

文章编号: 1672-8785(2016)06-0030-05

海水非温度分层条件下的舰船尾流 红外探测可行性研究

陈 翺^{1,2} 林春生² 杨 立³

(1. 中国人民解放军 91336 部队, 河北 秦皇岛 066326 ;

2. 海军工程大学兵器工程系, 湖北 武汉 430033 ;

3. 海军工程大学动力工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘 要: 在海面行驶时, 舰船后面会形成一条清晰可辨且持续时间很长的尾流区, 其长度可达数千米。利用红外成像技术进行尾流探测已成为世界上各大军事强国重点发展的一项军事侦察技术。首先, 从空间分辨率和温度分辨率两方面考虑, 推导出了舰船尾流的红外探测条件。然后基于红外测温原理, 推导出了海水非温度分层条件下舰船尾流与周边海水之间的等效温差的表达式。最后, 以阈值信噪比和目标等效条带数为基础, 得出了舰船尾流的红外探测概率。研究表明, 在海水非温度分层条件下, 只有当探测天顶角较大时, 才能以一定概率探测到尾流; 而且随着天顶角的增大, 探测概率逐渐提高。

关键词: 红外探测; 非温度分层; 舰船尾流; 探测概率

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2016.06.006

Feasibility Study of Infrared Detection of Ship Wake in Non Temperature Stratified Seawater

CHEN Xuan^{1,2}, LIN Chun-sheng², YANG Li³

(1. Unit 91336 of PLA, Qinhuangdao 066326, China;

2. Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

3. College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: When a ship sails on the sea, a clear wake with a very long lasting time will be formed behind it. The length of the wake can extend to several thousand meters. The detection of ship wakes by infrared imaging has been a military reconnaissance technology to be developed prior in each military power in the world. Firstly, in view of temperature resolution and spatial resolution, the infrared detection condition of ship wakes is derived. Secondly, on the basis of infrared temperature measurement principle, the expression of equivalent temperature difference between the ship wake and the sea surface in non temperature stratified seawater is obtained. Finally, on the basis of the threshold signal-to-noise ratio and equivalent band number, the infrared detection probability of the ship wake is derived. The research results show that the ship wake can be detected in non temperature stratified seawater only when the de-

收稿日期: 2016-04-07

基金项目: 国防预研项目 (1010502020202) ; 海军工程大学自然科学基金项目 (HGDJJ05009)

作者简介: 陈翺 (1981-), 男, 湖北武汉人, 博士后, 主要从事军事目标的红外特征模拟及隐身技术研究。

E-mail: chenxuan1019@126.com

tection zenith angle is larger. Moreover, the detection probability will increase with the increase of detection zenith angle.

Key words: infrared detection; non temperature stratification; ship wake; detection probability

0 引言

在海面行驶时, 舰船后面会形成一条清晰可辨且持续时间很长的尾流区, 其长度可达数千千米^[1]。当利用红外探测设备对海面进行大尺度搜索与探测时, 由于舰船自身相对较小, 在红外图像中不易分辨, 而且风浪较大时海洋背景杂波也可能会淹没舰船自身的红外特征, 因此尺寸远大于船体的舰船尾流在红外成像探测中更易于辨别。

舰船的尾流区主要分为开尔文波系、近场尾流区和远场尾流区等三个区域, 如图 1 所示。当风速较大或者舰船航速较小时, 开尔文尾迹波会被海面杂波“湮没”, 因而很难被发现。近场尾流区相对较小, 远程探测起来也较为困难。作为一种湍流尾迹, 远场尾流区是在船艏、舱底以及螺旋桨的共同作用下产生的, 且呈一条狭长的带状。该区域可沿船尾向后延绵数公里, 因此是红外远程探测中的理想目标源。

自 20 世纪中后叶至今, 国内外的相关研究机构已经对舰船尾流的红外探测进行了理论与实验研究, 并取得了一系列的研究成果。但其中大部分的研究工作都是基于海水沿纵向存在温度梯度这个前提条件开展的^[2-4]。然而由海洋

学常识可知, 海水在 1 年之中有 5 个月左右的时间并不存在垂直温度梯度, 导致舰船尾流区的温度与周边海面的温度之间没有差别。此时, 舰船尾流是否还具备红外成像可探测性便是本文所关心的问题。

