

基于射线跟踪算法的舰船尾迹波红外特征与探测

张士成¹, 杨立², 石恒¹

- (1. 镇江船艇学院 船艇动力指挥系, 江苏 镇江 212003;
2. 海军工程大学 动力工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 舰船驶过海面后会形成一条长度可达数千米且持续很长时间的尾迹区。这种显著特征为利用尾迹波的红外特征来探测舰船提供了依据。从舰船尾迹区特点出发, 实现了尾迹波的可视化仿真。在 Cook-Torrance 光照模型的基础上建立了适用于舰船尾迹波的红外成像模型。采用射线跟踪算法, 并综合考虑太阳辐射、天空背景辐射和大气传输等环境因素的影响, 得到了不同探测条件下舰船尾迹波的红外成像特征。结果表明: 俯仰角较小时海面整体较暗, 舰船尾迹波特征明显; 俯仰角较大时海面整体较亮, 舰船尾迹波特征减弱; 开尔文尾迹的成像特征受气温变化影响较小, 湍流尾迹在低俯仰角低气温时为一条暗带, 高气温时为一条亮带; 海面风速增加, 开尔文尾迹最终会无法分辨, 湍流尾迹成为唯一可识别的舰船尾迹波特征。

关键词: 红外特征; 舰船尾迹波; 射线跟踪; 红外探测; 开尔文尾迹; 光照模型
中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)05-1450-06

Infrared characterization and detection of ship wake based on ray tracing method

Zhang Shicheng¹, Yang Li², Shi Heng¹

- (1. Watercraft Power Command Department, Zhenjiang Watercraft College, Zhenjiang 212003, China;
2. College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: When the ship sails on the sea, a wake of several kilometers length and long continuous time will appear behind the ship. The bases for detecting ship through the infrared characterization of wake are provided by the apparent feathers of ship wake. Visible simulation of wake was achieved from the characterization of ship wake. An infrared imaging model of ship wake was established based on Cook-Torrance model. The infrared imaging characterization under different detecting conditions was obtained with ray tracing method, considering the environment influence of solar radiation, sky background radiation and atmospheric transmission comprehensively. Results indicate that, sea surface is integrally dark and ship wake is apparent at low elevation angle while the sea surface bright and ship wake weak at high elevation angle; the imaging characterization of Kelvin wake is weakly affected by air temperature, and turbulent wake is a dark band at low elevation angle and air temperature but a bright band at high air temperature; Kelvin wake will be eventually unrecognizable with increasing sea surface wind velocity, then the turbulent wake is the only ship wake characterization that can be recognized.

收稿日期: 2014-09-11; 修订日期: 2014-10-20

作者简介: 张士成(1984-), 男, 博士, 主要从事目标红外特征及探测的研究。Email: schzhang@yahoo.com

Key words: infrared characterization; ship wake; ray tracing; infrared detection; Kelvin wake; illumination model

0 引言

舰船在海面航行后,由于船体及附属装置与海水的相互作用,会在海面留下一条明显的尾迹区。利用机载或星载的红外探测系统、可见光传感器和合成孔径雷达等装置发现舰船航行后的这种特性尾迹波纹长度可达数千米,且能够持续很长时间^[1]。尾迹区中特征较为明显的是开尔文尾迹和湍流尾迹。

随着红外成像与探测技术的发展^[2],红外跟踪和制导技术在海面军事作战中得到了越来越广泛的应用,然而伴随着新材料、新技术的广泛应用,新型舰船采用红外抑制技术、水幕隐身等手段^[3],其红外辐射特征已经大幅减弱。同时,在对海面进行大尺度观测时,舰船自身目标相对较小,在红外成像图像上不易分辨。海况系数较高时,海洋背景杂波也可能会淹没舰船自身的红外特征。由于舰船尾迹波的尺度远大于舰船目标,在图像上更易辨别。因此可以利用船后尾迹波的红外特征对海面上的舰船进行探测识别,结合当地海况、气候条件及尾迹波红外成像特征分布规律,理论上可以获得舰船结构特征和航向等方面的参数,为战术制定和导弹远程制导提供重要参考。

