

海雾中舰载红外系统有效探测距离的求解模型

李 伟, 邵利民, 唐 君, 郑崇伟

(海军大连舰艇学院 航海系, 辽宁 大连 116018)

摘 要: 为了精准研究舰载红外系统在海雾条件下的探测能力, 提高舰载防御系统在复杂条件下的作战使用效率, 在对红外系统工作原理和实际装备使用情况进行深入调查研究的基础上, 提出了以“两步计算法”来求取舰载红外系统在海雾中的有效探测距离。首先, 根据海雾强度水平先行求出红外传感器的理论探测距离, 然后对探测能力指数进行了定义并根据计算结果判断是否需要用探测能力指数二次计算有效探测距离。探测能力指数模型综合考虑了人、海洋环境和设备三方交互影响的因素, 以判断矩阵合理确定各方权重, 较好地解决了单纯依靠海雾信息进行计算而出现的失灵问题。

关键词: 海雾; 舰载红外系统; 探测距离; 求解模型

中图分类号: P47; TP391.9 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.0504002

An effective detection range calculation model for shipboard infrared system under sea fog conditions

Li Wei, Shao Limin, Tang Jun, Zheng Chongwei

(Navigation Department, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China)

Abstract: In order to precisely study the detection ability under sea fog conditions for shipborne infrared system and to improve the combat efficiency for shipborne defense system under complex conditions, based on a deep investigation for the actual equipment and working principle of infrared system, a "two step method" was put forward to calculate the actual detection distance of the system in the sea fog. Firstly, according to the sea fog intensity level, the theoretical detection distance of infrared sensor was got in advance, and then judge whether the second calculation was needed to get the actual effective detection distance by the detection capability index. The detection capability index model took into account the interactions among the human, marine environment and equipment. The model judges the weight of separate parties reasonably, effectively solves the problem of "computational failure" which is solely dependent on sea fog information.

Key words: sea fog; shipboard infrared system; detection range; calculation model

收稿日期: 2018-12-14; 修订日期: 2019-01-19

作者简介: 李伟(1980-), 男, 讲师, 博士, 主要从事天文、气象与红外技术的教学方面的研究。Email: apuredrop@163.com

通讯作者: 唐君(1983-), 男, 讲师, 硕士, 主要从事天文航海技术的教学方面的研究。Email: tjdegree@163.com

0 引言

从全球海军装备发展的实际来看,舰载红外探测系统已是各国新一代主战舰艇的重要配置,是新式舰艇的重要标志之一。军舰作为常年在海上执行各类任务的武备载体,不可避免地要受到海洋环境的深刻影响。在复杂多样的海洋环境之中,海面多发的海雾是对舰载红外传感设备影响最大的海洋气象条件之一。

1 海雾对红外能量衰减的分析

在舰载红外系统开机工作时,海空目标波段红外辐射的能量经过一定光程才能到达探测器,而在传播的过程中必然受到传播介质的衰减。就舰载红外传感器来讲,从世界范围来看,主流工作波段正在逐渐向 8~12 μm 范围转移,海面空气中的水汽、二氧化碳以及常见的海雾雾滴等都会对波段红外辐射产生衰减作用^[1]。在海雾条件下,尤其是在能见度不足千米的海雾中,海雾造成的散射能量衰减是相同距离上其他因素的十倍以上,成为影响舰载红外传感器正常工作的主要因素。

在海雾条件下,海雾气溶胶粒径尺度与舰载红外传感器的工作波段相差无几,红外辐射衰减遵从米氏散射定律。根据米氏散射的光学公式,若海雾的平均含水量为 W ,单位为 g/m^3 ,在正常情况下红外系统的最大探测距离为 $d(km)$,在海雾条件下的最大探测距离为 $d_x(km)$,则各参数之间具有如下关系^[1]:

$$\left(\frac{d}{d_x}\right)^2 \cdot 10^{(-45.2 Wd)} = 1 \quad (1)$$

根据公式(1)进行的海雾条件下舰载红外系统探测距离的计算称为“第一步计算”。

2 有效探测距离评估的实际困难

根据海雾含水量的情况对系统在雾中的探测距离求解(第一步计算)符合理论推导的公式,但却与实际观测的数据不尽相同,笔者把这种现象称为“计算失灵”问题。尤其在海雾强度较大的情况下,理论数据与实际观测相差较大,经分析其原因为:

(1) 海雾浓度在空间上具有较大的不均匀性和

时间上的不稳定性,直观的表现就是通常所说的“一团团、一阵阵”的特点^[2];

(2) 人与装备的契合情况等等不一。有的人善于分辨较远处目标的细微变化,有的人则对暗夜情况下的红外热像比较敏感,而有的人只能应付近处明显的红外成像;