1 舰船尾流的红外探测条件

对于红外成像探测系统来说, 一般用瞬时视场角 α (或 β) 和噪声等效温差 (Noise Equivalent Temperature Difference, NETD) 来反映它的空间分辨率和温度分辨率。在对舰船尾流进行红外探测时, 通常希望获取它们的成像特征, 从而达到在一定距离外发现目标的目的。红外成像系统能够发现舰船尾流的基本条件如下: 假定舰船尾流的空间频率为 f , 它与周边海水的实际等效温差在经过大气衰减后到达探测系统时, 仍不小于该频率下系统所对应的最小可分辨温差 (Minimum Resolvable Temperature Difference, MRTD), 同时尾流对系统的张角 $\Delta\theta$ 应不小于观察等级所要求的最小视角^[5], 即

$$\Delta T(\gamma, R) = \Delta T_e \tau_a(\gamma, R) \geq MRTD(f, T_b) \quad (1)$$

$$\Delta\theta = \frac{H}{R} = \frac{1}{2f} \geq n_e \alpha \quad (2)$$

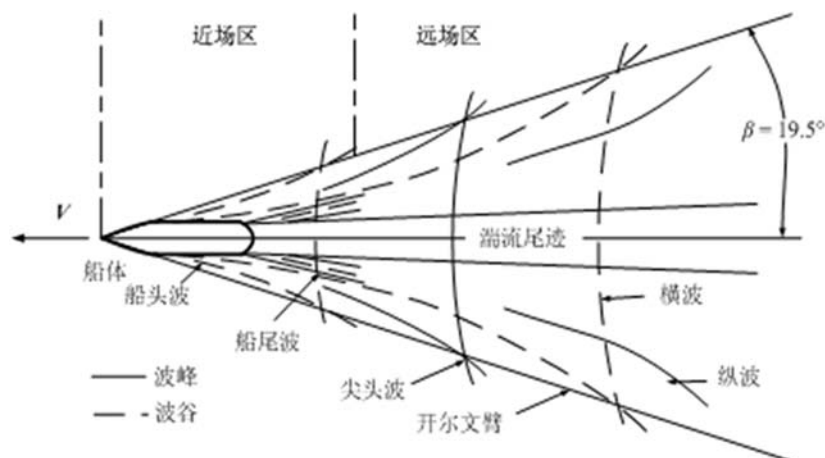


图 1 舰船尾流的示意图

式中, $\Delta T(\gamma, R)$ 为经大气衰减后尾流与周边海水之间的等效温差; γ 为探测方向的天顶角; R 为探测器与尾流之间的距离; ΔT_e 为零视距下尾流与周边海水之间的实际等效温差; $\tau_a(\gamma, R)$ 为平均大气透射比; $MRTD(f, T_b)$ 为经实际条件修正后的最小可分辨温差, 与 NETD 密切相关; f 为尾流的空间频率; T_b 为周边海水的温度; H 为尾流的临界尺寸, 一般为投影的最小尺寸; n_e 为不同观察等级要求下的目标等效条带数(半周期数)。当式(1)和式(2)两边取等号时, 即为对舰船尾流进行红外探测的极限条件。

凝视型红外焦平面探测器的 MRTD 可以表示为^[6]

$$MRTD(f) = \frac{\pi^2}{4\sqrt{14}} \cdot \frac{SNR_{DT} \cdot NETD \cdot f}{MTF(f)} \times \left(\frac{\beta N t_{int}}{t_{eye}} \right)^{1/2} \cdot (4\alpha^2 f^2 + 1)^{-1/4} \quad (3)$$

式中, SNR_{DT} 为阈值信噪比; $MTF(f)$ 为系统的总传递函数; N 为探测单元数; t_{int} 为探测器的光积分时间; t_{eye} 为人眼的光积分时间。

