

舰船湍流尾迹红外发射率计算方法

金方圆,王运鹰,郭媛媛,齐 异,陈云飞

(水下测控技术重点实验室,辽宁 大连 116013)

摘 要: 红外发射率的准确计算是舰船湍流尾迹红外仿真与特性分析的基础。文中以湍流尾迹对 Cox-Munk 海面坡度概率密度分布的调制模型为基础,结合海面双向反射分布函数,研究了典型环境下舰船湍流尾迹海面红外发射率的计算方法;研究了机载小天顶角、船载大天顶角观测时,舰船湍流尾迹长波 8-9 μm 红外发射率的分布规律,得到了湍流尾迹与海面背景发射率的差别随观测天顶角的增大而增大的结论;仿真计算得到了秋季阴天船载式探测条件下,典型舰船湍流尾迹的红外辐射亮度,并与海上试验数据进行了对比,结果表明湍流尾迹的自发辐射亮度低于海面背景,表现为“冷尾迹”的特征。

关键词: 湍流尾迹; 红外发射率; 辐射亮度; 红外仿真

中图分类号: TN21 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0504003

A method for calculating IR emissivity of ship turbulent trailing wake

Jin Fangyuan, Wang Yunying, Guo Yuanyuan, Qi Yi, Chen Yunfei

(Science and Technology on Underwater Test and Control Laboratory, Dalian 116013, China)

Abstract: The accurate calculation of IR emissivity is the basis of modeling and analyzing the ship turbulent trailing wake in IR. Based on Cox-Munk probability distribution function (PDF) of slopes model, and corresponding to bi-directional reflectance distribution (BRDF) function of sea surface, a method for calculating IR emissivity of ship turbulent trailing wake in typical ocean environment was formulated. According to calculation, the emissivity distribution of typical ship turbulent trailing wake in 8-9 μm long-IR band for both small zenith angle of airborne detection and big zenith angle of shipborne detection were studied. The results show that the difference of emissivity between turbulent trailing wake and sea background is increased along with the detecting zenith angle. What's more, the radiance of turbulent trailing wake of typical ship is calculated in cloudy autumn shipborne detection condition, which is compared with the sea trial data. The results show that in typical ocean condition, the radiance of turbulent trailing wake is lower than sea background, presenting the characteristic of "cold trailing wake".

Key words: turbulent trailing wake; infrared emissivity; radiance; infrared simulation

收稿日期:2017-12-05; 修订日期:2018-01-03

基金项目:装备预研基金(9140C260306150C26113);总装预研项目(41416030401)

作者简介:金方圆(1989-),男,工程师,博士,主要从事水中目标光学特性方面的研究。Email:jinfangyuan610@163.com

0 引言

舰船尾迹包含多种物理场信息,在红外波段表现为 Kelvin 尾迹、白浪尾迹和湍流尾迹。Kelvin 尾迹是一种舰船船体对风驱海面波浪高度的调制作用,与周围海水存在着较强烈的红外辐射对比特征,常被用来对舰船红外探测和识别^[1];白浪尾迹发生在海空界面,具有较强的散射和较快消逝作用;湍流尾迹位于气泡湍流区域之后,通常是伴有表面粗糙度减弱的区域,同样常被用于舰船目标红外探测。

湍流尾迹具有结构复杂、持续时间长、随距离扩散慢等特点,目前尚未知悉其变化规律^[2],获取湍流尾迹红外发射率是研究舰船尾迹红外特征的基础。目前,人们对海面红外发射率计算模型的研究比较深入^[3-5],但针对舰船湍流尾迹引起的海面发射率变化的研究不多。Schwarz 从概率上考虑湍流尾迹与粗糙海面的红外对比度,认为由于舰船湍流尾迹表面较周围粗糙海面平滑,因此它能够定向反射和辐射更多的红外线,而粗糙海面反射的较少,所以红外图像上湍流尾迹显得比周围粗糙海面亮^[6];Vivian 等利用 ShipIR 软件产生的背景辐射和开发的海面辐射模拟器 SSRS(sea surface radiance simulator)计算了湍流尾迹与周围海水的红外对比度,并与海试结果进行了对比^[7],但海面发射率计算时使用的是平静海面模型,不能准确表达波浪海面的双向反射特性^[8];张士成等计算了 Cook-Torrance 光照模型下舰船尾迹波的红外特征,研究表明,高风速情况下 Kelvin 尾迹难以分辨,而湍流尾迹成为唯一可识别的尾迹波特征^[9],但仿真时将湍流尾迹区域视为平面。

