

探雷声呐水雷发现概率仿真研究

李玉伟¹, 姜可宇¹, 黄建波²

(1. 海军工程大学, 湖北武汉 430033; 2. 北海舰队海情中心, 山东青岛 266200)

摘要: 以探雷声呐对目标的累积探测概率计算模型为主要研究对象。以累积探测概率的研究作为效能分析的基础, 针对发现概率定义不准确的问题对它提出了新的定义, 从而更好地实现对某次搜索过程中探雷声呐发现目标能力大小的仿真计算。通过对探雷声呐工作原理和工作过程的分析研究, 将连续多次探测到目标定义为发现目标一次的声呐操作过程与离散的 (λ, σ) 过程模型相结合, 在经典模型理论的基础上提出了适用于探雷声呐的累积探测概率计算模型。仿真结果表明, 该计算模型实现了对探雷声呐发现目标能力大小的量化分析, 为探雷声呐的作战使用与指挥决策提供了理论依据。

关键词: 探雷声呐; 累积探测概率; 发现概率; (λ, σ) 过程

中图分类号: TB533

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2015)-06-0505-05

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2015.06.007

Simulation research on the detection probability of mine-detection sonar

LI Yu-wei¹, JIANG Ke-yu¹, HUANG Jian-bo²

(1. Naval University of Engineering, Wuhan 430033, Hubei, China; 2. Sea Condition Center of North Sea Fleet, Qingdao 266200, Shandong, China)

Abstract: The article takes the cumulative detection probability of the mine-detection sonar target as the main research object. With the cumulative detection probability as the basis of performance analysis, a new definition of detection probability is presented, because the past definition was not accurate, to realize the better simulation calculation for the ability of mine-detection sonar in finding a target during a certain search process. Through the analysis of sonar working principle and process, the detected target is defined as the target that has been seen many times continuously in sonar operation process. Then, combining the target detection defined above with the discrete (λ, σ) process, the paper puts forward the simulation model of cumulative detection probability which is suitable for mine detection on the basis of classical model theory. The results of the simulation indicate that this method can realize quantitative analysis of the sonar ability in finding a target, and offer the theoretical basis for the mine-detection sonar operation and command decision-making.

Key words: mine detecting sonar; cumulative detection probability; detection probability; lamda-sigma process

0 引言

声呐发现概率在评估其作战效能方面具有重要作用。通过研究, 可以从理论上分析计算在某海域中, 声呐对指定目标的发现概率大小, 从而为声呐的作战使用提供重要依据。

发现概率的计算需要知道各状态下的瞬时探测概率和累积探测概率。瞬时探测概率是指某一时刻声呐对目标的检测概率。对某捷径航路上可能存在目标的瞬时探测概率进行积分, 就可以得到相应

的累积探测概率。在 Daniel H·Wagner 等人的著作中^[1], 考虑相邻多次探测之间相关性的情况下, 给出了 (λ, σ) 过程模型^[1]算法, 但此模型仅适用于瞬时探测概率序列呈单峰变化的情况。国内陈遵银等人介绍了“K out of N”模型和“双亮点假设”模型^[2], 这两种模型在累积探测概率的计算研究中都有较为广泛的应用。侯学隆等人^[3]应用“双亮点假设”模型具体分析了航空声呐对潜累积探测概率, 验证了此模型的可行性。在探雷声呐的探测过程中, 各次探测之间具有相关性。“K out of N”模型和“双亮点假设”模型中假设各次探测之间是完全独立的, 所以这两种模型不能很好地适用于计算探雷声呐的累积探测概率。 (λ, σ) 过程模型在计算模型中考虑了各次探测之间的相关性, 但未充分考虑探雷声呐的实际工作过程。

收稿日期: 2015-01-27; 修回日期: 2015-04-22

作者简介: 李玉伟(1988—), 男, 湖北襄阳人, 硕士研究生, 研究方向为水声信号处理技术与应用。

通讯作者: 李玉伟, E-mail: liyuwei4393@126.com

本文以球形锚雷为探测对象,根据声呐探测目标的原理和过程,将 (λ, σ) 过程模型和探雷声呐实际工作过程结合起来,对累积探测概率计算模型进行了改进,得到探雷声呐的捷径曲线和发现概率,为探雷声呐作战使用提供决策依据。