传统的舰船尾迹红外探测主要是基于舰船航行时对具有温度梯度海水层的扰动或潜艇水下排放冷却水形成的海面温度分布异常,利用船后的热尾迹进行探测^[4-6],并没有考虑尾迹区各种尾迹波浪特征的影响。由于舰船尾迹区包含几种不同的波形,红外成像特征较为复杂,目前国内外公开的文献主要是针对海面波浪红外特征进行研究^[7-8],在舰船尾迹波浪的红外特征方面涉及较少。参考文献[9]从湍流尾迹与粗糙海面表面粗糙度不同的角度对舰船湍流尾迹进行了红外遥感研究,但对于尾迹波整体红外特征并没有深入的研究。参考文献[10]对8~12 μm波段 Kelvin 尾迹的红外特征进行了研究,但其结果表明在风速较大或舰船航速低时 Kelvin 尾迹自身已经较难识别。因此,仅仅利用 Kelvin 尾迹的红外特征来探测舰船具有一定的局限性,综合运用多种尾迹的红外成像特征是非常有必要的。文中针对海面舰船

尾迹波红外成像的特点,在 Cook-Torrance 光照模型基础上建立了适用于舰船尾迹波的红外成像模型,综合考虑太阳辐射、天空背景辐射和大气传输等环境参数的影响,采用射线跟踪算法,研究了不同观测条件下舰船尾迹波多种尾迹的红外成像特征,对利用舰船尾迹波红外探测舰船目标具有重要的军事意义。

1 舰船尾迹波的建模

舰船尾迹波示意图如图 1 所示。

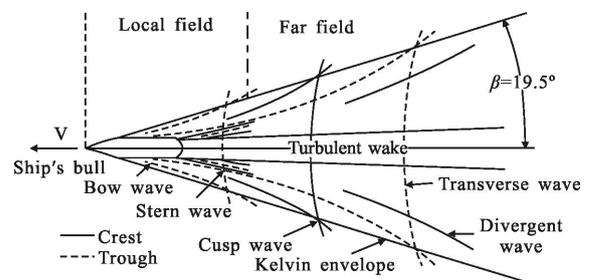


图 1 舰船尾迹波示意图^[1]

Fig.1 Schematic diagram of ship wake

舰船尾迹区由几种不同类型的波组成,尾迹波的建模主要涉及到开尔文尾迹、湍流尾迹和海面形态三个部分。开尔文尾迹的模拟可参考文献[11]的方法,海面形态建模主要考虑低风速下尾迹区的波形特征,此时海面白沫分布较少,因而未计入海面白沫的影响。

一般大风环境下海面很不平静,而湍流尾迹表面却显得较为平滑^[9],因此可将湍流表面视为平静海面。这里引用参考文献[12]的结论,在船后距离船尾 x 处,湍流尾迹的宽度 $W(x)$ 可表示为:

$$W(x) = \frac{\bar{\omega}_0}{1/\alpha} B^{(\alpha-1)/\alpha} x^{1/\alpha} \left(\frac{\bar{x}_0 L}{B} \right) \quad (1)$$

式中: L 为船长; B 为船宽; α 、 $\bar{\omega}_0$ 、 \bar{x}_0 为经验系数,可由试验确定^[12]。

综合考虑三种波形的影响,即可得到舰船尾迹区的模拟图像,如图 2 所示,此处采用的参数为:风速 $u=5$ m/s,船长 $L=50$ m,船宽 $B=8$ m,吃水深度 $d=3$ m,舰船航速 $v=10$ m/s。

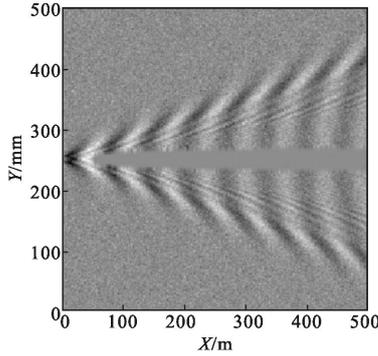


图2 舰船尾迹区模拟图

Fig.2 Simulated diagram of ship wake

2 舰船尾迹波的红外成像模型

由红外成像原理可知,在对目标进行红外成像时,红外成像仪接收到的辐射能分为目标自身辐射和目标对周围环境辐射的反射两部分。海平面上反射部分的能量主要包括太阳辐射和天空背景辐射,同时辐射传输过程中还会受到大气路径辐射的影响。因此,海面上红外成像仪所接收到的辐射亮度可表示为:

$$L_{\lambda} = \tau_{\text{air}} [L_s(\lambda, T_0, \theta_v, \varphi_v) + \sum_{j=1}^n \int_{\Omega} \rho_j(\lambda, T_0, \theta_v, \varphi_v, \theta_i, \varphi_i) \cdot L_{i,j}(\lambda, T_B, \theta_i, \varphi_i) \cos \theta_i d\omega] + L_{\text{air}}(T_{\text{air}}) \quad (2)$$

式中: $L_s(\lambda, T_0, \theta_v, \varphi_v)$ 是温度为 T_0 的海面在 (θ_v, φ_v) 方向的辐射亮度; $L_{i,j}(\lambda, T_B, \theta_i, \varphi_i)$ 是 (θ_i, φ_i) 方向入射到海面的辐射亮度,包括太阳辐射和天空背景辐射; $\rho_j(\lambda, T_0, \theta_v, \varphi_v, \theta_i, \varphi_i)$ 是目标表面的双向反射率分布函数; τ_{air} 为大气透射率; T_{air} 为气温; L_{air} 为大气的路径辐射亮度。

公式(2)即为通用的海面红外成像计算模型,由于舰船尾迹区主要涉及到3种不同类型的波面,不同类型波面的反射率没有统一的模型,若采用该红外成像模型计算较为复杂。几何光学中的射线跟踪算法^[13]能够很好地模拟射线传播过程中的反射、折射及物体间的相互遮挡影响,具有原理简单、实现方便和能够生成各种逼真的效果等突出优点。在红外领域,一般将海水视为不透明灰体,因此计算时可不考虑辐射传输过程中的海水折射作用。这里引入常用的Cook-Torrance光照模型^[14],结果如下:

$$L_r = L_a K_a + L_i (N \cdot I) d\omega (K_{\text{diff}} R_d + K_{\text{spec}} R_s) \quad (3)$$

式中: L_r 为直接光照下物体表面的反射光强; L_a 为环

境光光强; L_i 为入射光光强; $K_a, K_{\text{diff}}, K_{\text{spec}}$ 分别为环境光反射系数、漫反射系数和镜面反射系数; N 为表面平均法线; I 为入射光方向; $d\omega$ 是物体表面单位面积对光源的立体角; R_d, R_s 分别表示漫反射率和镜面反射率。

对于多光源情形,为了方便理解,公式(3)可改为

$$L_r = L_a K_a + \sum_{j=1}^n (K_{\text{diff}} L_{\text{diff}}^j + K_{\text{spec}} L_{\text{spec}}^j) \quad (4)$$

式中: L_{diff}^j 为漫反射分量; L_{spec}^j 为镜面高光分量。

由光照模型物理意义可知,公式(4)反映的是目标表面反射作用的影响,相当于红外辐射计算模型中反射项部分,公式中 L_a 对应天空背景辐射部分, $L_{\text{diff}}, L_{\text{spec}}$ 分别对应太阳辐射的漫反射和镜面反射部分。因此需对Cook-Torrance光照模型加以改进,计入物体自身辐射因素的影响,即可得到适用于红外辐射成像的光照模型。对于8~12 μm 波段,考虑大气传输衰减因素,可表示为:

$$L_{\Delta\lambda}^{8-12} = \tau_{\text{air}} [L_s^{8-12}(\epsilon_0, T_0, \theta_v, \varphi_v) + L_a^{8-12} K_a + \sum_{j=1}^n (K_{\text{diff}} L_{\text{diff}}^{j,8-12} + K_{\text{spec}} L_{\text{spec}}^{j,8-12})] + L_{\text{air}}^{8-12}(T_{\text{air}}) \quad (5)$$