文中利用 Cox-Munk 波浪海面发射率计算模型,结合舰船湍流尾迹海面粗糙度变化规律,得到了典型环境下湍流尾迹的发射率计算模型,研究了探测距离、方位等影响下湍流尾迹长波 8~9 μm 红外发射率变化规律,对典型环境下某型舰船湍流尾迹的辐射亮度进行了计算,并与试验结果进行了对比。

1 理论模型

1.1 湍流尾迹坡度概率分布

该模拟方法的基本思想是作用于探测器每个像素点的海面区域均符合 Cox-Munk 所描述的坡度概率密度分布函数:

$$p_{cm}(z_x, z_y, w) \approx \frac{1}{2\pi\sigma_{cm}^2} \exp\left(-\frac{z_x^2 + z_y^2}{2\sigma_{cm}^2}\right) \quad (1)$$

式中: $\sigma_{cm}^2 = \frac{0.003 + 0.00512w}{2}$ 为风驱海面的粗糙度; w 为风速; z_x, z_y 为波高分别在 x, y 方向的斜率。

湍流尾迹是对风驱海面的调制,与舰船航行状态、海洋环境等因素密切相关,目前尚未有统一的标准对其描述。Vivian 将湍流尾迹的粗糙度表示为^[7]:

$$\sigma_{tw}^2 = \left[\frac{1}{U_{msx}U_{msy}/\sigma_A^2 + 1/\sigma_{cm}^2} \right] \Gamma + (1 - \Gamma)\sigma_{cm}^2 \quad (2)$$

式中: $U_{msx} \propto x^{-4/5}$ 为舰船航行方向的湍流密度; $U_{msy} \propto \left(1 - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{W(x)}\right)^2\right) \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{W(x)}\right)^2\right)$ 为垂直舰船航行方向的湍流密度; σ_A^2 为最小风速时海面粗糙度;

$W(x) = \frac{\bar{\omega}_0}{1/\alpha} B^{(\alpha-1)/\alpha} x^{1/\alpha}$ 为湍流尾迹的宽度; L 为船

长; B 为船宽,而 $\bar{\omega}_0 \approx 4, \bar{x}_0 \approx 4, \alpha \approx 5$ 均为试验得到的经验值^[10]。

结合公式(1)和(2),湍流尾迹的坡度概率密度分布可表示为:

$$p_{tw}(z_x, z_y, w, x, y) \approx \left[\frac{U_{msy} \frac{\sigma_{cm}^2}{\sigma_A^2} x^{-4/5} + 1}{\sigma_A^2} \right] \cdot p_{cm}(z_x, z_y, w) \exp\left(-\frac{z_x^2 + z_y^2}{2\sigma_A^2} U_{msy} x^{-4/5}\right) \quad (3)$$

1.2 湍流区域海面发射率

根据 Cox-Munk 模型下海面反射率模型^[5,8],海面背景双向反射分布函数可定义为:

$$\rho(\theta_i, \varphi_i, \theta_e, \varphi_e) = \frac{\pi P_{tw}(z_x, z_y, w, x, y) \rho(\omega)}{4 \cos \theta_e \cos^4 \theta_i} \quad (4)$$

式中: θ_e 为反射方向的天顶角; $\theta_i = \tan(\sqrt{z_x^2 + z_y^2})$ 为波浪海面面元法线的天顶角; $\rho(\omega) = \frac{1}{2}(\rho_{\perp} + \rho_{\parallel})$ 为入射方向为 ω 时海面反射率,其中:

$$\rho_{\perp} = \frac{(q - \cos \omega)^2 + p^2}{(q + \cos \omega)^2 + p^2}$$

$$\rho_{\parallel} = \frac{[(n^2 - k^2) \cos \omega - q]^2 + (2nk \cos \omega + p)^2}{[(n^2 - k^2) \cos \omega + q]^2 + (2nk \cos \omega + p)^2}$$

$$p^2 = \frac{1}{2} [-(n^2 - k^2) + \sin \omega + \sqrt{4n^2 k^2 + (n^2 - k^2 \sin \omega)^2}]$$

$$q^2 = \frac{1}{2} [n^2 - k^2 - \sin\omega + \sqrt{4n^2k^2 + (n^2 - k^2\sin\omega)^2}]$$