1 探雷声呐工作原理和工作方式

声呐基阵以一定的指向角向水中发射高频声脉冲,对接收的海底散射信号进行滤波、增益控制、波束形成和匹配滤波等处理后形成声图像,操作人员根据声图像来辨识水下目标。这里的声呐探测扇面一般由多个紧密相连的窄波束构成,在海底形成一个扇形探测区域。

探雷声呐典型三维多波束模型如图 1 所示。以基阵中心 O_a 为坐标原点建立三维直角坐标系, O_aM 为基阵的中心轴线, O_aC 、 O_aD 、 O_aE 、 O_aF 为多波束探测“锥体”的四条边界线。中心轴线 O_aM 与 $O_aX_aY_a$ 面的夹角即基阵俯仰角, O_aM 在 $O_aX_aY_a$ 面上的投影与 O_aX_a 轴的夹角即基阵水平角。基阵信号发射后多波束构成的“锥体”结构与海底平面相切形成的截面即探雷声呐在某次脉冲发射下的海底照射范围,即 $ABCD$ 这块扇形区域。

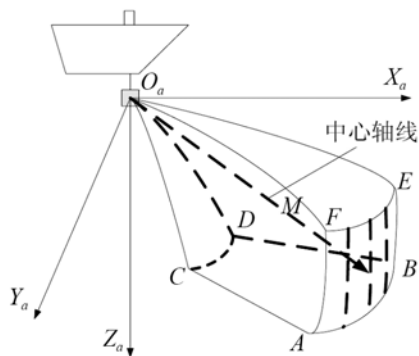


图 1 探雷声呐三维多波束模型
Fig.1 The model of 3-D beam mine-detection sonar

探雷声呐工作搜索方式包括自动搜索和手动搜索。手动搜索一般适用于对指定可疑区域进行重点搜索,自动搜索则是在设定的探测扇面内来回交替搜索,一般适用于对舰船两侧海域进行搜索。本文主要是对手动搜索方式下的水雷发现概率进行仿真研究。

2 捷径曲线和发现概率计算模型

2.1 航路捷径和捷径曲线

探雷声呐的探测目标是静止的,随着搭载声呐

工作平台朝着固定方位移动,在基阵和目标之间存在着相对运动。只有目标和声呐的相对运动使两者之间的距离进入量程范围时,探测才可有效进行^[1]。

考虑探雷声呐和目标之间的相对运动,通常规划出目标相对运动路径可能进入的区域。假设目标的相对运动路径是一条直线,在该直线上存在一个到声呐基阵距离最小的目标位置点,该点与声呐基阵的距离称为航路捷径^[1]。在分析声呐探测概率的过程中,航路捷径通常为—随机值,用 s 表示。探雷声呐典型照射区域与航路捷径如图 2 所示。

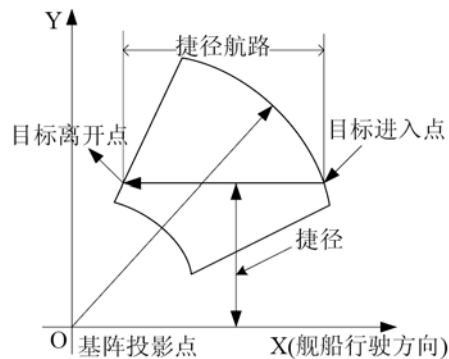


图 2 捷径航路示意图
Fig.2 The sketch map of a shortcut route

图 2 中,目标进入点到目标离开点之间的线段距离称为相应目标捷径航路长度。探雷声呐随舰艇运动探测一片海域,相当于水雷目标从探雷声呐在海底的照射扇面穿过。一个目标顺着捷径为 s 的直线穿过探雷声呐的探测区域,声呐对目标的累积探测概率随着目标穿过探测扇面的时间增加而增加。声呐对航路捷径 s 的目标累积探测概率用 $P(s)$ 表示, $P(s)$ 与 s 之间的关系曲线为捷径曲线^[1]。

