

高分辨率卫星海洋背景成像仿真方法

宋 波^{1,2}, 崔文煜¹, 杜丽丽¹, 周川杰³, 易维宁¹

- (1. 中国科学院合肥物质科学研究院 安徽光学精密机械研究所
通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽合肥 230031;
2. 中国科学技术大学, 安徽合肥 230026;
3. 北京市遥感信息研究所, 北京 100085)

摘 要: 海洋背景的仿真是海面目标场景仿真的关键环节, 是海洋目标-背景耦合作用模拟的重要基础, 决定了仿真图像中目标与背景差异特征的正确性和真实性。高分辨率遥感成像下, 海面细节特征突显, 以往视海表为均匀辐射面的处理方法给高分辨率海洋场景仿真造成较大误差。重点研究了海面三维形态、多组分分布与海水方向反射特性的耦合作用和辐射模型, 提出了海面高分辨率遥感成像仿真方法。通过频谱分析的方法构建海面三维模型, 根据海面组分分布的不同及不同位置海面法向的不同, 修正了低分辨率下的海洋 BRDF 模型, 使其满足高分辨率卫星图像的仿真应用, 计算出不同组分的海面的方向反射数据, 并将其与海面三维模型关联, 构建了亚米级海面三维辐射模型, 通过光线追踪方法建立海面零视距辐射场, 并经过大气影响和传感器效应, 模拟不同海况条件下卫星遥感图像。结果表明: 将 ZY3-02 卫星实测海面图像与相同成像条件下的仿真图像对比, 图像均值的误差为 3.7%, 标准差误差为 9.9%, 可以较真实地模拟高分辨率卫星成像下的海洋背景。

关键词: 高空间分辨率; 海洋背景; 三维海浪; 海面辐射; 遥感成像仿真
中图分类号: P407 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20200514

High-resolution satellite ocean background imaging simulation method

Song Bo^{1,2}, Cui Wenyu¹, Du Lili¹, Zhou Chuanjie³, Yi Weining¹

- (1. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Hefei Institutes of physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
3. Beijing Institute of Remote Sensing Information, Beijing 100085, China)

Abstract: The simulation of ocean background is the key link of sea surface target scene simulation and the important basis of ocean target background coupling simulation, which determines the correctness and authenticity of the difference characteristics between target and background in the simulation image. In the high-resolution satellite image, the ocean background features were highlighted. The previous processing methods that regard the ocean background as a uniform radiation surface cause large errors in high-resolution ocean scene simulation. The coupling effect and radiation model of three-dimensional shape, multi-component distribution and directional reflection characteristics of ocean background were studied, and the simulation method of high-resolution satellite image of ocean background was proposed. A three-dimensional ocean background model was constructed by spectrum analysis. According to the different distribution of sea components and the different normal directions of ocean background at different positions, the low-resolution ocean BRDF model was modified

收稿日期: 2020-12-10; 修订日期: 2021-04-10

作者简介: 宋波, 男, 博士生, 主要从事遥感成像仿真方面的研究。

导师简介: 崔文煜, 男, 副研究员, 博士, 主要从事遥感信息处理、遥感成像仿真等方面的研究。

to meet the simulation application of high-resolution satellite images. The directional reflection data of different components were calculated and associated with the three-dimensional ocean background model to construct the sub meter ocean background three-dimensional model. Based on the radiation model, the zero line of sight radiation field was established by ray tracing method, and the satellite remote sensing images under different sea conditions were simulated by atmospheric influence and sensor effect. The results show that the average error of the image is 3.7% and the standard deviation error is 9.9% when comparing the sea surface image measured by ZY3-02 satellite with the simulation image under the same imaging conditions, which can simulate the marine background under high-resolution satellite imaging more truly.