式中： n 和 k 分别为海水折射率的实部和虚部，在 8-9 μm 波段， $n=1.198$ ， $k=0.09$ 。

为求湍流尾迹的双向反射分布函数，可将公式(2)中 P_{cm} 替换为 P_{tw} ，这样，任意探测角度 (θ_e, φ_e) 下，湍流尾迹的平均发射率可表示为：

$$\bar{\varepsilon}(\theta_e, \varphi_e) = \frac{S(\theta_e, \sigma_{tw}')}{\pi \sigma_{tw}' \cos \theta_e} \int_0^1 \int_0^\pi (1 - \rho(\omega)) \cos \omega \cdot \exp\left(-\frac{\tan^2 \theta_h}{2\sigma_{tw}'^2}\right) \sec^4 \theta_h d\varphi_h d\cos \theta_h \quad (5)$$

式中： φ_h 为海面面元法线的方位角； $S(\theta_e, \sigma_{tw}')$ 为遮挡系数，这里使用 Wagner 函数^[11]表示：

$$S(\theta_e, \sigma_{tw}') = \left[1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\cot \theta_e}{\sqrt{2} \sigma_{tw}'}\right)\right] [1 + f(\theta_e, \sigma_{tw}')]^{-1} \quad (6)$$

其中， $f(\theta_e, \sigma_{tw}') = \frac{1}{2} \left[\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\sigma_s}{\cot \theta_e} \exp\left(-\frac{\cot^2 \theta_e}{2\sigma_s^2}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{\cot \theta_e}{\sqrt{2} \sigma_s}\right) \right]$ ， σ_{tw}' 为湍流区域的均方根斜率。

2 仿真结果与分析

2.1 舰船湍流尾迹粗糙度

该模型假设条件是每个 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 海面面元的坡度分布均符合 Cox-Munk 模型，其发射率符合定向平均发射率模型，海面面元在热像仪 CCD 上感应成一个像素点。利用 Vivian 的舰船湍流尾迹模型对某舰船行驶后距离船尾一定距离海面粗糙度分布规律进行了仿真计算，如图 1 所示尾迹区域为 $x \in [30\text{ m}, 450\text{ m}]$ ， $y \in [-50\text{ m}, 50\text{ m}]$ 。计算选取参数为：船宽约 15 m，船长约 60 m，风速 5 m/s。由图 1 可知，从舰船尾部至 50 m 附近海面粗糙度变化明显 ($\sigma_{tw}^2(50\text{ m})=0.01$)，之后海面粗糙度随距离的增加缓慢降低，至 450 m

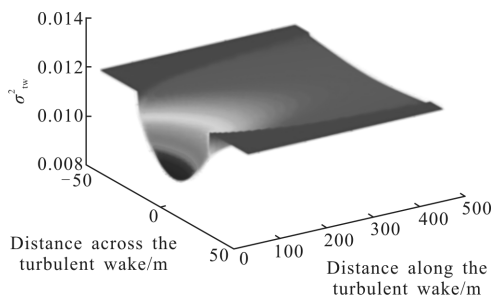


图 1 舰船湍流尾迹海面粗糙度分布

Fig.1 Sea surface roughness distribution of the ship turbulent trailing wake

处与周围海面差别较小；从舰船尾部至 450 m 附近湍流尾迹宽度逐渐增大，最大宽度约 90 m。

2.2 舰船湍流尾迹红外发射率

海面红外发射率的准确计算是海面目标准确探测的基础，研究证明，Masuda 的波浪海面发射率模型在遥感领域得到一致认同，并通过实验得以验证，公式(4)中海面背景反射特性是与 Masuda 类似的方法推导得到的，得到了广泛的应用^[5,12]。

利用公式(4)和(5)计算了风速为 5 m/s 时，不同探测角下湍流尾迹长波 8-9 μm 红外发射率，结果如图 2 所示，与参考文献[7]中海面发射率变化规律对比可见，随着探测角度的增大，海面发射率逐渐降低，而遮蔽因子极大地影响了探测天顶角度大于 70° 时的海面发射率。