2.2 发现概率

发现概率在传统意义上常常以瞬时探测概率来定义^[2],但是瞬时探测概率只反映在某个时刻一次探测的效果。从作战指挥的角度来说,更关心目标完整穿过传感器探测范围的发现概率。因此本文中定义的探雷声呐发现概率是指扫雷舰在执行某次探雷任务,水雷相对穿过探雷声呐探测范围一次,探雷声呐能够发现目标的概率。它是对探雷声呐作战效能的综合评价指标之一。

2.3 瞬时探测概率

探雷声呐一般工作于浅海环境,主要背景干扰为海底混响,所以主动声呐方程使用混响限制方程。通过计算指定条件下的信号余量,即可得到相应的瞬时探测概率^[4]。

混响限制下的主动声呐方程为

$$SL-2TL+TS-RL=DT \quad (1)$$

式中: SL 指信号声源级; TL 为传播损失(单位: dB)^[5], 海水浑浊度和声线传播距离决定它的大小。

$$TL=20 \lg r + \alpha r \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中: r 为声呐的探测距离, 单位是 m ; α 为海水的吸收系数, 单位是 dB/km 。

探雷声呐工作在浅海水域, 所以混响背景 RL 主要是海底混响^[4], 计算公式如下:

$$RL=SL+Sb-40 \lg r+10 \lg(dA)-Sa+20 \lg(P(\alpha, \gamma)) \quad (3)$$

式中: Sb 为海底反向散射强度, Sa 为吸收衰减, dA 为面元对应的面积, $P(\alpha, \gamma)$ 为基阵指向面元方向的指向性函数值。详细计算方法参考文献[6]。

信号余量定义为

$$SE(r)=SL-RL+TS-DT-2TL(r) \quad (4)$$

主动声呐的瞬时探测概率为

$$p(r)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_7^{\infty} \exp\left[-\frac{(x-SE(r))^2}{2\sigma^2}\right] dx \quad (5)$$

σ 为信号余量序列的标准差, 即 (λ, σ) 过程中的 σ 。它主要根据主动声呐方程中各个参数的标准差得到。近年来, 通过海试数据分析, 一般主动声呐的信号余量标准差为 9 dB , 被动声呐为 12 dB ^[4]。声呐工作过程中, 信号余量是一个随机变量。 $SE(r)$ 表示当前位置上的平均信号余量, 而 x 表示信号余量的随机值, 由公式(5)可以知道 x 的取值范围是 $(7, \infty)$, 单位为 dB 。其中 7 dB 为声呐接收机显示端的检测门限值, 所以瞬时探测概率的物理意义表示目标在声呐显示器上被看到的概率大小。

2.4 累积探测概率

探雷声呐以固定工作周期向水下发射脉冲信号进行探测, 经过接收处理, 形成一幅声呐图像, 然后操作人员观察图像上是否存在疑似目标。由于声呐和目标之间存在相对运动, 则可以假定声呐位置固定不动, 目标存在于某个捷径上, 以舰船航速通过声呐照射区域。图 3 是某捷径航路上的模拟探测过程。

探雷声呐每发射一次脉冲信号, 根据目标的相对位置可计算出目标的瞬时探测概率 p_i 。

对于 (λ, σ) 过程下的离散扫视搜索, 某一捷径 s_i 上的瞬时探测概率序列 $\{p_0, \dots, p_n\}$ 必须满足单峰条件。 p_h 是 $\{p_0, \dots, p_n\}$ 中的最大值, $0 \leq h \leq n$, 那么累积探测概率 $P(s_i)$ 可表示为

