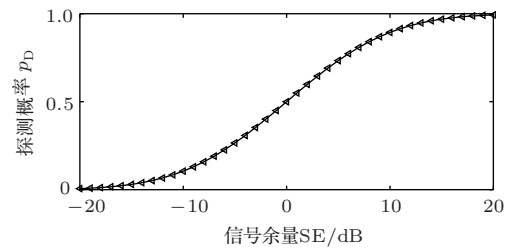


图2 信号余量与探测概率之间的变化曲线

Fig. 2 Change curve between signal excess and detection probability

2.1.3 等效作用距离

在计算得到探测概率后, 定义等效作用距离为探测概率在距离上的积分, 如式 (13) 所示, 将其作为度量依据。等效作用距离并不是声呐实际的作用距离范围, 而是对声呐探测能力的简单度量。

$$R(z_s, z_g) = \int_0^{+\infty} p_D(SE(r, z_s, z_g)) dr. \quad (13)$$

2.2 声呐布放深度自适应优化算法

以往研究主动声呐的最佳布放深度时, 通常以等效作用距离最大为准则选择最佳布放深度。这种做法存在一定的不合理性, 因为目标并不一定位于等效作用距离最大值所在的深度上, 通过该准则得出的数据不具有普遍性。本节考虑在浅海动态环境下, 假设目标位置已知, 计算蛙人探测声呐对目标的探测概率, 以不同的择优准则进行两次筛选得到声呐的最佳布放深度。图 3 为声呐布放深度自适应优化算法流程图。

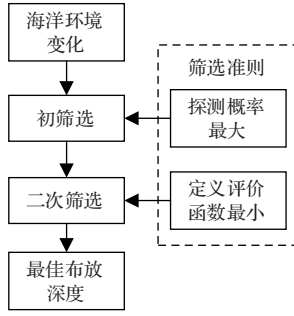


图3 声呐布放深度自适应优化算法流程图

Fig. 3 The flow chart of adaptive optimization algorithm sonar underwater depth

海洋环境发生变化后,为提高声呐的探测性能调整声呐的布放深度。第一次筛选过程在目标海区全深度以 Δz_s 为间隔取声呐可能的布放深度,利用式(12)计算所取各深度下的探测概率 p_D 。最后以声呐对目标位置处的探测概率最大为准则,选择次优深度区间,即

$$z_s^{\text{sub-opt}} = \arg \max_{z_s \in [0, z_g]} (p_D(z_s, r_g, z_g)), \quad (14)$$

其中, z_s 为声源深度, r_g, z_g 分别为目标在距离和深度方向上的位置。

第二次筛选过程在次优深度区间中依据相应准则寻找声呐的最佳布放深度,所用准则与探测概率最大准则略有不同。首先定义评价函数:

$$g = \alpha(1 - p_D) + \beta \sigma_{R_e}^2 + \delta \left(\frac{R - \bar{R}_e}{R} \right), \quad (15)$$

其中, $\bar{R}_e$ 为声呐的等效作用距离的均值, $\bar{R}_e = \{\bar{R}_{e1}, \bar{R}_{e2}, \dots, \bar{R}_{em}\}$; R_e^* 为归一化后的等效作用距离, $\sigma_{R_e}^2$ 为声呐归一化后等效平均距离的标准差, $\sigma_{R_e}^2 = \{\sigma_{R_{e1}}^2, \sigma_{R_{e2}}^2, \dots, \sigma_{R_{em}}^2\}$; m 为次优深度区间被划分的个数; R 为目标海区水平距离; α, β, δ 为加权系数,且有 $\alpha + \beta + \delta = 1$ 。

上述评价函数与声呐性能评估的3个参数有关:声呐对目标位置的探测概率反映了声呐对已知目标所处位置的探测性能;声呐的等效作用距离反映了声呐对试验海区的探测性能;等效作用距离的标准差反映了声呐对试验海区探测性能的稳定性。所以第二次迭代寻优过程要通过最小化评价函数值获得声呐的最佳布放深度:

$$z_s^{\text{opt}} = \arg \min_{z_s \in z_s^{\text{sub-opt}}} (g). \quad (16)$$

实际计算过程中,可根据实际需求调整加权系数选择达到择优目的。

3 数值仿真分析

3.1 典型声速剖面下的仿真分析

某近岸海域的海深大致在30 m,海底平坦。仿真声速剖面分别为等声速梯度分布、带有跃层声速梯度分布、正声速梯度分布以及负声速梯度分布时,使用所提布放深度优化算法调整声呐布放深度的有效性。图4为几种典型的声速剖面示意图。