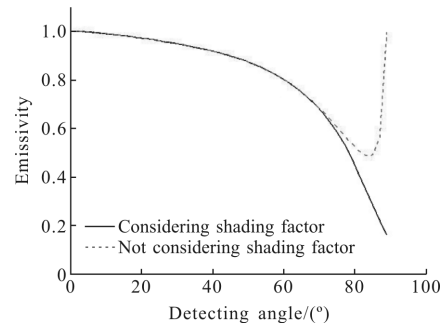


图 2 不同探测角度下海面面元的红外发射率

Fig.2 IR emissivity of sea surface with different detecting angle

舰船湍流尾迹红外发射率受探测器位置影响较大，文中对湍流尾迹中线处的长波 8-9 μm 红外发射率分布规律进行研究，并以相同观测条件下的海面作为背景。图 3 为探测器处于 300 m 高度但不同侧

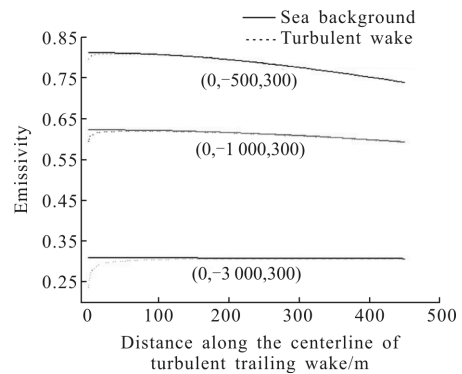


图 3 沿湍流尾迹中心线和海面背景的 8-9 μm 红外发射率

Fig.3 8-9 μm emissivity along the centerline of turbulent wake and the sea background

向位置时,沿湍流尾迹中心线湍流尾迹和海面背景的红外发射率分布曲线。由图 3 可知,探测器位置固定时,海面背景红外发射率基本不变,但距离舰船后方 50 m 范围内湍流尾迹发射率明显低于海面背景,大于 50 m 后,湍流尾迹的发射率略低于海面背景;随着侧向距离的增大,探测天顶角随之增大,湍流尾迹与海面背景的红外发射率差别也越来越大。

对舰船尾流的探测可用机载和船载方式,图 4(a)和图 4(b)分别为探测器位于(0, -1000, 300 m)和(0, -800, 15 m)时,湍流尾迹红外发射率分布,由于船体两侧涡流会引起海面粗糙度增大,导致海面发射率增大^[13-14],这在图 1 中没有显示。两者对比可见,机载小天顶角探测时,海面发射率的分布受探测视角影响较大;船载大天顶角探测时,海面发射率的分布受湍流尾迹影响较大。

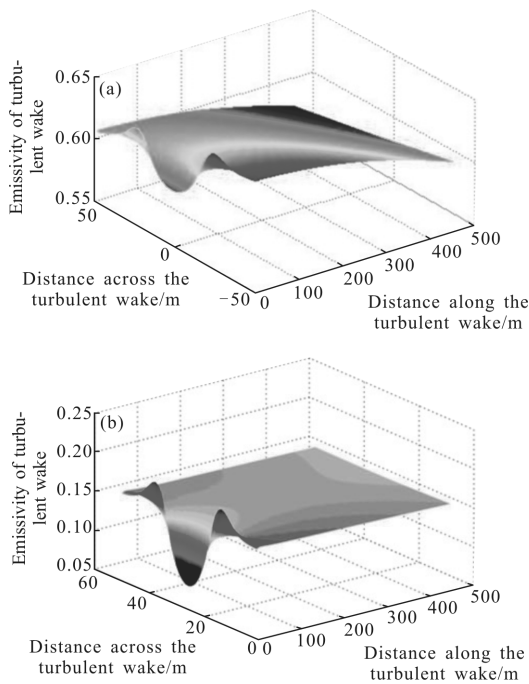


图 4 不同探测视角下湍流尾迹发射率分布

Fig.4 Emissivity distribution of turbulent wake in different detecting angle

2.3 舰船湍流尾迹红外辐射亮度

进入至探测器的辐射能量除了海面自身辐射外,还有反射的太阳辐射、天空背景辐射等,由于背景辐射难以测量,且一般经验公式准确度不高,国外现行的做法一般是在无阳光照射的阴天进行测量;另外,由于海洋温度梯度的存在,舰船螺旋桨会使海