$$P(s_i)=1-\frac{1-p_h}{1-\alpha p_h} \prod_{k=0}^n (1-\alpha p_k) \quad (6)$$

式(6)中: $\alpha=1-\exp(-\lambda\Delta)$, 它表示了数据的不相关

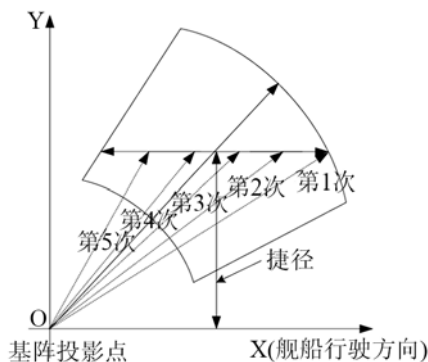


图 3 照射过程示意图

Fig.3 The sketch map of irradiation process

程度; Δ 为扫视时间间隔; λ 为 (λ, σ) 过程模型中泊松过程事件的单位时间速率。通过仿真计算信号余量数据序列的相关性 β , 则 $\alpha=1-\beta$, $\lambda=-\ln(1-\alpha)/\Delta$ 。在后文仿真研究过程中, 为了同其他模型对比, 这里的模型简称为“原模型”。

计算不同捷径上的累积探测概率, 就可以得到捷径曲线。假设目标在各捷径上呈均匀分布, 则探雷声呐对水雷目标的发现概率 F_{dn} 为

$$F_{dn}=\frac{1}{s_N-s_1+1} \sum_{i=1}^N P(s_i) \quad (7)$$

s_N 和 s_1 表示声呐有效搜索捷径范围的上下限。判断 $P(s_i)$ 大于 0.5 时的捷径范围即可求得 s_N 和 s_1 。

2.5 改进计算模型

在上述累积探测概率计算模型中, 将一次瞬时探测作为一次发现目标的探测。然而根据声呐的实际操作过程, 确定目标是否被发现一般至少需要在声呐显示器上连续观察到水雷目标三次, 也就是至少连续三次瞬时探测到目标的情况才能认为发现目标一次。因此, 结合探雷声呐的操作过程, 将在声呐显示器上连续三次探测到目标定义为实际意义上的一次“发现”。

假设在某个捷径航路上声呐总共连续照射目标 $N(N \geq 3)$ 次, 将连续 3 次照射定义为一次发现过程, 其对应探测概率称为“一次累积探测概率”, 记为 F_n , $1 \leq n \leq N-2$ 。当 $n=1$ 时, 表示在 1 到 3 次之间发生第一次探测; $n=2$ 时, 表示在 2 到 4 次之间发生第二次探测, 依此类推计算 F_n 。

考虑瞬时探测各次之间具有相关性, 这里采用独立估计和完全相关估计的联合方法^[7], 计算连续三次探测到目标的概率。

假设探测各次之间完全相关时, 连续探测到目标的概率为三次瞬时探测概率中的最大值 $PX_n=p_h(n \leq h \leq n+2)$; 当各次探测之间完全独立时, 显然连续三次探测到目标的概率为 $P_n=p_n * p_{n+1} * p_{n+2}$ 。根

据联合方法得到连续三次在屏幕上看到目标的概率为

$$F_n = (1-\alpha) * PX_n + \alpha * P_n \quad (8)$$

式(8)中 α 表示非相关性系数。同公式(6)中一致,都是由瞬时探测概率序列的相关性得到的。在得到一次累积探测概率 F_n 后,对 $\{F_1, \dots, F_{N-2}\}$ 序列求“二次累积探测概率”。根据公式(8)可以得到 $\{F_1, \dots, F_{N-2}\}$ 序列满足单峰条件的结论。简要证明过程如下:

假设 $\{p_0, \dots, p_n\}$ 满足单峰条件,其中 p_a 为数据序列中的最大值,且相邻的值 p_{a-1} 和 p_{a+1} 仅小于 p_a 。

由公式(8)的形式 F_n 的计算公式分为两部分: PX_n 和 P_n 。由于 p_a 为 PX_n 中的最大值,而 $p_{a-1} * p_a * p_{a+1}$ 是 P_n 中的最大值,因此 F_{a-1} 是一次累积探测概率序列中的最大值。同理,在瞬时探测概率最大值 p_a 左侧,数据序列是递增变化的,由公式(8)可知一次累积探测概率呈递增变化;在 p_a 右侧,数据序列呈递减变化,一次累积探测概率序列呈递减变化。综上所述, $\{F_1, \dots, F_{N-2}\}$ 序列依然满足单峰条件,所以可以使用离散的 (λ, σ) 过程模型进行累积探测概率计算。