(3) 红外系统有着自身的固有特点,有的在海雾条件下工作情况较为稳定,不受海雾浓度波动的影响,此外,随着设备的老化,舰载红外系统还可能会有其他难以预料的变化^[3]。

基于上述考虑,舰载红外系统有效探测距离的计算需要统筹兼顾主客观各方面的因素,以更加合理的方式进行进一步计算。

3 探测能力指数模型

3.1 模型综述

为了克服“计算失灵”问题,舰载红外传感器在海雾中特定方向上的探测能力,必须综合考虑人、设备和海雾环境的交互影响,科学确立各因素影响程度,并据此求取探测能力指数,以科学客观表征海雾对红外辐射的衰减程度,其计算流程如图 1 所示。

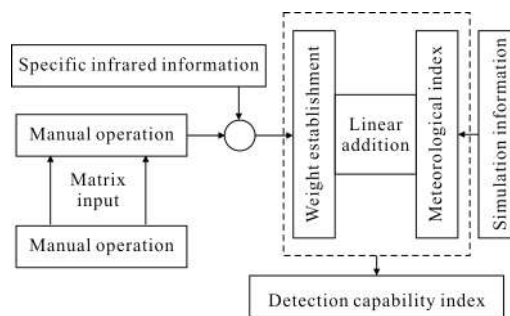


图 1 探测能力指数计算模型

Fig.1 Flow for calculating detection capability index

3.2 海雾环境要素及权重的确定

图 1 中,“权重建立 (Weight establishment)”环节来源于“或”运算,设备使用者对于人机磨合情况的把握集中体现在“人工操作(Manual operation)”环节中。通过输入两两比较的判断矩阵元素值,海雾信息的多方面属性对有效探测距离的影响(权重)可通过列出两两比较的判断矩阵求得。例如,经过调研,发掘出影响探测距离的要素为海雾的含水量、目

标距离、海表温度和成雾系统的稳定性四方面,设备使用者根据人机情况和海雾特点给出了如下的判断矩阵:

	含水量	距离	温度	系统
含水量	1	2	3/2	4/3
距离	1/2	1	2/3	2/5
纬度	2/3	3/2	1	1/2
系统	3/4	5/2	2	1

根据判断矩阵性质,在满足矩阵一致性的前提下,可得四方面的权重向量:

$$w=(0.333\ 9, 0.141\ 2, 0.196\ 8, 0.328\ 0) \quad (2)$$

判断矩阵是模型的核心参数,其正确性的唯一检验标准便是能否正确反映设备使用者在海雾中对目标的实际探测能力。最佳判断矩阵对于特定的人和设备来说是唯一的和动态变化的,只有在不断的比对调整中才能日臻完善。

在人与装备已有较长时间磨合且系统设备性能稳定的情况下,公式(2)中各项权重已经固化,可直接使用“特定红外信息(Specific infrared information)”代入计算以提高效率。

3.3 海雾环境指数计算

海雾环境指数是指,在一般情况下,无论对于何种类型的传感器,能够相对独立地表征特定海洋表面某项气象因素对红外辐射能量传输衰减影响大小的客观参量。在这里,把最好的情况定为 100,下面分类进行叙述。

3.3.1 由含水量决定的海雾强度指数

由于海面悬浮的海雾雾滴是造成红外能量散射衰减的主要影响介质,所以海雾的强度指数主要由海雾的液态水含量确定。海雾雾滴越多,含水量越大,对红外辐射能量的散射就越大。根据米氏散射理论,红外辐射在海雾中的透射率与距离具有复杂的指数函数对应关系^[5]。

在较浓海雾中,一定距离上红外辐射的透射率百分数为:

$$z_1=10^{\left(2-\frac{Ad}{10}\right)} \quad (3)$$

式中: d 为特定距离,km; A 为海雾衰减程度,dB/km。实际上,海雾强度指数就是特定方向上红外探测能力的主要指标。

3.3.2 探测目标距离指数

目标距离越近,成像越容易观察,即使在浓雾条件下,也可以出现由于局部空气的快速流动使目标短期内成像格外清晰的可能,熟练的操作者可以充分利用这种机会。总之,不管对何种类型的使用者,相应的客观因素指数均越大。经研究,距离指数可表式为^[4]:

$$z_2=-20d+90 \quad (4)$$

式中: d 为目标距离,nmile(1 nmile=1.852 km)。

3.3.3 温度(纬度)指数

随着海军活动范围的不断扩大,极区执行各类任务的机会越来越多,在高纬度地区,海雾形成以后可能被迅速冻结成为各种形状的微小晶体。浮动冰晶的存在会显著增大衰减程度,经研究,纬度指数可大致表示为^[4,6]:

$$z_3=\left(\frac{2}{3}\varphi+10\right)^{-1}\times 10^3 \quad (5)$$

式中: φ 为纬度数,(°)。

3.3.4 成雾系统稳定性指数

系统稳定性指数表征的是影响海雾生消的宏观气象系统稳定性与可预报性水平。一般来讲,气象预报的准确性是近似正确的,其正确性在距离指数中已体现,但是,在冷暖气团交替频繁迅速、或在特殊的海洋地理环境下,海雾预报分析将更加困难,其正确性也必然降低。