$MRTD(f)$ 是在实验室或理论分析条件下得到的。当实际用于目标观察时, 目标特性和环境条件并不满足标准条件, 因此必须对其进行修正。经实际条件修正后的 MRTD 为

$$MRTD(f, T_b) = k_1 k_2 k_3 MRTD(f) \quad (4)$$

式中, k_1 、 k_2 和 k_3 分别为目标形状修正系数、背景温度修正系数和信噪比修正系数。

2 等效温差

在非温度分层条件下, 海水沿纵向不存在温度梯度, 导致舰船的湍流尾流区与周边海面之间没有温度差别。但在有风条件下, 海面存在波浪且较为粗糙, 而舰船的湍流尾流区相对于周边海面来说较为平滑, 因此可按平静海面处理^[7]。在用红外成像探测器观测海面时, 视场内的舰船湍流尾流与周边海面之间在粗糙度方面存在差异, 导致它们的辐射及反射特性有所区别。即使尾流与周边海面之间不存在温差,

红外探测器所接收到的两者能量之间也会存在差异, 使得在海水非温度分层条件下对舰船尾流进行红外探测成为可能。这种能量差异所对应的温差即为尾流与周边海水之间的等效温差 $\Delta T(\gamma, R)$ 。

由红外测温原理可知, 对于具有灰体特性的被测物体来说, 热像仪在近距离测温时所指示的辐射温度 T_r 为^[8]

$$T_r = [\varepsilon T_0^n + (1 - \varepsilon) T_u^n]^{1/n} \quad (5)$$

式中, ε 为被测物体的发射率; T_0 为被测物体表面的真实温度; T_u 为环境温度; n 的取值与波段相关; 在 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段, $n=8.68$; 在 $8 \sim 13 \mu\text{m}$ 波段, $n=4.09$ 。因此, 在海水非温度分层条件下, 尾流与周边海水之间的等效温差 $\Delta T(\gamma, R)$ 可表示为

$$\Delta T(\gamma, R) = \tau_a(\gamma, R) \{ \varepsilon_w(\gamma) T_w^n + [1 - \varepsilon_w(\gamma)] T_u^n \}^{1/n} - \tau_a(\gamma, R) \{ \varepsilon_s(\gamma) T_s^n + [1 - \varepsilon_s(\gamma)] T_u^n \}^{1/n} \quad (6)$$

式中, T_s 为海面温度; T_u 为环境温度; T_w 为尾流温度; $\varepsilon_s(\gamma)$ 为探测方向 γ 上的海面发射率; $\varepsilon_w(\gamma)$ 为探测方向 γ 上的尾流表面发射率。海面及尾流发射率可用 Cox-Munk 粗糙海面模型计算^[9], 舰船湍流尾流可按平静海面处理(计算结果见图 2)。

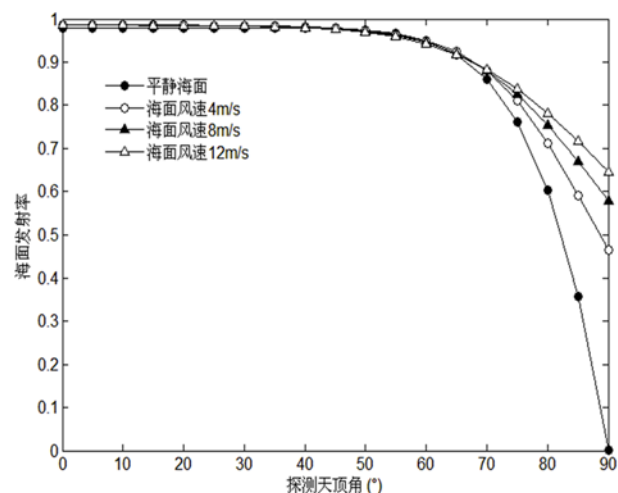


图2 海面及尾流发射率

图 3 所示为尾流与周边海水之间等效温差的计算结果。从图 2 和图 3 中可以看出, 当探测距离一定时, 在有风的情况下, 随着探测天顶角的增加, 平滑的尾流区与粗糙海面之间的表面发射率差异会逐渐增大, 导致等效温差也逐渐增大, 但同时等效温差也受大气沿程衰减的影响; 在接近水平方向时, 由于大气衰减作用很强, 等效温差会小幅减小。