得到一次累积探测概率后,使用公式(6)计算此捷径上的二次累积探测概率 PP 为

$$PP(s) = 1 - \frac{1-F_h}{1-\alpha_1 F_h} \prod_{i=1}^{N-2} (1-\alpha_1 F_i) \quad (9)$$

式(9)中: F_h 表示某捷径上一次累积探测概率序列的最大值; α_1 表示一次累积探测概率序列的非相关性系数,它通过 $\{F_1, \dots, F_{N-2}\}$ 序列的相关性求得,所以不同于公式(6)中的 α 。这里将改进后的模型简称为“改进模型”。须注意的是采用改进模型后, (λ, σ) 过程模型中的 λ 取值相比原模型发生变化,因为改进模型中将相邻三次瞬时探测视为一次发现探测过程,此时扫视时间间隔 Δ 变大, λ 取值变小。

3 仿真计算

仿真条件:基阵发射声源级 227 dB,环境噪声级为 42 dB,搜索目标为球形锚雷,其目标强度^[5]为 -15 dB,检测阈为 10 dB。当前海深为 40 m,采用北海春季声速梯度分布,海底底质为粘土,海水清澈。海况为 3 级,舰船航速为 6 节。计算过程中 σ 取 9 dB,在原模型中 $\lambda=0.5$,在改进模型中 $\lambda=0.3$ 。

在摇摆状态下,基阵初始的俯仰角为 0° ,水平方位角为 0° 。根据“原模型”和“改进模型”下的累积探测概率的计算公式(6)和公式(10)仿真得到如

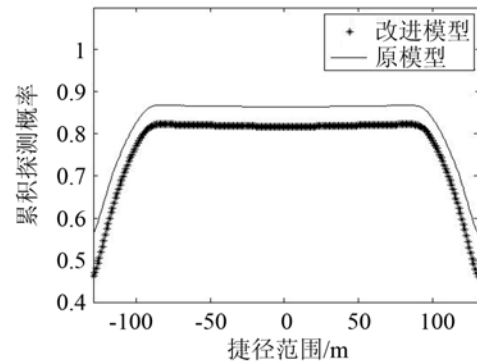


图4 原模型和改进模型的区别(俯仰角为 0° , 水平方位角为 0°)
Fig.4 The distinction between the original and modified algorithms (pitch angle and horizontal azimuth are all equal to 0°)

图4所示的捷径曲线。

由公式(7)可以计算得到“改进模型”的发现概率大小为 77.44%,而“原模型”下的发现概率为 82.79%。相比之下,改进模型计算得到的发现概率变小了。但是两模型相比,“改进模型”的意义在于从探雷声呐的实际操作过程出发,在“原模型”的基础上重新定义了“发现”目标的含义,使得单次发现概率的计算更接近实际情况。所以“改进模型”比“原模型”更接近探雷声呐的实际探测情况。

其他条件不变,基阵的水平方位角设置为 30° ,俯仰角为 0° ,仿真结果如图5所示。

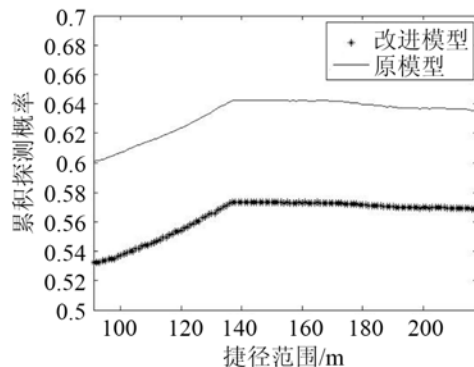


图5 原模型和改进模型的区别(俯仰角为 0° , 水平方位角为 30°)
Fig.5 The distinction between the original and modified algorithms (pitch angle = 0° and horizontal azimuth = 30°)

此时,采用原模型计算得到的发现概率为 63.23%,改进后算法得到的发现概率为 56.37%,其变化规律和方位角为 0° 的情况一样,都是改进算法的计算结果偏小。

