

## 反潜巡逻机雷达巡逻搜潜的面积等效模型

罗木生, 侯学隆, 王培源  
(海军航空工程学院, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 针对反潜巡逻机使用雷达巡逻搜潜问题, 首先给出了雷达搜索概率模型, 不仅分析了雷达搜索扫描宽度, 而且综合考虑了潜艇是否暴露、能否规避两个重要因素。在此基础上, 通过分析反潜巡逻机巡逻线阵位、相对运动关系, 采用面积等效法, 建立了适用于一般情况的巡逻搜潜探测概率模型。最后, 仿真分析了搜索时间、巡逻线长度与阵位位置等因素对雷达探测概率的影响。结果表明, 面积等效模型可较好地解决反潜巡逻机巡逻搜潜的概率计算问题; 反潜巡逻机使用雷达巡逻搜潜时, 发现概率随搜索时间的延长而增加, 但最后趋于一定值, 且最大发现概率不高。

**关键词:** 反潜巡逻机; 巡逻搜潜; 面积等效; 发现概率; 反潜雷达

中图分类号: V271.4 文献标志码: A 文章编号: 1671-637X(2013)06-0020-04

## Radar Patrol Searching Area Equivalent Model of Antisubmarine Patrol Aircraft

LUO Musheng, HOU Xuelong, WANG Peiyuan  
(Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** To the patrol searching problem of antisubmarine patrol aircraft using radar, a radar searching probability model was presented, which considered the scanning width of radar searching, the submarine exposure rate and detection avoidance rate. Based on this, through analyzing the patrol line station and relative movement of antisubmarine patrol aircraft, a general patrol searching detection probability model was built up by adopting area equivalent method. Finally, the influence of searching time, length and station position of patrol line on radar detection probability was analyzed by simulation. The results showed that: 1) the area equivalent model can better solve the patrol searching probability calculation problem of antisubmarine patrol aircraft, and 2) the radar detection probability increases with the searching time, but it tends to a special value, and the maximum detection probability is not high.

**Key words:** antisubmarine patrol aircraft; patrol searching; equivalent area; detection probability; antisubmarine radar

### 0 引言

固定翼反潜巡逻机(简称反潜巡逻机)装备有多种搜潜器材与攻潜弹药, 不仅具有良好的机动性和较长的留空时间, 而且控制海域广、搜索效率高、攻击能力强, 是编队反潜作战的重要力量, 也是各国重点发展的反潜兵力之一。目前, 正在服役的反潜巡逻机主要有美国的“猎户座”P-3C与“北欧海盗”、英国的“猎迷”、俄罗斯的伊尔-38等<sup>[1]</sup>。

反潜巡逻机执行巡逻任务时, 一般在指定巡逻线(或巡逻区域)上搜索。巡逻线既可以是固定不动的, 也可以是相对固定的, 即随着舰艇编队向前移动, 但与编队的距离基本不变。针对固定巡逻线搜潜的相关研究较多<sup>[2-3]</sup>, 而关于反潜巡逻机在相对固定的巡逻线上搜索的模型, 还需要进一步完善。因此, 本文主要针对后者, 以反潜巡逻机使用雷达搜潜为背景进行建模研究。

### 1 反潜巡逻机雷达巡逻搜潜

反潜巡逻机巡逻搜潜是指挥员根据对敌潜艇的威胁判断, 在距舰艇编队一定距离的敌潜艇可能来袭方向(扇面)的适当位置上或敌潜艇可能活动的海域, 确

收稿日期: 2012-06-24 修回日期: 2012-07-09

基金项目: 总装备部仿真预研资助项目(513040501)

作者简介: 罗木生(1982—), 男, 江西广昌人, 博士生, 研究方向为兵种战术学。

定一定范围的巡逻区域或巡逻线,由反潜巡逻机进行搜潜的战斗行动。优点是对情报的依赖性小,有利于及时发现和攻击敌潜艇,具有主动性,但缺点是巡逻所需时间长、巡逻范围大。

巡逻搜潜多属于线性搜索<sup>[4]</sup>,一般应事先规定巡逻线或巡逻海域,搜索的正面宽度和纵深应根据任务、敌情及海区环境进行计算,应避免遭受敌空中威胁。通常要求能够有效地遮拦敌潜艇的可能航行海域或可能来袭宽度,且能够单独或与其他反潜兵力构成严密的巡逻警戒网。