Key words: high spatial resolution; ocean background; 3D waves; sea surface radiation; remote sensing imaging simulation

0 引言

近年来,利用高分辨率卫星影像对海面目标进行探测、发现和识别是遥感技术的一个重要应用方向^[1-2]。然而,公开可获取的高分辨率海洋舰船目标遥感图像较少,且难以覆盖不同海况、不同天候、不同目标和不同观测几何的各种情况。海洋目标场景仿真可为舰船目标检测识别算法的研究和验证,提供不同条件下的完备数据样本。

海洋场景仿真中,海洋背景仿真是关键环节,是海洋目标-背景耦合作用模拟的重要基础,决定了仿真图像中目标与背景差异特征的正确性和真实性。例如在高分辨率遥感影像中,海面起伏造成零星分布的耀斑,以及海浪泡沫形成的白帽等也可分辨,尺度与舰船目标近似,遥感器对其响应亮度值近似或高于舰船目标^[3-4]。因此,对于高分辨率海面遥感仿真,传统将海面视为单一均匀辐射面,仿真图像不能正确表征海面高分辨辐射特征,更无法准确刻画目标与背景的特异性,大大减低了仿真结果的应用效果。

目前,海面背景仿真的相关研究主要集中在海面三维模型和辐射特性两个方面。针对海面的三维模型, Fournier 将 Gerstner 海浪数值模型应用到海浪的可视化中,提出海面水质点绕着固定位置做椭圆运动,引入海底深度参数,实现较真实的海浪场景^[5]; 郑茂琦基于随机震动相关理论,提出了改进海朗普的海浪模型,解决了波峰及波谷变化突兀的问题^[6]; Lima 基于几何形状构建了卷浪模型,并将其嵌入海洋场景中,实现了浅海浪的仿真^[7]。但上述的研究内容还停留在模拟海浪的几何结构及视觉效果上,并没有考虑海浪的光学辐射特性。在海面辐射特性研究方面,唐军^[8]等基于蒙特卡洛模拟方法,构建了标量的水体辐

射传输模型,并用该模型分析了离水辐射的方向性分布特征。张鉴^[9]等基于矩阵算法,建立了标量的航洋-大气耦合辐射传输模型,并模拟了水色遥感参数的变化特性。但他们在考虑海面对太阳和天空背景辐射的散射和海面自身辐射时,多将海面视为均匀辐射面,忽视了海面三维结构动态变化的特性,以及该变化所带来的辐射调制作用^[10]。

在目标可辨识尺度下,海面三维特性突显,起伏表面调制海水辐射特性,呈现其辐射场特有的空间分布特性及图像特征。

文中研究了海况与海面几何特征的关联规律,建立了三维海浪模型,重点研究了三维海面对海水辐射特性的调制作用,建立了亚米级尺度的海面三维辐射特性模型,并根据不同光照和观测条件,利用光线追踪计算海面零视距辐射分布场。同时,模拟了三维海面反射的大气辐射传输和邻近效应作用,以及传感器系统调制,得到不同海况下高分辨率卫星海面成像结果,可以为海面目标检测效能评估提供有力的数据支撑。

1 三维海面辐射模型

高分辨率卫星观测下的海洋背景与低分辨率卫星不同,随着海表分辨率的提高,海面细节得以显现。因此,需要考虑因海面风力变化导致的海面起伏及白帽分布变化,结合海水的三维几何、组分分布及各组分辐射信息来构建高精度的三维海面辐射模型。建模拟型如图 1 所示,海面三维辐射模型由海面的三维几何模型与海水的各组分方向反射特性两部分组成,海水的各组分方向反射信息依托于构成海面三维几何的网格面片而存在,以面片的法向为基准反射方向。其中各组分的方向反射信息可以由叶绿素