4 总结

本文通过对探雷声呐搜索过程和工作原理进行研究,将声呐中目标被连续多次探测到定义为发现的操作过程和 (λ, σ) 过程模型结合起来,提出了

累积探测概率的改进算法。结合实际环境,对声呐搜索过程进行模拟仿真,计算得到了两种模型下探雷声呐捷径曲线和发现概率。与“原模型”相比,“改进模型”更接近声呐的实际操作过程。通过对探雷声呐发现概率的研究实现了对探雷声呐发现目标能力的量化分析,为扫雷舰航路规划和扫雷方案的制定提供了理论依据。

参 考 文 献

- [1] Daniel H Wagner, W Charles Mylander, Thmomas J Sanders. Naval operations analysis[M]. USA: Department of Mathematics, U.S. Naval Academy, 1997: 133-152.
- [2] 陈遵银, 韩兆福, 徐伟勤. 目标探测概率估算模型[J]. 实用测试技术, 2001(1): 12-14.
CHEN Zhunyin, HAN Zhaofu, XU Weiqin. The estimation model of target detection probability[J]. Practical Technology, 2001(1): 12-14.
- [3] 侯学隆, 宋伟健, 许海峰. 航空主动声纳对潜发现概率模型[J]. 系
统仿真技术及其应用, 2011, 14(12): 327-330.
- [4] 凌青, 蔡志明, 张卫, 等. 压制条件下声纳搜索效能分析[J]. 海军工程大学学报, 2011, 23(5): 36-40.
LING Qing, CAI Zhiming, ZHANG Wei et al. Effect of noise-jammer on suppressing sonar analysis detection[J]. Journal of naval university of engineering, 2011, 23(5): 36-40.
- [5] Waite A D. Sonar for practicing engineers[M]. Publishing House of Electronics Industry, 2004: 65-66.
- [6] 肖军, 王旭升, 姜可宇. 探雷声呐作用距离预报与仿真[J]. 指挥控制与仿真, 2013, 35(3): 51-55.
XIAO Jun, WANG Xusheng, JIANG Kuyu. Modeling sonar simulation on detecting range of mine detecting sonar[J]. Command Control & Simulation, 2013, 35(3): 51-55.
- [7] Marin, Gerald. Modeling Passive Detections by ASW Aircraft[M]. Arlington, VA: Center for Naval Analyses, 1980: 100-102.

上海交通大学退休教授领衔制订 IEC 技术规范

国际电工委员会(IEC)11月27日下达 IEC 87/591/RVN 文件通知: 经 12 国投票一致同意, 通过由上海交通大学退休教授寿文德领衔申请的新工作项目计划(NWIP)技术规范(TS)<超声学-球面聚焦换能器的电声参数和输出声功率的测量-自易法>, 正式列项纳入工作程序, 定名为: IEC TS 62903 Ed.1 Ultrasonics-Measurements of electroacoustical parameters and output power for spherically focusing transducers using self-reciprocity method, 由寿文德领导、中德意韩四国专家协作开展起草工作, 计划于 2018 年 7 月完成制订任务。

该技术规范首次把电声互易原理推广到球面聚焦声场, 应用到聚焦换能器校准中, 建立了一套新颖实用的测量技术, 其声学理论模型、计算方法和测量技术, 是在 2002~2014 年间由寿文德主创指导, 王鸿樟参与, 硕士生严加勇, 博士生段世梅、余立立参加下完成的。2013~2014 年组建了由上海超声医学研究所、中国计量院、中国船舶重工集团公司第 715 所等 8 个单位参加的工作组, 继续完善理论和方法, 完成起草相关的国家标准。2014 年末将相应内容改写成 IEC 87/574 NP 文件, 申请起草 IEC 技术规范, 2015 年 10 月 16 日投票表决立项成功。

寿文德担任 IEC 超声功率与声场测量工作组成员至今 34 年, 曾主持起草的<GB/T 19890-2006 声学 高强度聚焦超声(HIFU)声功率和声场特性测量>项目, 获得 2007 年中国标准创新贡献一等奖, 目前从事低频超声功率测量与水听器校准研究。

上海交通大学 段世梅