反潜巡逻机遂行巡逻搜潜任务时,主要使用雷达在舰艇编队中、远程区域进行巡逻搜潜警戒<sup>[5]</sup>。搜潜雷达具有发现距离远、搜索速度快、探测精度高和抗海杂波等优点<sup>[6]</sup>,是反潜巡逻机巡逻搜索时的主要搜潜手段。使用搜潜雷达的主要缺点是搜索时需要发射电磁波,容易暴露自身,因此不适于执行隐蔽性要求较高的任务。

## 2 反潜巡逻机雷达搜潜概率模型

国内外已进行了关于雷达搜潜概率模型的研究,模型中考虑的因素也不尽相同,使用条件也不一样。由于侦察、无线电通信、航渡、充电(常规潜艇)等作战需要,潜艇在执行任务过程中,将短暂或间断地处于潜望镜、通气管或水面航行状态,此时才可能被反潜巡逻机上的搜潜雷达发现。因而,雷达搜索概率需要考虑潜艇暴露在雷达探测状态的概率。

此外,现代潜艇都装有雷达侦察仪器,一般采用“先探后浮”的措施<sup>[7]</sup>,而雷达侦察仪器的探测距离一般较雷达的作用距离远,所以,雷达发现敌潜艇之前,敌潜艇可能探测到雷达发射的电磁信号,从而有机会规避<sup>[8]</sup>。

因此,反潜巡逻机的机载雷达能否发现潜艇目标,与敌潜艇是否暴露、是否有机会规避密切相关。只有当敌潜艇处于雷达可探测状态,雷达探测范围又刚好覆盖潜艇所在海区,且敌潜艇并没有实施有效的规避,雷达才能发现敌潜艇目标。因此,综合考虑潜艇暴露与规避的雷达搜索概率为<sup>[9]</sup>

$$P_{\text{radar}}(t) = 1 - \exp\left(-\frac{W_{\text{radar}} V_{\text{机搜}} K_{\text{潜露}} P_{\text{潜未避}} P_{\text{接, radar}} t}{S_{\text{总面积}}}\right) \quad (1)$$

式中: $t$ 为搜索时间; $S_{\text{总面积}}$ 为任务要求的搜索区域总面积; $V_{\text{机搜}}$ 为反潜巡逻机使用雷达搜索时的飞行速度; $P_{\text{接, radar}}$ 为雷达与目标接触并对其识别的概率; $W_{\text{radar}}$ 为雷达搜索扫描宽度; $K_{\text{潜露}}$ 为敌潜艇暴露在雷达探测状态被发现的系数; $P_{\text{潜未避}}$ 为敌潜艇被发现后未能规避的概率。对后3个关键参数进行建模计算。

### 2.1 雷达搜索扫描宽度

当反潜巡逻机使用雷达搜索时,搜索过的区域为带状,但是带状区域中不同位置的发现率是不相同的。因为带状区两侧的探测时间短,而带状区中心的探测时间长,如图1所示。

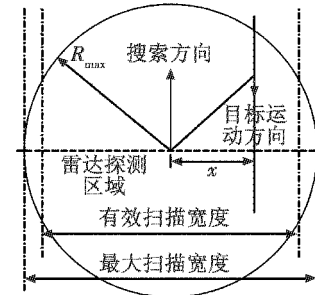


图1 雷达探测区域示意图

Fig. 1 Radar detection area

横距指传感器与目标运动轨迹之间的最短距离。横距函数 $P_L(x)$ ,指目标以横距 $x$ 穿越探测圆时传感器对于目标的累积探测概率。根据横距 $x$ ,可得雷达搜索的横距函数为<sup>[10-11]</sup>

$$P_L(x) = \begin{cases} 1 - \exp\left(-K_L \frac{\sqrt{R_{\text{雷达,max}}^2 - x^2}}{V'}\right), & x \leq R_{\text{雷达,max}} \\ 0, & x > R_{\text{雷达,max}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $R_{\text{雷达,max}}$ 为雷达最大探测距离,计算模型可参考文献<sup>[12]</sup>;  $K_L$ 为系数,可根据横距为0时的发现概率来确定; $V'$ 为雷达携带平台与目标的相对速度。

在探测范围内,对横距函数进行积分,即可得出扫描宽度。因此,根据式(2)可以得出,雷达搜索的有效扫描宽度为<sup>[10-11]</sup>

$$W_{\text{radar}} = \int_{-R_{\text{雷达,max}}}^{R_{\text{雷达,max}}} P_L(x) dx \quad (3)$$