浓度、海水含盐量、太阳角度、观测角度以及风速风向等参数进行计算得到,海面的三维几何构造及各组

分分布则可以根据海面的风速风向及海浪级别进行三维几何建模。

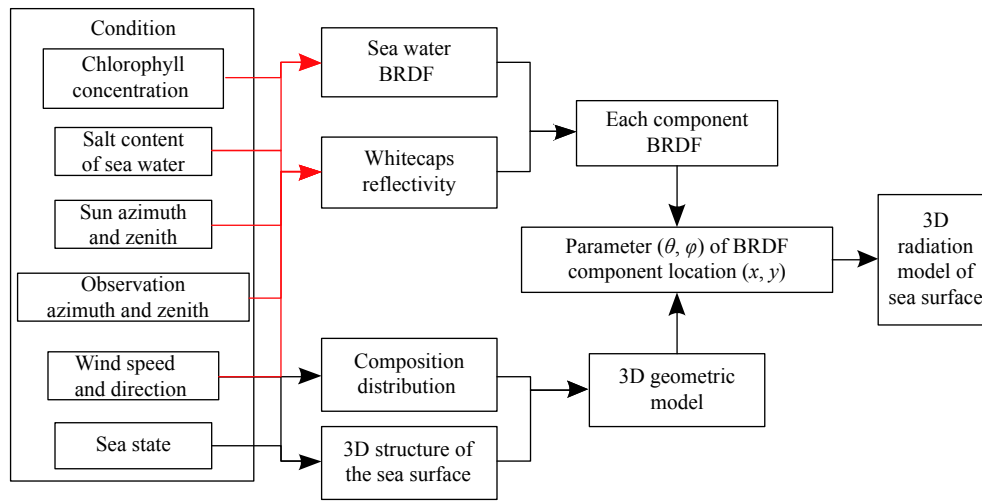


图 1 海面三维辐射模型结构图

Fig.1 3D radiation model structure diagram of the sea surface

1.1 海面几何模型

海浪的形成可由不同的物理理论来解释,但总体可以看作是大气到海洋的能量传递,海浪从生成到消退的过程可以看作是能量的摄取与消耗。风本身的运动又是复杂多变的,其产生的海浪无论是在时间上还是空间上都具有不规则性和不重复性^[11]。对于充分成长的海浪,在一段时间内认为它是平稳随机过程是足够精确的。从海洋学理论出发,用频谱函数描述海浪的表面,经傅里叶变化实现海浪的动态模拟,可以很好的体现海浪的随机性,同时也是海浪研究中应用最广泛的方法。采用基于 FFT(Fast Fourier Transform)的频谱分析方法,根据海面的实测风速,通过计算海浪的频谱函数得到多个频率、振幅对应的正余弦波,并利用 FFT 算法计算空间域下的海浪顶点高度^[12]。 $X=(x,y)$ 表示海面网格上的一点,其在 t 时刻的高度记为 $h(X,t)$,则其表达式为:

$$\begin{cases} h(X,t) = \sum_K \tilde{h}(K,t) \exp(iK \cdot X) \\ X = (x,y) \end{cases} \quad (1)$$

式中:波数向量 $K=(k_x,k_y)=(k \cos \theta, k \sin \theta)$, $k=|K|=\sqrt{k_x^2+k_y^2}$,其中 θ 为向量 K 与 x 轴正半轴的夹角; $\tilde{h}(K,t)$ 表示振幅的傅里叶分量。

$h(X,t)$ 通过 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform) 将波幅从波数域 K 转换到位置域 X ,可以通过位置和时

间计算出波幅:

$$\begin{cases} \tilde{h}(K,t) = \tilde{h}_0(K) \exp[i\omega(K)t] + \tilde{h}_0^*(-K) \exp[-i\omega(K)t] \\ \omega^2(K) = gk = g \sqrt{k_x^2+k_y^2} \\ \tilde{h}_0(K) = (\varepsilon_r + i\varepsilon_i) \sqrt{Ph(K)/2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: * 表示复数取共轭; ε_r 和 ε_i 为均值为 0 方差为 1 的高斯随机数; $Ph(K)$ 为 Phillips 谱,即:

$$Ph(K) = A \frac{\exp[-1/(kL)^2]}{k^4} \left| \frac{K \cdot u}{kU} \right|^2 \quad (3)$$