所以,增加时空指数可以更加真实可靠地反映海雾实际情况,提高评估的可信度。按照经验,时空指数可大致分为三个等级^[4,7]:

$$z_4=100\times\cos\left(\frac{\pi}{2}\times\frac{8-t}{8}\right) \quad (6)$$

式中: t 为北半球月份。

这样,四个方面的指数已经构建完毕,可以得到特定距离上的客观气象指数向量:

$$z=(z_1, z_2, z_3, z_4) \quad (7)$$

然后,与各要素权重线性加权即可得任意地点的探测能力指数:

$$t=wz^T \quad (8)$$

可见,探测能力指数是针对特定海雾条件和特定红外传感器的、与探测目标无关的性能指数,其大

小与海雾特点、目标距离和装备使用者偏好紧密相关。

3.4 探测能力指数的评级与使用

探测能力指数是描述海雾对红外设备影响的综合评价指标,它客观公允而又具有一定的个性化体现,较为真实地反映了人与装备的结合情况。根据人们的认知习惯,把指数分为四级,其范围如表 1 所示。

表 1 探测能力指数评级范围界定表

Tab.1 Definition of rating range for detection capability index

Index range	Grade
80-100	one-level
50-80	two-level
20-50	three-level
0-20	four-level

在较强海雾条件下(能见度小于 1 km),基于探测能力指数的有效探测距离求解公式为:

$$\left(\frac{d}{d_a}\right)^2 \frac{z}{100} = 1 \quad (9)$$

式中: d 为干洁空气中舰载红外系统的最大作用距离; d_a 为较强海雾条件下红外系统的有效探测距离。

4 实例运用

在实际应用中,较大范围海空的详细海洋气象信息可由大型计算机数值模拟系统推演获得,常用的有 WRF (Weather Research Forecast)、MM5(Mesoscale Model5)和 RAMS(Regional Atmospheric Modeling System)等^[6]。只要输入所需的边界条件,经系统运行后便可获得所需海洋表面空间的海雾微物理结构。例如,图 2 即为一次用 WRFV3.9 模拟后所得的黄海某海域海洋表面的海雾含水量分布情况,时间为北京时间 2017 年 6 月 23 日 00:00,4.1 和 4.2 即为据此计算的某红外系统不同方位上的探测能力指数和据此计算的有效探测距离。

经过美国环境预报中心(NCEP)、美国国家大气研究中心(NCAR)等权威机构的不断维护更新,WRFV3.9 已成为比较成熟的中尺度数值模拟系统,经过特定地区的敏感性试验后,数值模拟结果具有较高的可信度,已经成为很多国家的重要气象预报

手段^[9]。

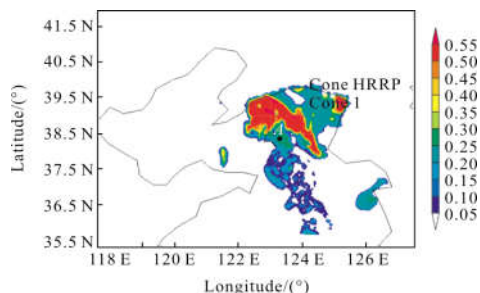


图 2 一次海雾的数值模拟结果(g/m³)

Fig.2 A simulation result for sea fog

4.1 第一步计算——求取探测能力指数

对于此次海雾,在图 2 中 A($\phi 38^{\circ} 19'.2N$, $\lambda 124^{\circ} 24'.5E$)点,首先进行了探测距离的全方位观测,然后根据再分析数据进行事后的数值模拟。根据文中所述模型计算红外探测系统不同方向上的探测能力指数,如图 3 所示。

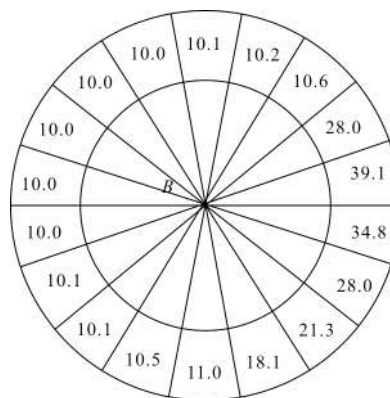


图 3 不同方位上的探测能力指数

Fig.3 Detection capability index in different directions

4.2 第二步计算——求取有效探测距离

海雾是造成波段红外辐射衰减的主要原因,根据军事需求的特点,在海雾强度较小的情况下(有效探测距离大于 2 km),可直接由海雾含水量求得最大探测距离^[7];但在海雾强度较大的情况下,须用探测能力指数进行修正才能得到较为客观的探测效能分布情况,保证舰载作战资源的有效使用。