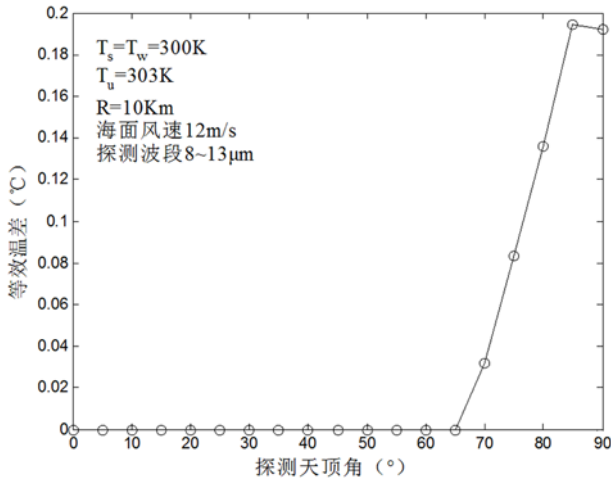


图 3 尾流与海面之间的等效温差

3 探测概率

由尾流红外探测条件可知, 当舰船尾流同时满足探测器的温度分辨率和空间分辨率条件时, 即可在一定的探测概率下按照观察等级要求发现、定向、识别或认清目标。对于尾流探测来说, 探测信号一般都十分微弱, 因此, 观察等级只需达到发现即可。在尾流红外极限探测条件下, 将式 (3) 和式 (4) 代入式 (1), 可将阈值信噪比 SNR_{DT} 表示为

$$SNR_{DT} = \frac{4\sqrt{14}}{k_1 k_2 k_3 \pi^2} \cdot \Delta T(\gamma, R) \cdot MTF(f) \div \left[NETD \cdot f \cdot \left(\frac{\beta N t_{int}}{t_{eye}} \right)^{1/2} \cdot (4\alpha^2 f^2 + 1)^{-1/4} \right] \quad (7)$$

探测目标所需的阈值信噪比 SNR_{DT} 与温度分辨探测概率 P_{d1} 密切相关, 即满足以下概率积分:

$$P_{d1} = \int_{-\infty}^{SNR_{DT} - SNR_{DT,50\%}} \exp(-z^2) dz \quad (8)$$

式中, $SNR_{DT,50\%}$ 为温度分辨探测概率为 50% 时的阈值信噪比, 通常取 2.8。在尾流红外极限探测条件下, 由式 (2) 可得:

$$n_e = \frac{H}{\alpha R} \quad (9)$$

与之对应的空间分辨探测概率为 P_{d2} , 即满足以下概率积分:

$$P_{d2} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{n_e - n_0}{\sigma}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz \quad (10)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.625 & \text{(发现)} \\ 0.824 & \text{(定向)} \\ 1.882 & \text{(识别)} \\ 3.529 & \text{(认清)} \end{cases} \quad (11)$$

式中, n_0 为探测概率为 50% 时的目标等效条带数, 其取值见表 1。

表 1 不同观察等级下的 n_0 值

观察等级	n_0
发现	1.0±0.25
定向	1.4±0.35
识别	4.0±0.8
认清	6.4±1.5

综合考虑温度分辨率和空间分辨率, 舰船尾流红外探测系统的总探测概率 P_d 为

$$P_d = \min(P_{d1}, P_{d2}) \quad (12)$$

式中, $\min()$ 为取小函数。

于是, 在知道探测器的性能参数时, 便可根据式 (10) 估算出红外成像探测器对舰船尾流的探测概率 (结果见图 4)。表 2 列出了探测器的性能参数。从图 4 中可以看出, 在尾流的临界尺寸为 20 m、探测距离为 10 km 的条件下, 只有当探测天顶角较大 (大于 65°) 时, 才能以一定概率发现尾流目标; 而且随着天顶角的增大, 探测概率迅速提高, 直到探测方向接近水平方向时, 才