式中: A 为常数; $L = U^2/g$; $u=(U \cos \alpha, U \sin \alpha)$, U 为风速大小, α 为风向。

根据海况表的描述见表 1,利用上述的海浪模型模拟不同级别海浪的三维构造。将不同海浪等级对应的海面风速及风向参数代入公式 (3) 中,得到对应的 Phillips 谱 $Ph(K)$,再将 $Ph(K)$ 代入公式 (1) 和 (2) 中,得到海面上任一位置 $X(x,y)$ 在 t 时刻的高度 $h(X,t)$ 。利用海浪网格模型生成面片数为 $1\ 024 \times 1\ 024$,单元尺寸大小为 0.5 m 的海面三维网格模型。

在光学遥感影像中,具有实际应用价值的影像多是在无云晴好的天气下拍摄。这种天气对应的海况等级相对较低,所以文中主要对海面 1~4 级海浪进行模拟。图 2 为根据上述方法模拟的海面三维结构图。

表 1 海况表

Tab.1 Sea state table

Wave level	Sea state	Wave high/m	Wind rating(level)	Wind speed/m·s ⁻¹
No waves	0	0	0	0-0.2
Tiny waves	1	0-0.1	1	0.3-1.5
Small waves	2	0.1-0.5	2	1.6-3.3
Light waves	3	0.5-1.25	3-4	3.4-7.9
Middle waves	4	1.25-2.5	5	8-10.7
Billow	5	2.5-4	6	10.8-13.8
Mountainous waves	6	4-6	7	13.9-17.1
Wild waves	7	6-9	8-9	17.2-24.4
Angry sea	8	9-14	>10	>24.5

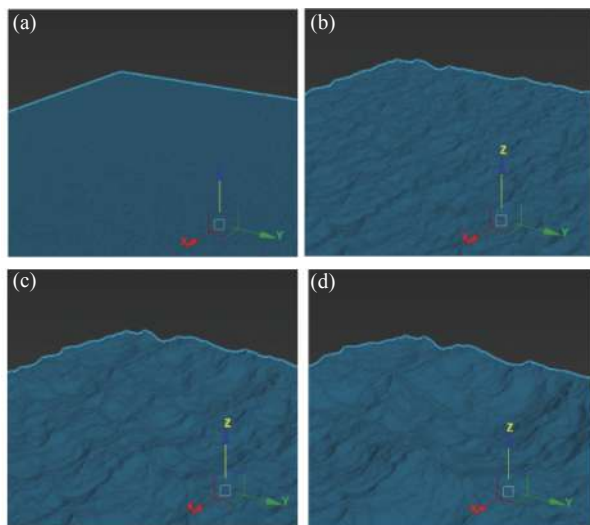


图 2 不同海况下的海面三维构造。(a) 1 级海况; (b) 2 级海况; (c) 3 级海况; (d) 4 级海况

Fig.2 3D structure of the sea surface under different sea conditions. (a) Level 1 sea state; (b) Level 2 sea state; (c) Level 3 sea state; (d) Level 4 sea state

1.2 海面辐射模型

为了确定上述海面三维网格模型中每个面片的方向反射信息,需要构建逐面片的海面三维辐射模型。根据 Koepke 在参考文献 [13] 中的描述,低分辨率情况下,在太阳光谱范围内,对于给定的一组几何条件太阳天顶角 θ_s , 观测天顶角 θ_v 和相对方位角 $\varphi(=\varphi_s - \varphi_v)$, 海面的反射率 $\rho_{os}(\theta_s, \theta_v, \varphi, \lambda)$ 可以总结为白帽反射

$\rho_{ef}(\lambda)$, 海表的镜面反射 $\rho_{gl}(\theta_s, \theta_v, \varphi, \lambda)$ 及海水中的散射反射 $\rho_{sw}(\theta_s, \theta_v, \varphi, \lambda)$ 三部分, 分别乘以各自的占比权重组成。