由于上式无法得出解析解,可采用数值积分得出数值解。

### 2.2 潜艇暴露系数

潜艇暴露系数与潜艇暴露的频率、暴露持续的时间密切相关,而这两个参数随机性能大且难以获得较为准确的值,但常规潜艇由于充电而暴露在可被雷达探测状态的时间是主要的,因而在作战周期内暴露的总时间大致可以估算。因此,定义暴露系数 $K_{\text{潜露}}$ 为潜艇在作战周期内暴露时间所占总时间的比例<sup>[13]</sup>。若24 h内潜艇暴露在可被雷达探测状态的总时间为 $T'_{\text{潜露}}$ ,则

$$K_{\text{潜露}} = T'_{\text{潜露}}/24. \quad (4)$$

### 2.3 潜艇未能规避概率

由于现代潜艇都装备了雷达侦测仪器,若潜艇在雷达最大探测距离之外侦测到雷达辐射的电磁信号,则其有时间采取下潜等规避策略,从而避免被雷达探

测到。

假定在雷达探测范围内的区域,在敌潜艇规避之前雷达就能发现它;而在探测范围之外,敌潜艇若能侦测到雷达信息,则能顺利进行规避。因此,有<sup>[10]</sup>

$$P_{\text{潜未避}} = \begin{cases} \frac{\pi R_{\text{雷达,max}}^2}{\pi R_{\text{探测}}^2}, & R_{\text{雷达,max}} < R_{\text{探测}} \\ 1, & R_{\text{雷达,max}} \geq R_{\text{探测}} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $R_{\text{探测}}$  为敌潜艇探测到雷达信号的最远距离。

### 3 雷达巡逻搜潜概率的面积等效法模型

使用雷达在巡逻线上搜索时,反潜巡逻机一般沿着巡逻线往返飞行。若巡逻线垂直于敌潜艇航向,虽然在固定的巡逻线上往返搜索,但相对于运动中的敌潜艇,反潜巡逻机的搜索航迹却是不断向前的折线,如图2中的虚线所示,等效于反潜巡逻机在矩形区域内搜索。

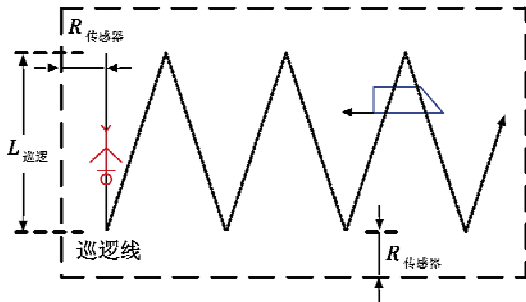


图2 巡逻线搜索等效区域示意图

Fig.2 Equivalent area of patrol line search

因此,反潜巡逻机使用雷达在巡逻线上搜索时,需要搜索区域的等效面积为

$$S_{\text{巡逻}} = a_{\text{长}} \cdot b_{\text{宽}} \quad (6)$$

式中,  $a_{\text{长}}$ 、 $b_{\text{宽}}$  分别为等效矩形的长和宽。

将  $S_{\text{巡逻}}$  作为需搜索区域总面积  $S_{\text{总面积}}$  代入式(1)模型中,可得出反潜巡逻机使用雷达在巡逻线上搜索的发现概率。

由图2所示,根据几何分析,可得等效矩形的  $a_{\text{长}}$ 、 $b_{\text{宽}}$  分别为

$$\begin{cases} a_{\text{长}} = 2R_{\text{传感器}} + V_{\text{潜艇}} \cdot t \\ b_{\text{宽}} = 2R_{\text{传感器}} + L_{\text{巡逻}} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $R_{\text{传感器}}$  为传感器的有效作用距离,传感器为雷达,则  $R_{\text{传感器}} = 0.5 \cdot W_{\text{radar}}$ ;  $L_{\text{巡逻}}$  为巡逻线的长度;  $V_{\text{sub}}$  为敌潜艇平均航速;  $t$  为反潜巡逻机搜索时间。

舰艇编队航渡过程中,反潜巡逻机的巡逻线既可垂直编队航线,也可与编队航向成一定角度,如图3中的巡逻线  $AB$ 。巡逻阵位也可能不是固定的,而是随着编队一起向前推进,且巡逻线也可能不与敌潜艇航向垂直。因此,式(7)不再适用,需对更一般情况下的巡

