

单机吊放声呐应召反潜探测概率的计算与优化

张丙飞, 孙心毅, 成建波

(中国人民解放军 92728 部队, 上海 200436)

[摘 要] 研究了在该模型下应召反潜辅助决策系统规划的多个定测点的探测概率的计算方法, 并对计算方法进行了优化。经工程实际应用, 具有速度快, 结构简单等特点, 具有实用价值。

[关键词] 反潜; 散布概率; 评估; 辅助决策

[中图分类号] TP391.9[文献标识码]A [DOI 编码] 10.12175/j.issn.1006-141X.2020.01.06

[文章编号] 1006-141X(2020)01-0035-04

Probability in Antisubmarine Call Search with Sonar Compute and Optimize

ZHANG Bing-fei, SUN Xin-yi, CHENG Jian-bo

(92728 Troop, the PLA, Shanghai 200436, China)

Abstract: The method of calculating the detection probability of multiple fixed point decision points in the model under the model is studied and the calculation method is optimized. The practical application of the project has the advantages of fast speed and simple structure.

Key words: anti-submarine; probability distribution; evaluation; decision support system

0 引言

在单架直升机使用吊放声呐设备执行应召反潜任务时, 反潜辅助决策系统的主要任务是根据潜艇的初始状态信息、当地水文气象信息、声呐设备性能和探潜平台的机动性能等综合因素, 综合给出吊放声呐探潜入水定测点和入水深度等辅助决策信息以供反潜机组参考使用。吊放声呐在探潜入水定测点探测后, 形成一个圆形的已探测区域, 圆形区域的半径为声呐的作用距离。通常情况下, 受吊放声呐作用距离的限制, 单个定测点的探测区域也因此受限, 不能满足反潜探测要求。为了增加有效探测区域, 辅助决策系统一般会规划多个定测点,

通过对这些点的分时探测来提高探潜概率。由这些定测点共同综合达到的探测概率是评估反潜辅助决策方案效能、衡量反潜辅助决策方案优劣的重要指标。

探测概率与潜艇的散布模型直接相关, 相关专家在反潜飞机搜索效能评估与决策建模中提出了一种应召反潜搜索时潜艇的位置散布模型^[1]。本文以该模型作为潜艇的散布模型, 研究了探测概率的数值计算方法, 进行了仿真验证和优化。相较于传统的蒙特卡洛法, 计算时间大幅缩短, 具有一定工程实用价值。

1 潜艇的位置散布模型

根据概率论中心极限定理,可以认为潜艇的位置分布服从二维 $N(0, \sigma_0^2)$ 正态分布。执行应召反潜任务时,到达应召点需要一定的时间,随着时间的推移,潜艇的位置分布也随之变化。常见的潜艇位置散布主要有三种情况:潜艇速度未知、已知或不确定。本文以潜艇的速度和航向均未知的情况为例说明计算方法,其它两种潜艇位置散布情况可采用类似的方法处理。

大部分情况下潜艇的速度和航向均是未知的。文献[1]假设潜艇的航向在 $[0, 2\pi]$ 区间上是均匀分布的,将潜艇经济航速 v_{se} 作为速度 v 分布函数的均值,并对假设的合理性进行了证明。这样,经过时间 t 后,潜艇在速度和航向未知情况下的概率密度函数为:

$$\begin{cases} \varphi(r, \theta) = \frac{r}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \\ \sigma^2 = \sigma_0^2 + \frac{2}{\pi}(v_{se}t_0)^2 \end{cases} \quad (1)$$

其中, v_{se} 为潜艇的经济航速, σ_0 为距离散布误差,取值与发现潜艇的传感器相关。

2 设计与实现

探测概率是由辅助决策系统规划的多个定测点共同作用的结果。因此,计算过程可分为两步:

(1) 单独计算每个定测点的探测概率;(2) 计算多个定测点综合后的探测概率。

2.1 单个定测点探测概率的计算方法

以探测点为中心、以声呐作用距离为半径的圆的探测范围,该区域即为需计算的区域。声呐作用距离^[2-3]与声呐设备的性能和水文数据密切相关,其计算方法为:在定测点已知后,可以通过查询水文数据库获得定测点的水文信息,再结合实际使用声呐的性能计算得出。通过推算探测时刻潜艇的位置散布状态,结合声呐探测范围,就可以计算出定测点的探测概率。

理论上可以求出潜艇分布的概率分布函数,利用解析方法计算上述单个定测点的探测概率。由于定测点的任意性,除了潜艇初始时刻以外,其它位置的积分过程都比较复杂,不具有普遍性,因此实

际工程应用中可采用数值计算的方法。

数值计算的原理为:将反潜探测区域分割为较小的块,记为 Δ_s ,当每个块的面积足够小时,可近似认为该区域内的概率密度 f 相同,则该区域的概率为 $f \cdot \Delta_s$ 。面积分割的大小程度受时间复杂度和精度要求相互制约,分割的越小,精度越高,计算时间越长,反之亦然,需要综合考虑。