面温度产生差异,这也会增加湍流尾迹红外仿真的难度。

为便于分析,文中仅对阴天、海水无温度分层环境下的湍流尾迹红外辐射亮度进行仿真,此时湍流尾迹的红外辐射亮度可表示为:

$$L_{tw}(\lambda, \theta_r, \phi_r, x, y) = \frac{\int_{\omega \leq \frac{\pi}{2}} \xi_{tw} p_{tw}(z_x, z_y, \omega, x, y) dz_x dz_y}{\int_{\omega \leq \frac{\pi}{2}} \alpha p_{sw}(z_x, z_y, \omega, x, y) dz_x dz_y} \quad (7)$$

式中: $\xi_{tw} = \alpha L(\lambda, T_{sea}, \theta_r, \phi_r, z_x, z_y)$, $\alpha = \cos(\omega) / \cos(\theta_n)$, $L(\lambda, T_{sea}, \theta_r, \phi_r, z_x, z_y)$ 为温度为 T_{sea} 的海面自发辐射亮度。

尾流区域沿湍流中心线的自发辐射亮度分布规律计算结果如图 5 所示。可见,若无背景光的影响,从船尾至船后 50 m 区间内湍流区域的红外辐射亮度明显低于海面背景。

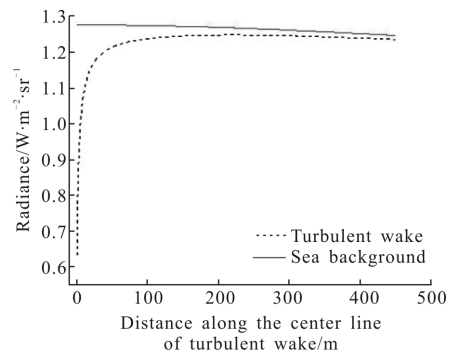


图 5 沿湍流中心线处湍流尾迹与海面背景的红外辐射亮度

Fig.5 Infrared emitted radiance along the centerline of the turbulent wake and sea background

为对模型进行验证,对秋季阴天大连海域某型舰船的湍流尾迹进行了四个单程的测试,某单程尾迹的红外图像如图 6 所示。测试条件为:测试日期

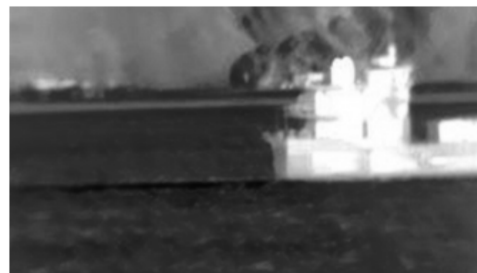


图 6 某型舰船湍流尾迹灰度图像

Fig.6 Gray image of ship turbulent trailing wake

10月24日,目标船距离测量船约800m,海面温度17℃,海面风速5m/s。

红外图像的灰度值在一定程度上反映了目标的辐射亮度。一方面靠近舰船尾部两侧涡流激起的海水会在一定程度上阻碍了船载大天顶角对舰船尾流的观测,导致无法获取这部分尾流区域的辐射信息,另一方面螺旋桨的作用,导致靠近舰船尾部湍流区域的粗糙度不能按照模型分布。文中仅对尾迹区域距离目标船尾20~50m范围内湍流区域的红外辐射特性进行分析,图7为该区域内舰船湍流尾迹灰度值的二维分布图。

由图7可知,阴天海面没有对背景光的反射作用,湍流尾迹引起海面粗糙度下降,表现为比周围海水表观辐射亮度低的“冷尾迹”特征;船体两侧产生的涡流会引起海面粗糙度的增大,表现为比周围海水表观辐射亮度高的“热边界”特征。

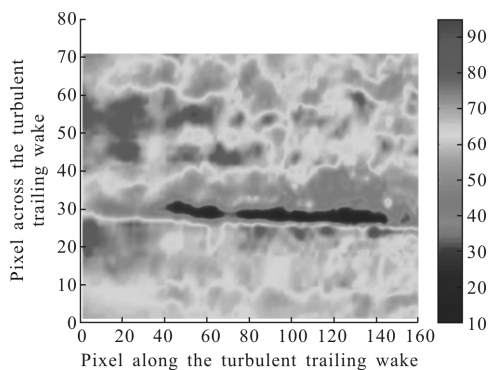


图7 距离船尾20~50m附近舰船湍流尾迹灰度值分布

Fig.7 Gray intensity distribution of typical ship turbulent wake (the distance between wake and stern is about 20-50 m)