式中: $L_s^{8-12}(\epsilon_0, T_0, \theta_v, \varphi_v)$ 为8~12 μm 波段物体自身辐射亮度。

公式(5)即为最终的红外成像计算模型,由式中可以看见,公式(2)中原本复杂的积分模型分化为环境光、漫反射光和镜面反射光三个部分,减少了需要跟踪的光线数目,大大简化了计算,提高了效率。

3 舰船尾迹波的红外成像特征

在对整个舰船尾迹区进行三维建模时,可以认为尾迹区是由大量方向不同且近似平面的小波面组成,此时采用射线跟踪算法对每个小波面逐层扫描,并考虑波面自身辐射和大气衰减因素,即可得到尾迹波的红外成像特征分布。由于红外成像仪显示的红外图像是将红外辐射值转换的灰度图像,这里将每个小波面的红外辐射值采用一定的算法转换为灰度值,该算法^[10]为:

$$G_{m,n} = \text{int} \left\{ \frac{L_{m,n} - L_{\text{min}}}{L_{\text{max}} - L_{\text{min}}} \right\} \cdot 255 \quad (6)$$

式中: $G_{m,n}$ 为图像中像素点 (m, n) 的灰度值; $\text{int}\{\}$ 为正向取整函数; $L_{m,n}$ 为目标表面与像素点对应区域的

平均辐射亮度; L_{\max} 、 L_{\min} 分别为成像系统定标辐射亮度的上下限。

尾迹波成像仿真的计算参数如下:风向东南,风程为 100km,探测方位设定为正南方向,船长 $L=50\text{ m}$,船宽 $B=8\text{ m}$,吃水深度 $d=3\text{ m}$,舰船航速 $v=10\text{ m/s}$ 。气温最高温为 $T_{\max}=28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、最低温 $T_{\min}=16\text{ }^{\circ}\text{C}$,海水水温 $T_{\text{sea}}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为了研究风速和探测俯仰角对成像结果的影响,分别选取风速为 $u=5\text{ m/s}$ 、 $u=10\text{ m/s}$,俯仰角 $\theta_i=10^{\circ}$ 、 $\theta_i=45^{\circ}$ 、 $\theta_i=85^{\circ}$ 。为了便于对不同探测俯仰角的模拟图像进行对比分析,生成的模拟图像采用统一的角度处理方式。

不同风速和俯仰角下的成像结果如图 3、图 4 所示,此时气温为 T_{\min} 。由图 3 可以看出,随着探测俯仰角的变化,舰船尾迹波会呈现不同的红外成像特征。俯仰角为 10° 和 45° 时,可以观测到非常明显的开尔文尾迹波形,且海面背景偏暗;而在俯仰角增加至 85° 后海面背景较亮,此时开尔文尾迹特征反而较弱。这主要是因为气温比海水温度低时, $8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ 波段的海面红外辐射以自身辐射为主,海面由于本身各个小波面的探测方位不同,波面会出现明暗相间的变化,低俯仰角下海面发射率较低,自身辐射能少,只有面向观测方位的小波面显得较亮,表现为图像上的白色小斑点,所以海面整体显得较暗,反之亦然。而开尔文尾迹相较周围海面波面较大,波面自身辐射特征比较明显,表现为大的亮斑,因而从图像上比较容易分辨出尾迹的特征分布;在高俯仰角时,由于整个海面显得明亮,开尔文尾迹的波面特征表现较弱。由参考文献[15]中关于海面发射率的研究结果可知,平静海面的发射率在高俯仰角时与粗糙海面基本一致,而在低俯仰角时会小于粗糙海面。由于湍流尾迹区域表面平滑,类似于平静海面,其表面发射率在低俯仰角时会小于周围粗糙海面,自身辐射亦会弱于周围海面,表现为图像上的一条暗带;随着俯仰角的增加,湍流表面的发射率与周围海面相差无几,在高俯仰角时整个尾迹区较亮,图像上不易分辨出湍流尾迹。对比图 4 和图 3,随着风速的增加,同一参数下的船型在高速下时开尔文尾迹特征明显减弱,当俯仰角较大时其尾迹特征已经较难识别。原因主要在于,风速增加,海面的波高增大,表现为随机海浪的特征,开尔文尾迹受到周围海面的调制作用,此时高俯仰角下舰船尾迹的特征较弱不易