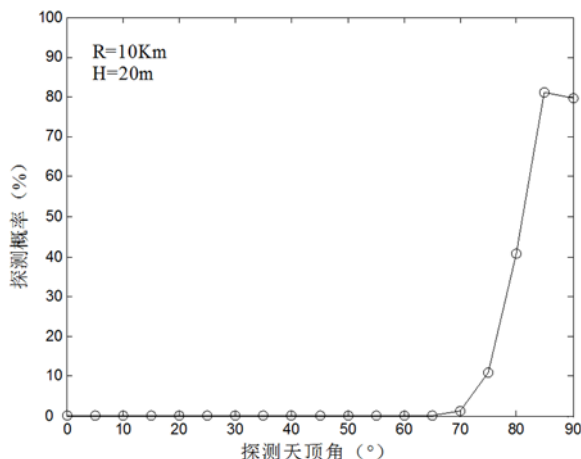


图 4 尾流的红外探测概率

表 2 红外探测器的性能参数

参数名称	符号	单位	数值
工作波段	$\lambda_1 \sim \lambda_2$	μm	8 ~ 13
噪声等效温差	$NETD$	K	0.05
瞬时视场角	α 或 β	mrad	0.1
光积分时间	t_{int}	μs	100
人眼的光积分时间	t_{eye}	s	0.2
探测器的像元数	N	—	320×240

会由于大气的强烈衰减作用而由峰值略微降低。

4 结束语

通过以上分析,我们可以得出以下结论:

(1) 在非温度分层的海水中行驶时,舰船产生的湍流尾流与周边海水之间几乎没有温度差别。但尾流区与周边自然海面之间在粗糙度方

面存在差异,导致它们的红外辐射及反射特性有所区别。因此,在一定的距离和探测角度下,利用红外成像探测器能够发现尾流目标。

(2) 只有当探测天顶角较大(大于 65°) 时,才能以一定概率发现尾流目标。随着天顶角的进一步增大,探测概率迅速提高,直到探测方向接近水平方向时,才会由于大气的强烈衰减作用而由峰值略微降低。

参考文献

- [1] Peltzer R D, Garrett W D, Smith P M. A Remote Sensing Study of a Surface Ship Wake [J]. *Int J Remote Sensing*, 1987, 8(5): 689-704.
- [2] Garrett W D, Smith P M. Physical and Chemical Factors Affecting the Thermal IR Imagery of Ship Wake [R]. Washington D C: AD-A144034, 1984.
- [3] Schwartz I B, Priest R G. Reflection Driven Ship Wake Contrasts in the Infrared [R]. Washington D C: AD-A198991, 1988.
- [4] 张士成, 杨桢, 杨立. 基于海面粗糙度的舰船尾流红外探测 [J]. *红外技术*, 2011, 33(1): 27-31.
- [5] 金伟其, 张敬贤, 高稚允. 热成像系统对扩展源目标的视距估算 [J]. *北京理工大学学报*, 1996, 16(1): 25-30.
- [6] 吴小平, 周起勃, 邬敏鸣. 红外焦平面凝视热成像系统评估方法研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 1993, 12(4): 249-253.
- [7] Pichel W G, Clemente P. NOAA Coast Watch SAR Applications and Demonstration [J]. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 2000, 21(1): 49-57.
- [8] 杨立. 红外热像仪测温计算与误差分析 [J]. *红外技术*, 1999, 21(4): 20-24.

新闻动态 News

法国 Sofradir 公司决定开始批量生产 Daphnis HD 型中波红外探测器

据 www.sofradir.com 网站报道, 法国 Sofradir 公司最近宣布, 具有强大竞争力的 Daphnis HD 型中波红外探测器将投入生产。与市场上近期推出的同类产品相比, 这款像元间距为 $10 \mu\text{m}$ 的高分辨率红外探测器据称在性能上更胜一筹。在广泛试用该产品之后, 一些特选客户对此作出了正面反馈并随后签订了新的订单, 因此 INFRARED (MONTHLY)/VOL.37, No.6, JUN 2016

Sofradir 公司决定开始批量生产 Daphnis HD 型中波红外探测器。

Daphnis HD 型中波红外探测器可以为先进军事设备带来更宽的视场、更远的探测距离以及更高的分辨率。其主要特征如下: (1) 分辨率为 1280×720 ; (2) 与前代产品相比, 其探测、识别、确认 (DRI) 距离的增幅高达 55%; (3) 与像元间距为 $15 \mu\text{m}$ 的中波红外探测器相比, 其视场增加一倍; (4) 读出集成电路 (ROIC) 具有数字输出功能, 且易于集成; (5) 与高清屏幕格式以及可见光或短波红外相机通道完全兼容。

□ 岳桢干

<http://journal.sitp.ac.cn/hw>