对反潜探测区域进行分割时,直角坐标下更为直观方便,容易判断探测范围的边界。因此,将式

(1) 转换为直角坐标系表示,转换后如下:

$$\begin{cases} f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \\ \sigma^2 = \sigma_0^2 + \frac{2}{\pi}(v_{se}t_0)^2 \end{cases} \quad (2)$$

在直角坐标系下,以定测点为中心,以声呐作用距离 2 倍为边长的正方形,沿横坐标和纵坐标分别进行 N 等分,记声呐的作用距离为 r_0 ,则每个分割的小正方形的面积为:

$$\Delta_s = 4r_0^2 / N^2 \quad (3)$$

将切割后小正方形至定测点的距离与声呐的作用距离进行比较,若小于声呐作用距离,则认为落在界内,进行相乘累加,否则舍弃。综合式(2)和式(3),就可以粗略计算潜艇在不同散布情况下单个定测点的探测概率,最终计算公式如下:

$$P_0 = \sum_{x^2+y^2 < r_0^2} f(x, y) \cdot \Delta_s \quad (4)$$

2.2 多个定测点综合探测概率的计算方法

假设辅助决策系统共规划了 n 个探测点,分别记为 $L_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$,利用前述单个定测点探测概率的计算方法可计算得到 n 个定测点的探测概率,分别记为 $P_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 。

多个定测点在探测时有先后顺序,第一个定测点探测后,仅当第一个探测点发现目标才能进行第二个定测点的探测,反之则不再进行后续的探测,第三个探测点的探测过程可依上述过程类推。根据条件概率和全概率理论^[4],可推导出多个定测点综合探测概率的计算方法。

当只有一个定测点时,综合后的探测概率为 P_1 。

当有两个定测点时, 第一个定测点发生的概率为 1, 第二个定测点只有在第一个定测点未发现的情况下才可能发生, 其发生的概率为 $1 - P_1$, 因此综合后的探测概率的计算公式如下:

$$P_{12} = P_1 \cdot 1 + P_2 \cdot (1 - P_1) \quad (5)$$

当有三个定测点时, 可先不考虑第三个定测点, 按照只有两个定测点的方法计算前两个定测点综合后的探测概率。然后, 前两个定测点综合后的探测概率与第三个点, 可认为同样符合只有两个定测点的计算方法, 综合后的探测概率的计算公式如下:

$$P_{123} = P_{12} \cdot 1 + P_3 \cdot (1 - P_{12}) \quad (6)$$

当大于三个定测点时, 可依照上述过程类推。

2.3 实现及算法优化

工程应用中使用的是嵌入式环境, 操作系统为 VxWorks, 编程语言 C++。处理流程如图 1 所示。

首先获取声呐设备的性能参数和潜艇的初始状态信息, 结合潜艇所在水域的水文气象信息计算声呐的作用距离, 设置速度误差、航向误差和潜艇经济航速等信息。然后输入反潜辅助决策系统规划的探潜定测点, 针对每个定测点采用数值计算的方法计算探测概率。全部计算完毕之后, 综合计算全部定测点的探测概率。

由于应用环境为嵌入式系统, 设备的浮点运算能力较弱, 直接进行计算需消耗较多的处理时间, 不能满足使用要求, 需优化算法。在计算中, 减少耗时较多的浮点乘法和浮点除法运算, 可大幅降低处理时间。

根据式 (4) 可知, 在进行 N 等分的情况下, 近似需进行 N^2 次 $f(x, y) \cdot \Delta_s$ 的运算, 运算算式可展开为:

$$\frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} 4r_0^2 / N \quad (7)$$

式(7)中的 $\frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot 4r_0^2 / N$ 为常量, 可不参与 N^2

次求和时的相乘运算, 在求和结束后进行相乘, 这样可减

少 $5N^2$ 次乘法运算和 N^2 次除法运算; 式中 $e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$ 式的

$-\frac{1}{2\sigma^2}$ 可在求和前计算, 又可减少 N^2 次乘法运算和 N^2 次除法运算。

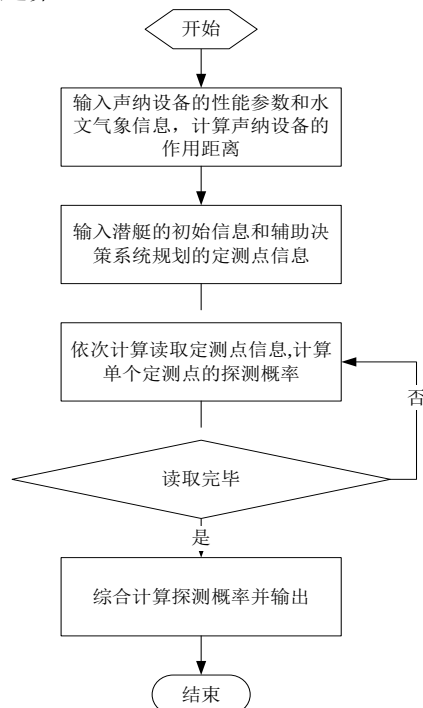


图 1 处理流程

3 仿真验证

3.1 计算方法正确性的仿真验证

仿真环境为 Matlab, 计算方法为蒙特卡洛法。仿真计算的过程如下:

(1) 以潜艇散布误差为标准差, 利用正态分布函数随机生成潜艇的初始位置;

(2) 利用瑞利分布函数和潜艇经济航速随机生产潜艇的速度;

(3) 利用均匀分布函数随机生成潜艇的航向;

(4) 结合时间因素计算潜艇的位置信息;

(5) 与第一个预设定测点位置比较, 两者距离大于声呐探测距离, 转 (6), 否则, 探测成功计数加 1。如果未达到试验次数转 (1), 达到试验次数转 (10);

(6) 结合时间因素计算潜艇的位置信息;

(7) 与第 2 个预设定测点位置比较, 两者距离大于声呐探测距离, 转 (8), 否则, 探测成功计数加 1。如果未达到试验次数转 (1), 达到试验次

数转 (10);

.....

(8) 结合时间因素计算潜艇的位置信息;

(9) 与第 N 个预设定测点位置比较, 两者距离大于声呐探测距离, 探测成功计数加 1。如果未达到试验次数转 (1), 达到试验次数转 (10);

(10) 用探测成功次数除以试验总次数即为综合探测概率。

按常规经验, 仿真中使用的参数取值为: 试验次数 $N=10000$; 潜艇散步误差 $\sigma=200$ m; 潜艇经济航速 $V_{se}=6$ nm。简单起见, 按逆时针外旋螺旋线方式取 3 个, 分别为 (3000 m, 0)、(0, 6000 m)、(-9000 m, 0), 并假定以潜艇发时现间为 0 时, 入水点的探测时间分别为 900 s、1800 s 和 2700 s。声呐的作用距离取 2 个, 分别为 3800 m 和 5000 m。仿真计算结果见表 1。

表 1 仿真计算结果			
序号	声呐作用 距离 (m)	散布概率	
		蒙特卡洛	数值计算
1	3800	0.5973	0.5989
2	5000	0.8181	0.8143

由表 1 可以看出, 数值计算方法和蒙特卡洛法计算出的概率基本一致。

3.2 优化方法有效性的仿真验证

因为优化方法主要针对的是缺少浮点运算的

处理器, 所以仿真环境采用近真实环境, 处理器为摩托罗拉的 MPC 8270, 操作系统为 VxWorks。针对潜艇位置散布的三种情况分别进行了计算, 优化前后的计算时间如表 2 所示。

表 2 优化前后计算时间		
潜艇散步状态	优化前	优化后
情况 1	15s	<1s
情况 2	18s	<1s
情况 3	20s	<1s

由表 2 可见, 优化后处理时间明显缩短, 优化方法有效。

4 结束语

针对特定散布模型情况下应召反潜探测概率的计算, 本文设计了工程实现方法, 提出了数值计算探测概率的方法, 并进行了计算过程优化和仿真验证, 在工程实际应用中, 具有运算速度快、结构简单等优点。相较于传统的蒙特卡洛法, 提高了计算结果的稳定性, 减少了计算时间, 降低了对计算设备的性能要求, 有利于在性能相对较弱的机载设备中工程实现。同时需指出的是, 在数值计算过程中, 本文未对分割程度对精度的影响做深入分析, 可作为下一步的研究方向。

参 考 文 献

[1] 屈也频. 反潜飞机搜潜效能评估与决策建模[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.

[2] 丛红日, 靳天宇, 刘卫东. 吊放声呐搜索效能通用仿真模型研究[J]. 系统仿真技术, 2011, 7(1):72-76.

[3] 丛红日, 靳天宇, 刘卫东. 吊放声呐搜索效能通用仿真模型研究[J]. 系统仿真技术, 2011, 7(1):72-76.

[4] 沈培志, 侯学隆, 张海峰. 吊放声呐主动探测距离建模与仿真[J]. 系统仿真技术, 2011, 7(1):63-66.

[5] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 高等教育出版社, 2008.

[6] 吴铭. 基于先验目标航向的吊声扇面螺旋线搜潜建模[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(12): 2908- 2912.

[7] 白晶, 韩亮. 舰载直升机吊声的搜潜方法探讨[J]. 北京航天航空大学学报, 2007, 33(3): 282-285.

[收稿日期] 2019-5-24