对于一般水面目标(钢制外船体,侧面有效辐射面积为 950~1 200 m²),在图 2 所处的海雾环境下,只考虑海雾强度的不同方位上理论探测距离如表 2 所示。

表 2 不同方位上的理论探测距离

Tab.2 Theoretical detection range in different directions

Azimuth/(°)	Range/nmile
0	0.59
40	0.88
80	2.27
120	1.79
160	1.39
180	0.92
220	0.73
260	0.59
300	0.49
340	0.70

通过表 2 的计算数据可以看出：多个方位上探测距离不足 1 nmile，存在计算与实际相差较大的“计算失灵”问题，需要用探测能力指数进行修正。经修正后的各方位上有效探测距离如表 3 所示。

表 3 经修正后的不同方位探测距离

Tab.3 Revised detection range in different directions

Azimuth/(°)	Range/nmile
0	0.91
40	1.08
80	2.27
120	1.79
160	1.39
180	1.11
220	1.03
260	0.91
300	0.82
340	0.96

而通过舰载雷达确定的部分方位上的最大红外探测距离如表 4 所示。

因实地海上锚泊船舶数量有限，故不能保证每个方位上都有目标，且目标方位值也有少量偏差，但总体的观测数据表明，经修正后(经过第二步计算)的数值更接近于实际情况。

表 4 部分方位上的实际探测距离

Tab.4 Practical detection range in different directions

Azimuth/(°)	Range/nmile
358	0.86
042	1.05
081	-
115	1.82
160	-
183	1.15
220	-
260	-
310	0.81
341	0.90

5 结 论

多次的海上实测结果表明：基于探测能力指数的海雾条件下有效探测距离求解结果更符合设备使用的实际情况，说明此方法可以较为准确可靠地预知系统在特定海洋环境下的探测能力，为军舰执行各类任务提供了重要的辅助决策信息。

参考文献：

- [1] Li Wei, Shao Limin, Li Shujun, et al. Study on the features of China sea fog and it' s influence on intermediate infrared radiation energy attenuation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(8): 0804001. (in Chinese)
李伟, 邵利民, 李树军, 等. 我国海雾总体特点及对中红外辐射能量衰减的分析[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(8): 0804001.
- [2] Zhang Shuting, Niu Shengjie, Zhao Lijuan. The microphysical structure of fog droplets in a sea fog event in the south china sea [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science*, 2013, 37(3): 552-562. (in Chinese)
张舒婷, 牛生杰, 赵丽娟. 一次南海海雾微物理结构个例分析[J]. 大气科学, 2013, 37(3): 552-562.
- [3] Liu Yang, Fang Yonghua, Wu Jun, et al. Stray light analysis for a mid-infrared plane grating spectromrter system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44

- (4): 1164–1169. (in Chinese)
- 刘洋, 方勇华, 吴军, 等. 中红外平面光栅光谱仪系统杂散光分析[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(4): 1164–1169.
- [4] Li Wei, Tang Jun, Shao Limin, et al. A safety evaluation model under infrared remote sensing meteorological information for carrier aircrafts [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 0514001. (in Chinese)
- 李伟, 唐君, 邵利民, 等. 基于红外遥感气象信息的舰载机飞行安全性评估 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(5): 0514001.
- [5] Mishchenko Michael I, Travis Larry D. Scattering, Absorption, and Emission of Light by Small Particals [M]. Translated by Wang Jiang'an, Wu Ronghua, Ma Zhiguo, et al. Beijing: National Defense Industry Press, 2013. (in Chinese)
- Mishchenko Michael I, Travis Larry D. 微粒的光散射、吸收和发射 [M]. 王江安, 吴荣华, 马治国, 等译. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [6] Tao Shengjie, Yang Zhengwei, Tian Gan, et al. Method for improving detection efficiency using infrared pulse phase thermography [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 0504005. (in Chinese)
- 陶胜杰, 杨正伟, 田干, 等. 红外脉冲相位热像检测效率提高方法[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(5): 0504005.
- [7] Milbrandt J A, Yau M K. A multimoment bulk microphysics parameterization. Part I: Analysis of the role of the spectral parameter [J]. *Journal of the Atmosphere Sciences*, 2005, 62(9): 3051–3064.
- [8] Stoelinga M T, Warner T T. Nonhydrostatic, mesobeta-scale model simulations of cloud ceiling and visibility for an east coast winter precipitation event [J]. *J Appl Meteor*, 1999, 38: 385–404.
- [9] Zheng Chongwei, Pan Jing, Li Chongyin. Global oceanic wind speed trends [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2016, 129: 15–24.