图8为四个单程下湍流尾迹区域的归一化辐射亮度分布曲线。可见,不同单程目标尾迹的表观辐射

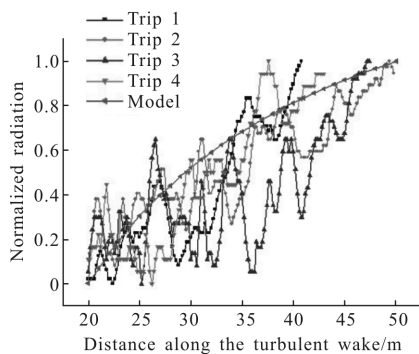


图8 舰船湍流尾迹归一化红外辐射亮度

Fig.8 Normalized infrared radiation of ship turbulent wake

亮度变化趋势与仿真结果类似,均表现为“冷尾迹”特征。但仿真结果与试验结果还存在一定的差别,分析原因有两点:一是舰船尾流引起的海面湍流尾迹结构复杂,而粗糙度调制法是理想化的方法,不能够完全反映海面粗糙度的变化;二是,虽不如典型夏季明显,10月末海水存在一定的垂向温度分层,舰船螺旋桨对海水的混合作用同样会加深“冷尾迹”特征。

3 结论

文中以湍流尾迹坡度概率密度分布模型为基础,建立了舰船湍流尾流的红外发射率模型,研究了探测距离方位影响下某型舰船湍流尾迹发射率的分布规律;对典型海洋环境下舰船湍流尾迹的自发辐射亮度分布进行了计算,与试验结果一致。研究结果表明,探测天顶角越大,湍流尾迹与海面背景的发射率差别越大;舰船湍流尾流会引起海面发射率降低,秋季阴天环境下,在红外热像仪中表现为“冷尾迹”特征。

参考文献:

- [1] Zhang Shicheng, Yang Zhen, Yang Li. Infrared detection 8-12 μm Kelvin wake under ocean background [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 1851-1855. (in Chinese)
- [2] Golbraikh E, Eidelman A, Soloviev A. On the helical behavior of turbulence in the ship wake [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2013, 25(1): 83-90.
- [3] Masuda K, Takayama Y. Emissivity and reflectance of the model sea surface for the use of AVHRR data of NOAA satellites [J]. *Pap Meteorol Geophys*, 1981, 32: 267-274.
- [4] Yoshimori K, Tamba S, Yokoyama R. Simultaneous measurements of skin sea surface temperature and sea surface emissivity from a single thermal imagery [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(24): 4937-4944.
- [5] Shi Jiabao, Wu Zhensen, Cao Yunhua. Study on reflection of sea surface in mid-IR [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(8): 2372-2375. (in Chinese)
- [6] Schwartz I B, Priest R G. Reflection driven ship wake contrasts in the infrared [R]. Washington D C: Naval Research Lab, 1988.
- [7] Vivian Issa, Zahir A D. Modeling the turbulent trailing ship wake in the infrared [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(19): 4282-4296.

- [8] Ren Haigang, Xing Qiang, Chen Hanping, et al. Sea surface radiation models in infrared image simulation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(5): 546-550. (in Chinese)
- [9] Zhang Shicheng, Yang Li, Shi Heng. Study on reflection of sea surface in Mid-IR [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(5): 1450-1455. (in Chinese)
- [10] Fabian D L, Alexander B, Marijke V. Optimizing the design of electro-optical micro-satellite imagers for ship detection using a real-time simulator[C]//SPIE, 2009, 7481(1): 341-353.
- [11] Wagner R J. Shadowing of randomly rough surfaces [J]. *Journal of Acoustic Society of America*, 1967, 41(1): 138-147.
- [12] Chen Y. Assessment of shortwave infrared sea surface reflection and nonlocal thermodynamic equilibrium effects in the community radiative transfer model using IASI data[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2013, 30: 2152-2160.
- [13] Ren Weijun, Ding Juanjuan, Liu Peng. Simulation and monostatic RCS calculation of ship turbulent wake [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2016, 31(3): 568-572. (in Chinese)
- [14] Matt S, Fujimura A, Soloviev A, et al. Fine-scale features on the sea surface in SAR satellite imagery -Part 2: numerical modeling [J]. *Ocean Science*, 2014, 10: 427-438.