逻线等效搜索区域面积进行建模。

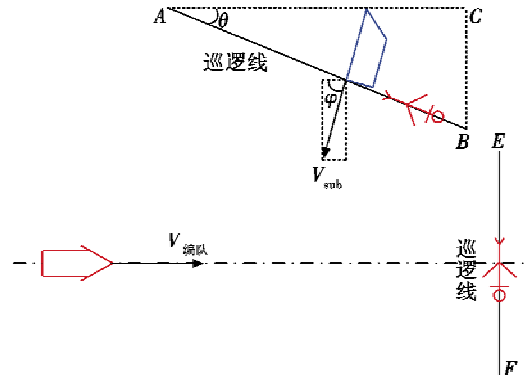


图3 反潜巡逻机巡逻线搜索

Fig.3 Patrol line search of antisubmarine patrol aircraft

如图3所示,巡逻线阵位  $AB$ 。随着编队一起向前推进,那么,相对于陆地,反潜巡逻机需要搜索的等效区域的长、宽分别为

$$\begin{cases} a_{\text{长}} = 2R_{\text{传感器}} + L_{\text{巡逻}} \cos \theta + V_{\text{编队}} t \\ b_{\text{宽}} = 2R_{\text{传感器}} + L_{\text{巡逻}} \sin \theta \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\theta$  为巡逻线  $AB$  与编队航向之间的夹角;  $V_{\text{编队}}$  为编队航速。

考虑到敌潜艇的运动,设潜艇航向与编队航向之间的夹角为  $\varphi$ ,则有

$$\begin{cases} a_{\text{长}} = 2R_{\text{传感器}} + L_{\text{巡逻}} \cos \theta + V_{\text{编队}} t + V_{\text{sub}} \cos \varphi \cdot t' \\ b_{\text{宽}} = 2R_{\text{传感器}} + L_{\text{巡逻}} \sin \theta + V_{\text{sub}} \sin \varphi \cdot t' \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $t'$  不能取为反潜巡逻机搜索时间  $t$ ,除非编队航速为0。考虑到巡逻线的目的是保障编队航渡安全,因而取  $t'$  为编队通过巡逻线在航速方向分量的时间,则有

$$t' = \begin{cases} \frac{L_{\text{巡逻}} \cos \theta}{V_{\text{编队}}}, & V_{\text{编队}} > 0 \\ t, & V_{\text{编队}} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

巡逻线若垂直敌潜艇可能航向设置,即有  $\varphi = \pi/2 - \theta$ ,代入式(9)得

$$\begin{cases} a_{\text{长}} = 2R_{\text{传感器}} + L_{\text{巡逻}} \cos \theta + V_{\text{编队}} t + V_{\text{sub}} \sin \theta \cdot t \\ b_{\text{宽}} = 2R_{\text{传感器}} + L_{\text{巡逻}} \sin \theta + V_{\text{sub}} \cos \theta \cdot t' \end{cases} \quad (11)$$

### 4 实例与仿真分析

想定:反潜巡逻机在相对固定的巡逻阵位上搜索,巡逻线长 60 km,与编队航向间的夹角  $\theta$  为  $60^\circ$ ;舰艇编队航速 18 kn (1 kn = 1.852 km/h);反潜巡逻机飞行速度 350 km/h;  $R_{\text{雷达,max}}$  为 30 km,  $P_{\text{探测,radar}}$  为 0.9,  $K_L$  取为 39.2;敌潜艇为隐蔽突防,其平均航速可能为 4 kn,  $R_{\text{探测}}$  为 35 km。

搜索时间变化时,反潜巡逻机使用雷达搜索的发现概率仿真结果如图4所示。其中,每一条线代表不同暴

露时间  $T'_{\text{潜露}}$  下的发现概率。

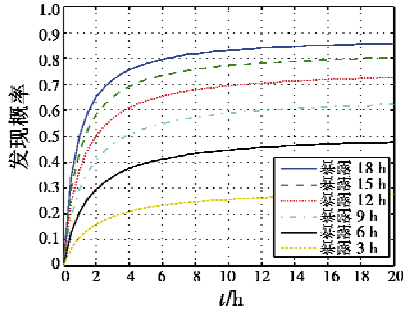


图4 不同搜索时间下的发现概率

Fig.4 Detection probability vs search time

由图4可知,随着潜艇一天内暴露的总时间  $T'_{\text{潜露}}$  逐渐减小,反潜巡逻机雷达搜索的发现概率也迅速降低,且降低的幅度越来越大;当  $T'_{\text{潜露}}$  减小为3 h时,发现概率已低至0.3左右。另一方面,搜索时间的增加,可使反潜巡逻机雷达搜索的发现概率迅速增加,但最后趋于某一定值。当搜索时间达到6~8 h,发现概率已经变化不大了。因此,单机在巡逻线上搜索时,搜索6~8 h为宜。发现概率随着搜索时间的不断增加最后趋于定值,即为最大发现概率,经计算,当前参数下最大发现概率如表1所示。