在高分辨率遥感图像中, 因具备了将水面白帽及水体区分开的分辨能力, 再以这种加性的方式将白帽与水体部分反射进行混合的方法将不再适用。需要分别获取海面各组分的反射信息, 构成海面辐射模型。其中, 一方面要考虑白帽分布的不同引起的反射分布不同, 另一方面需要考虑由于海面三维起伏引起的辐射调制作用, 导致的辐射差异。所以高空间分辨率下海水的反射率因如公式 (4) 所示:

$$\rho_{os}(x, y, \theta_s, \theta_v, \varphi, \lambda, \vec{r}) = Q(x, y) \cdot \rho_{ef}(\lambda) + \{1 - Q(x, y)\} \cdot \{\rho_{gl}(\theta_s, \theta_v, \varphi, \lambda, \vec{r}) + \{1 - \rho_{wc}(\lambda)\} \cdot \rho_{sw}(\theta_s, \theta_v, \varphi, \lambda, \vec{r})\} \quad (4)$$

式中: \vec{r} 为海面 (x, y) 处面片的法向向量; $Q(x, y)$ 是一个返回值为布尔类型的变量, 即等于 0 或 1, 用来判断海面上 (x, y) 坐标面片是否为白帽覆盖。当该面片为白帽覆盖时, $Q(x, y)=1$; 当该点非白帽覆盖时, $Q(x, y)=0$ 。而取值 0 或 1 则使用白帽覆盖的相对面积 W 来生成一个伪随机数概率确定。 W 可以通过风速计算得出 [14], $W = 2.951 \cdot 10^{-6} \cdot w_s^{3.52}$, w_s 为风速, 单位 m/s。

海水和水面白帽的反射率由于难以利用光谱测量手段实地获取, 因此, 反射率光谱数据使用 6S (Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum) 中 OCEABRDF 模型计算获得, 见表 2。该模型通过输入风速风向、海水含盐量、叶绿素浓度及太阳和观测角度, 可以得到白帽、耀斑及水体的有效反射率光谱。利用 OCEABRDF 模型, 分别计算了不同观测角及方位角度下, 组成海面辐射的白帽、水体及耀斑的反射率值。具体计算方法参考文献 [15]。其中计算所需要的风速及风向参数可以从 Weather

表 2 6S 输入参数表

Tab.2 Input parameter table of 6S

Parameter	Value
Wind speed/m·s ⁻¹	8
Wind direction	N
Salt content/ppt	34.6
Chlorophyll concentration/mg·m ⁻³	3.0
Sun zenith/(°)	56.6
Sun azimuth/(°)	160.4

Underground (www.wunderground.com) 网站获取, 叶绿素浓度值可从同时过境的 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 的二级数据中获取, 海水的含盐量可以从中国 Argo (Array for real-time geostrophic oceanography) 实时海洋观测网获取 (www.argo.org.cn)。

通过计算获取了无白帽覆盖该部分海面水体的方向反射信息, 如图 3 所示。即公式 (4) 中 $Q(x,y)=0$ 时, 海面 (x,y) 处在太阳天顶角为 56.6° , 太阳方位角为 160.4° 时的水体方向反射信息 $\rho_{os}(x,y,\theta_s,\theta_v,\varphi,\lambda,\vec{r})$ 。

白帽的产生是因为风破浪所产生的水体空化现象。在低分辨率遥感探测时, 根据 Koepke^[13] 的描述, 白帽的光学影响 $\rho_{wc}(\lambda)$ 是由白帽的相对面积 W 与其对应的反射率的乘积给出的。

$$\rho_{wc}(\lambda) = W \cdot \rho_{ef}(\lambda) \quad (5)$$

在高分辨率下, 这里乘以白帽的面积占比给出综合反射率的情况已经不再适用, 利用 6S 计算出不同

天顶角及方位角观测时白帽的反射率, 然后根据公式 (5) 计算出白帽的本征反射率 $\rho_{ef}(\lambda)$ 。将风速 8 m/s 代入公式 (5), 得:

$$\rho_{ef}(\lambda) = \frac{\rho_{wc}(\lambda)}{2.951 \cdot 10^{-6} \cdot 8^{3.52}} \quad (6)$$