发现,低俯仰角下由于湍流尾迹表现为暗带,成为唯一可识别的舰船尾迹特征。因而风速是个极为重要的因素,能够直接影响到尾迹波红外探测的效果。

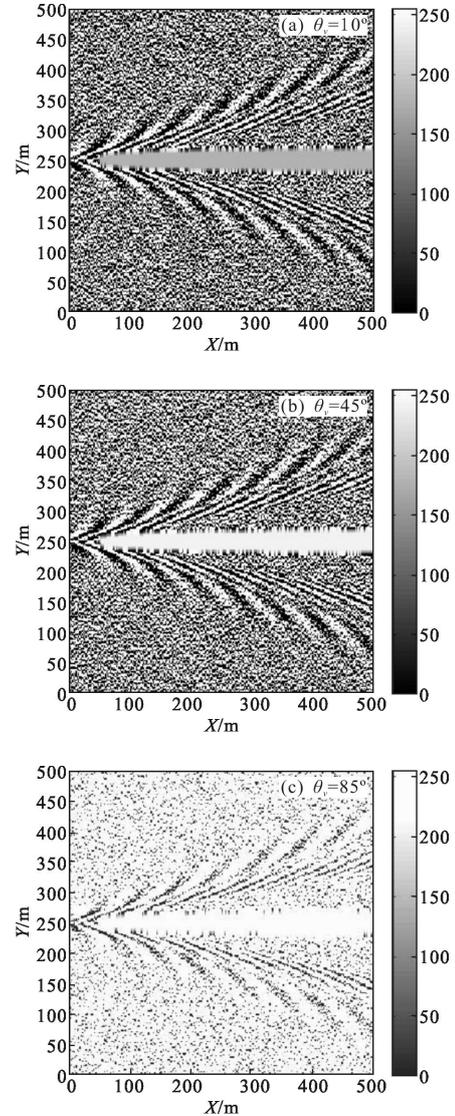


图 3 红外特征图像($u=5\text{ m/s}$)

Fig.3 Infrared characterization image($u=5\text{ m/s}$)

图 3 和图 4 中环境参数气温为 T_{\min} ,而气温升高后环境因素的影响会产生一定的变化,为了探讨这种影响,选取气温为 T_{\max} 、风速为 $u=5\text{ m/s}$ 时的尾迹波红外特征进行研究(图 5)。对比图 5(a)和图 3(a)可以得知,低俯仰角下气温发生变化时开尔文尾迹的特征变化较小。由于此时气温较高,相较海面自身辐射,环境辐射占据主导地位,低俯仰角时湍流尾迹表面反射率高于周围海面,能够反射到更多的环境辐射,反而比周围海面显得更亮。高俯仰角时,整个海

面的发射率差别较小,尾迹波特征皆不明显。由于一日中气温往往随白天和夜晚时刻的不同出现较大的变化,因而探测时刻的不同会对尾迹红外特征产生一定的影响,其中开尔文尾迹影响较小,而湍流尾迹在低俯仰角时会产生较大的变化。

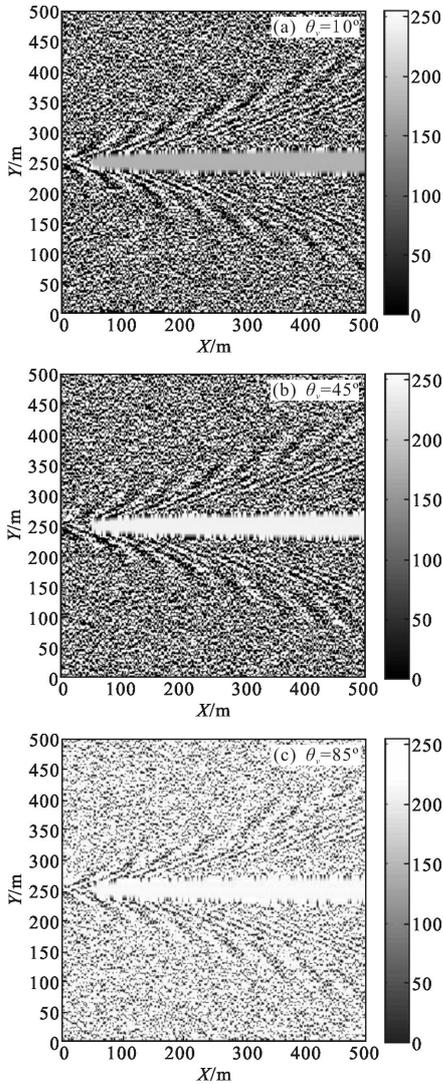


图 4 红外特征图像($u=10$ m/s)