表1 不同  $T'_{\text{潜露}}$  时的最大发现概率

Table 1 The maximum radar detection probability with different  $T'_{\text{潜露}}$

暴露时间 $T'_{\text{潜露}}/h$	3	6	9	12	15	18
最大发现概率	0.301	0.512	0.659	0.761	0.833	0.884

若潜艇一天内暴露的总时间  $T'_{\text{潜露}}$  估计为6 h,巡逻线长度  $L_{\text{巡逻}}$ 、角度  $\theta$  变化时,反潜巡逻机使用雷达搜索的最大发现概率如图5所示。

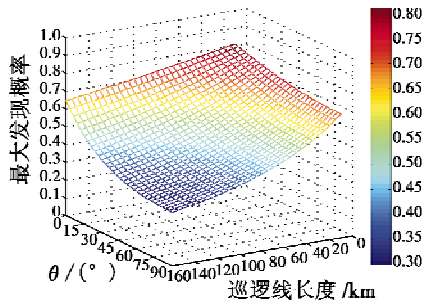


图5 不同巡逻线参数下的最大发现概率

Fig.5 The maximum detection probability for different patrol line parameters

图5表明,当巡逻线阵位相对固定,反潜巡逻机通过交接班方式使用雷达持续在巡逻线上长时间搜索时,发现概率并不是很高,尤其是增加巡逻线长度  $L_{\text{巡逻}}$  和增大角度  $\theta$  之后。根据图5,结合潜艇威胁扇面,可为指挥员确定巡逻线的长度和阵位提供参考。

## 5 结论

巡逻搜索是反潜巡逻机搜潜的主要手段之一。本文在分析巡逻搜潜特点的基础上,建立了雷达搜潜概率的面积等效模型,最后进行了仿真计算,得出结论如下所述。

1) 反潜巡逻机使用雷达在巡逻线上搜潜时搜索时间的增加使得发现概率也迅速增加,但最后趋于一定值。巡逻线长度、角度  $\theta$  对发现概率的影响较大。

2) 当反潜巡逻机使用雷达在相对固定的巡逻线上搜潜时,发现概率不高。因此,当搜潜任务要求发现概率较高时,不宜使用雷达进行搜索,反潜巡逻机可使用其他搜潜器材,如在巡逻线上投布声纳浮标,建立拦截阵等。

本文所建立的模型,能较好地反潜巡逻机使用雷达搜索的发现概率进行估算,可为反潜巡逻机搜潜作战指挥提供决策依据和参考。

## 参考文献

- [1] 天一. 对运-8改中国岸基巡逻机的探讨[J]. 舰载武器, 2006(1): 22-30.
- [2] 丁松林, 闫国玉. 反潜巡逻线搜索中声纳浮标发现概率的定量评估[J]. 舰船电子对抗, 2005, 28(5): 31-34, 40.
- [3] 丛红日, 黄启来, 陈邓安. 单机吊放声纳巡逻搜索线长度模型研究[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(2): 165-167.
- [4] 孙明太. 航空反潜战术[M]. 北京: 军事科学出版社, 2003: 57-58.
- [5] 太禄东, 刘曦霞, 韩庆伟. 航母水下防御研究[J]. 舰船电子工程, 2008, 28(8): 14-17.
- [6] 王祖典. 航空反潜非声探设备[J]. 电光与控制, 2006, 13(4): 6-8, 12.
- [7] 周贺, 吴勇. 某型潜用雷达侦察机对反潜机载雷达信号侦察方法初探[J]. 潜艇学术研究, 2001, 19(4): 35-36.
- [8] 吴柱, 孙睿, 许腾. 搜潜发现概率模型探讨[J]. 指挥控制与仿真, 2010, 32(5): 28-30.
- [9] 肖汉华, 万峻, 徐彬. 机载雷达搜索常规潜艇的建模与分析[J]. 现代雷达, 2008, 30(8): 13-17.
- [10] BORGES J M L. Radar search and detection with the CASA 212 S43 aircraft [D]. Monterey, CA: Naval Postgraduate School, 2004.
- [11] PILNICK S E, LANDA J. Airborne radar search for diesel submarines [D]. Monterey, CA: Naval Postgraduate School, 2005.
- [12] 屈也频. 机载搜索雷达搜潜作用距离实时预报模型[J]. 现代雷达, 2008, 30(9): 32-34.
- [13] 孙华春, 李长文. 反潜直升机雷达搜索概率模型[J]. 舰船电子工程, 2008, 28(9): 116-119.