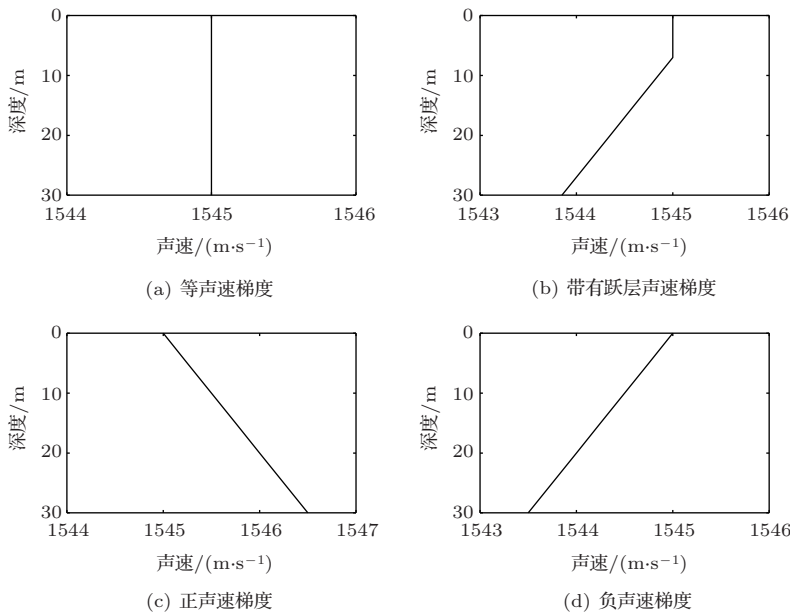


图4 典型声速剖面示意图

Fig. 4 Typical sound speed profiles

已知目标位于深度方向5 m、水平方向1330 m处,首先使用基于概率感知的声呐性能评估模型分别对上述水文情况下的声呐性能进行仿真分析。在仿真声场时,具体参数设置如下:声呐发射频率为80 kHz,声源深度为9 m,初始掠射角为 $\pm 3.75^\circ$ 。栅格划分步长在深度及水平方向分别0.1 m和1 m;海底平坦,地质为沙-泥地,声速为1579 m/s,海底吸收系数为 $k = 0.113 \text{ dB}/(\text{m} \cdot \text{kHz})$,密度为 $1.596 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。声源级设置为210 dB;目标为闭式蛙人,其强度为-25 dB;检测阈(DT)可由虚警概率 p_f 估算^[7],如式(17)所示,在虚警概率

$p_f = 10^{-4}$ 时DT约为10 dB。

$$\text{DT} \approx 10 \lg \left(\log_2 \frac{1}{2p_f} \right) - 0.8. \quad (17)$$

然后使用提出的声呐布放深度优化算法调整布放深度。初筛选以1 m为间隔取声呐可能的布放深度,得到次优深度区间。然后在次优深度区间进行第二次筛选寻优,以0.1 m为间隔取声呐可能的布放深度。评价函数中的加权系数分别为 $\alpha = 0.8$ 、 $\beta = 0.1$ 、 $\delta = 0.1$ 。计算得到各深度值对应的评价函数值后以最小化评价函数值为准则,得到声呐的最佳布放深度,将调整前后的布放深度以及分别对应的探测概率、处理时间总结为表1。

表1 典型声速剖面下的仿真结果

Table 1 Simulation results under typical sound speed profiles

典型声速剖面类型	调整前		调整后		处理时间/s
	布放深度/m	探测概率/%	布放深度/m	探测概率/%	
等声速梯度	9	69.69	已达到最优,不用调整		196
带有跃层	9	61.33	2	69.89	219
正声速梯度	9	69.15	6.4	69.91	201
负声速梯度	9	61.45	3.4	69.81	218

仿真结果表明:由于早晚午间、雨天晴天、不同风浪等环境变化导致声速剖面变化时,固定的声呐布放深度会影响对目标的探测性能。例如,声速剖面由等声速梯度变为带有跃层的声速梯度或者负声速梯度时,声呐对目标的探测概率分别降低了8.36%和8.24%,在使用所提声呐自适应调整算法调整布放深度后,探测概率得到提高。此外,该算法从得到声速剖面到计算出最佳布放深度,处理时间在3~4 min左右,能在较快时间内给出结果,方便工程应用。

3.2 实测声速剖面及地形下的仿真分析

2021年5月,试验团队在三亚某码头开展了蛙人探测声呐对小目标的探测试验。该海域海水受太阳照射温度升高,以及潮汐变化等环境因素使声速剖面一天内发生多次变化。试验过程中固定的布放深度导致声呐对目标的探测性能时好时坏,为了解决该问题使用所提布放深度优化算法调整声呐布放深度。

该海域某天的声速剖面变化如图5所示。已知目标分别位于深度1 m和10 m处,其位置在该海域

的地形图中标记,如图6所示。由式(12)可分别求得不同水文时声呐对不同目标的探测概率,然后使用提出的优化算法计算声呐最优布放深度,仿真条件与3.1节相同。将调整前后的布放深度以及分别对应的探测概率、处理时间总结为表2和表3。