Fig.4 Infrared characterization image($u=10$ m/s)

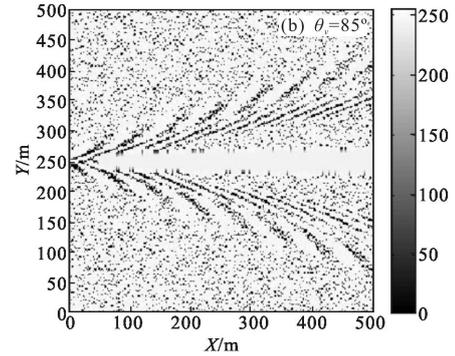
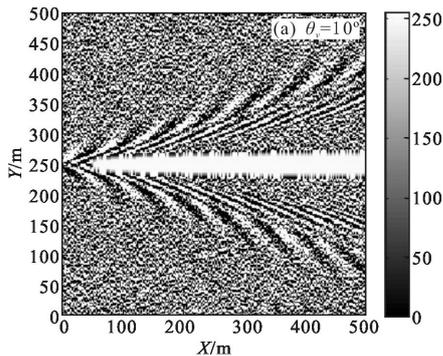


图 5 红外特征图像($T_{max}=28$ °C, $u=5$ m/s)

Fig.5 Infrared characterization image($T_{max}=28$ °C, $u=5$ m/s)

一年中的大部分时间海水在垂直方向都会存在温度梯度,螺旋桨的搅动会导致湍流尾迹区的温度低于周围海面,设定这一温度为 0.2 °C^[4]。如图 6 所示,气温为 T_{max} 时,对比图 5(b),高俯仰角下湍流尾迹区比周围区域稍暗,表现为一条暗带;低俯仰角下同图 5(a),湍流尾迹区较周围海面稍亮。因此,探测过程中,随着俯仰角由高至低,湍流尾迹区在视场中会出现先暗后亮的变化。

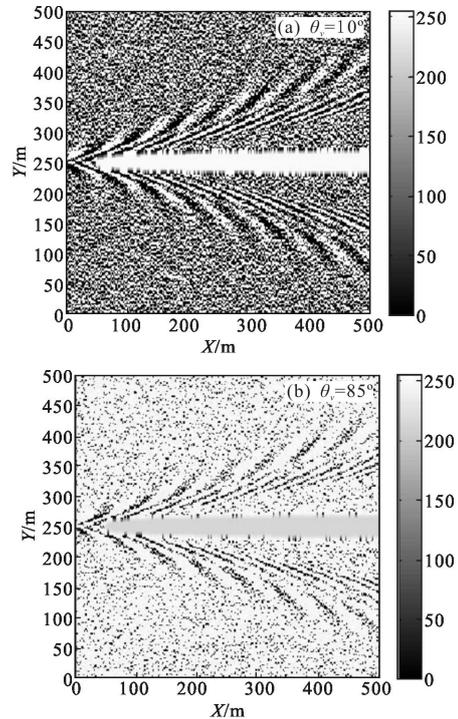


图 6 红外特征图像($T_{max}=28$ °C, $u=5$ m/s, $\Delta T=0.2$ °C)

Fig.6 Infrared characterization image($T_{max}=28$ °C, $u=5$ m/s, $\Delta T=0.2$ °C)

4 结论

文中针对海面舰船尾迹波红外成像的特点,在

Cook-Torrance 光照模型的基础上建立了适用于舰船尾迹波的红外成像模型,采用射线跟踪算法,并综合考虑环境参数的影响,得到了不同探测条件下舰船尾迹波的红外成像特征,主要结论如下:

(1) 探测俯仰角对探测结果有一定影响。低俯仰角下海面整体较暗,舰船尾迹波特征明显;高俯仰角时海面整体较亮,舰船尾迹波特征减弱。

(2) 气温的高低会对成像结果产生影响。开尔文尾迹的成像特征受气温变化影响较小,而湍流尾迹受气温影响较大,表现为低俯仰角低气温时为一条暗带,高气温时反而为一条亮带。

(3) 海面风速是影响尾迹波红外探测的重要因素。风速较高时,开尔文尾迹受到海面波浪的调制作用,最终会无法分辨,此时湍流尾迹成为唯一可识别的舰船尾迹特征。

(4) 海水存在温度梯度且气温较高情况下,随着俯仰角由高至低,湍流尾迹在视场中相比周围海面会出现先暗后亮的变化。

参考文献:

- [1] Reed A M, Milgram J H. Ship wakes and their radar images [J]. *Annu Rev Fluid Mech*, 2002, 34: 469-502.
- [2] Cai Yi, Hu Xu. State of the art and future trend of detectors for infrared imaging seekers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(1): 7-11. (in Chinese)
蔡毅, 胡旭. 红外成像寻的用红外探测器现状和发展趋势 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(1): 7-11.
- [3] Chen Xuan, Yang Li. The evaluation of the infrared stealth efficiency of the shipboard [J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(5): 335-337. (in Chinese)
陈翮, 杨立. 海面舰艇红外隐身效能评估[J]. 激光与红外, 2006, 36(5): 335-337.
- [4] Gu Jiannong, Zheng Xueling, Yang Li, et al. Experimental investigation of ship thermal wake characterization [J]. *Torpedo Technology*, 2000, 8(4): 6-10. (in Chinese)
顾建农, 郑学龄, 杨立, 等. 舰船热尾流特性的试验研究 [J]. 鱼雷技术, 2000, 8(4): 6-10.
- [5] Zhang Jian, Chen Xuan, Yang Li, et al. Study of temperature characteristic of cooling water discharged by underwater vehicle [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2009, 13(4): 533-539. (in Chinese)
张健, 陈翮, 杨立, 等. 水下航行器排放冷却水温度分布特性研究 [J]. 船舶力学, 2009, 13(4): 533-539.
- [6] Zhang Xiaohuai, Chen Xuan, Yang Li. The analysis and calculation of infrared signature of thermal wake of submarines [J]. *Laser and Infrared*, 2007, 37(10): 1054-1057. (in Chinese)
张晓怀, 陈翮, 杨立. 潜艇热尾流红外特征分析与计算 [J]. 激光与红外, 2007, 37(10): 1054-1057.
- [7] Constantikes K T, Osmanagich S. Seascape: raytracing synthetic marine clutter in the midwave infrared [C]//SPIE, 1996, 2741: 251-256.
- [8] Schwenger F, Repasi E. Sea surface simulation in the infrared modeling and validation [C]//SPIE, 2006, 6239: 62390J.
- [9] 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.
- [10] Zhang Shicheng, Yang Zhen, Yang Li. Infrared detection of 8-12 μm Kelvin wake under ocean background [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 1851-1855. (in Chinese)
张士成, 杨桢, 杨立. 海洋背景下 8-12 μm Kelvin 尾迹红外探测 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(10): 1851-1855.
- [11] Oumansour K, Wang Y, Saillard J. Multifrequency sar observation of a ship wake [J]. *IEE Proc Radar Sonar Navig*, 1996, 143(4): 275-280.
- [12] Zilman G, Zapolski A, Marom M. The speed and beam of a ship from its wake's SAR images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(10): 2335-2343.
- [13] Cook R T, Torrance K E. A reflectance model for computer graphics [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 1982, 1(1): 7-24.
- [14] Whitted T. An improved illumination model for shaded display [J]. *Commun ACM*, 1980, 23(6): 343-349.
- [15] Ren Haigang, Xing Qiang, Chen Hanping, et al. Sea surface radiation models in infrared image simulation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(5): 546-549. (in Chinese)
任海刚, 邢强, 陈汉平, 等. 红外仿真中的海面辐射模型 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(5): 546-549.