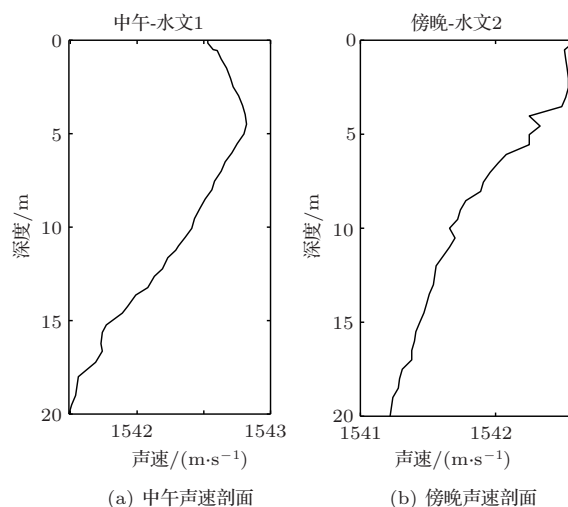


图5 某海域水文变化

Fig. 5 The sound speed profile changes in a certain sea area

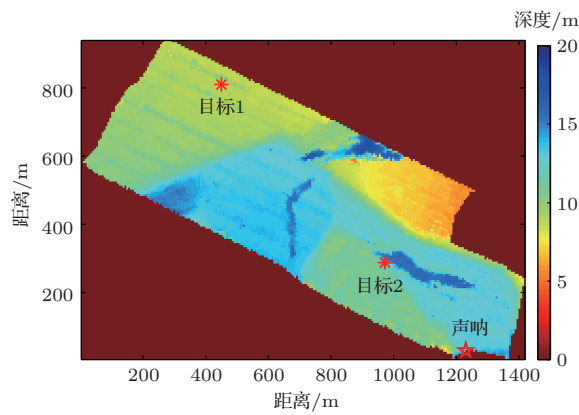


图6 目标位置

Fig. 6 The target position

表2 目标1的仿真结果

Table 2 Simulation results of the first target

目标1	调整前		调整后		处理 时间/s
	布放 深度/m	探测 概率/%	布放 深度/m	探测 概率/%	
水文1	7	64.6	3.5	71.73	119
水文2	7	74.67	已达到最优,不用调整		107

表3 目标2的仿真结果

Table 3 Simulation results of the second target

目标2	调整前		调整后		处理 时间/s
	布放 深度/m	探测 概率/%	布放 深度/m	探测 概率/%	
水文1	13	63.26	10.9	81.44	103
水文2	13	74.11	7.6	81.2	102

仿真结果表明:已知试验海域的地形,由于潮汐、风浪等环境变化导致声速剖面改变时,声呐布放深度自适应优化算法可快速有效调整声呐布放深度。在声速剖面由水文2变化至水文1情况下,声呐在原布放深度对目标的探测概率降低至63.26%,调整后的探测概率为81.44%,声呐的探测性能大幅度提高。仿真过程中的处理时间为2 min左右,与3.1节处理时间相比降低。原因是处理时间与声呐所处海区的深度有关,深度越大,声呐布放深度自适应算法遍历次数越多,花时间越长。此外该优化算法还可用于:声呐布放海区调整时声呐最佳布放深度的

估计;声呐所处海洋环境发生任意变化后声呐最佳布放深度的估计等。

4 结论

声呐布放深度是影响声呐探测性能的重要因素,浅海环境变化导致探测性能降低时可通过调整布放深度改善。本文建立了基于探测概率感知的声呐性能评估模型,该模型可根据水声环境及声呐系统的工作参数定量地给出系统对特定区域内各处目标的探测能力;基于该模型提出了一种声呐布放深度自适应优化算法,该算法以两次不同准则的筛选确定声呐布放深度。由于海洋环境变化归根结底是声速剖面的改变,因此以几种典型声速剖面为例仿真验证了所提算法的有效性以及实时性;且在给定实测声速剖面及海底地形时,使用该算法得到的布放深度可将声呐对目标的探测概率最高提高18.18%。

参 考 文 献

[1] 郁红波,鞠京龙. 浅海条件下吊放声呐最佳入水深度的研究[J]. 电光与控制, 2021, 28(4): 106–110.
Yu Hongbo, Ju Jinglong. Optimal underwater depth of dipping sonar in shallow sea[J]. Electronics Optics & Control, 2021, 28(4): 106–110.

[2] 战和,金中原,杨日杰. 一种估计吊放声呐工作深度的简易方法[J]. 声学技术, 2016, 35(1): 29–32.
Zhan He, Jin Zhongyuan, Yang Rijie. Simple approach to getting working depth of dipping-sonar[J]. Technical Acoustics, 2016, 35(1): 29–32.

[3] 熊雄,单志超,吴芳,等. 水下目标探测中声呐工作深度优化选择[C]//2018年全国声学大会论文集. C水声工程和水声信号处理, 2018.

[4] Yue W, Yang J, Xu F, et al. The analysis of reverberation affected by tide changes in shallow water[C]. 2021 OES China Ocean Acoustics, 2021: 530–533.

[5] Jemmott C W, Stevens W K. The impact of reverberation on active sonar optimum frequency[C]. 161st Meeting Acoustical Society of America, 2011.

[6] Ferla C M, Porter M B. Receiver depth selection for passive sonar systems[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1991, 16(3): 267–278.

[7] Ainslie M A. Principles of sonar performance modeling[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2010.