计算结果如图 4 所示, 即 $Q(x,y)=1$ 时, 海面 (x,y) 处的水体反射率信息 $\rho_{os}(x,y,\theta_s,\theta_v,\varphi,\lambda,\vec{r}) = \rho_{ef}(\lambda)$ 。图中表示在不同观测天顶角及观测方位角下的白帽反射率数据。可以看出, 不同观测方位角的反射率光谱基本重叠, 不同天顶角的观测结果也基本一致。由此得出结论: 在可见光范围内, 白帽在不同天顶角与不同方位角上的反射率基本相同, 可近似看成朗伯体。这与公式 (5) 中, 白帽的反射率 $\rho_{ef}(\lambda)$ 只与波长 λ 相关的特性描述相符。

根据海面三维几何面片网格, 以及各面片材质类型 (海水或白帽) 和相应的方向反射特性, 构建了最终的海面三维辐射模型, 如图 5 所示。

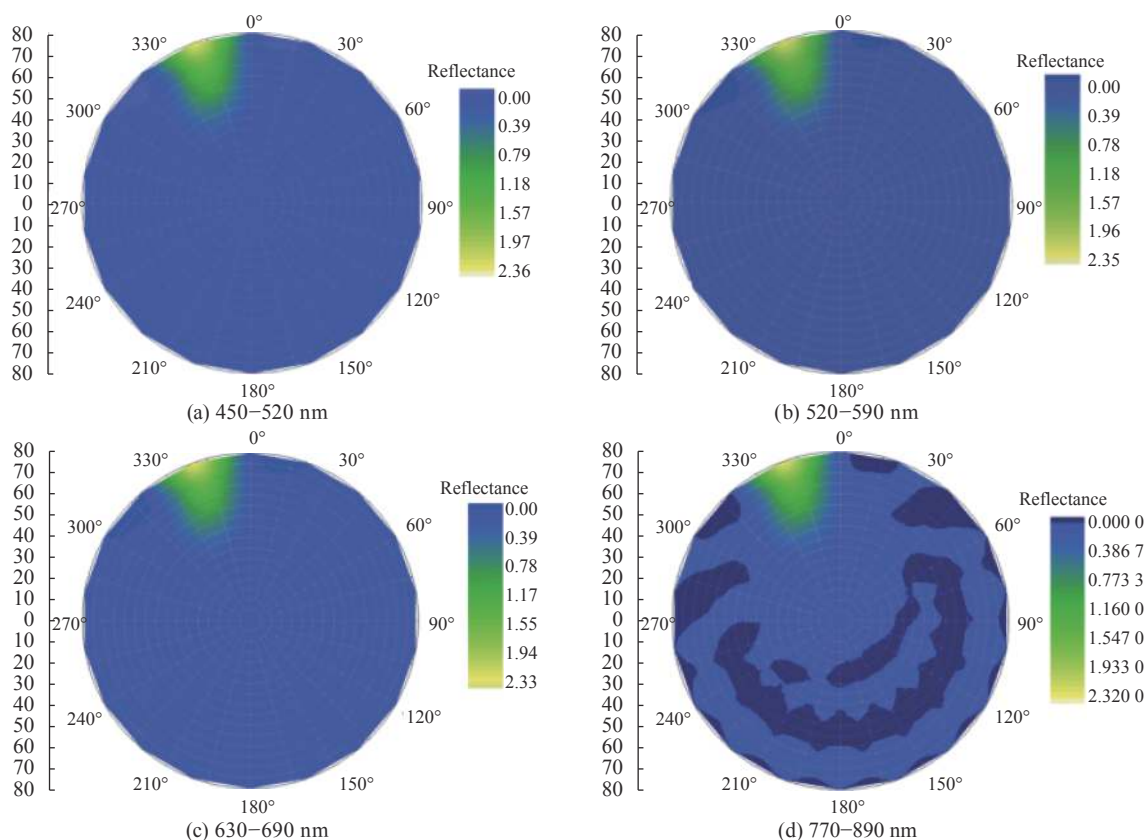


图 3 6S 计算的海水不同波段的方向反射率

Fig.3 BRDF of seawater at different wavebands calculated by 6S

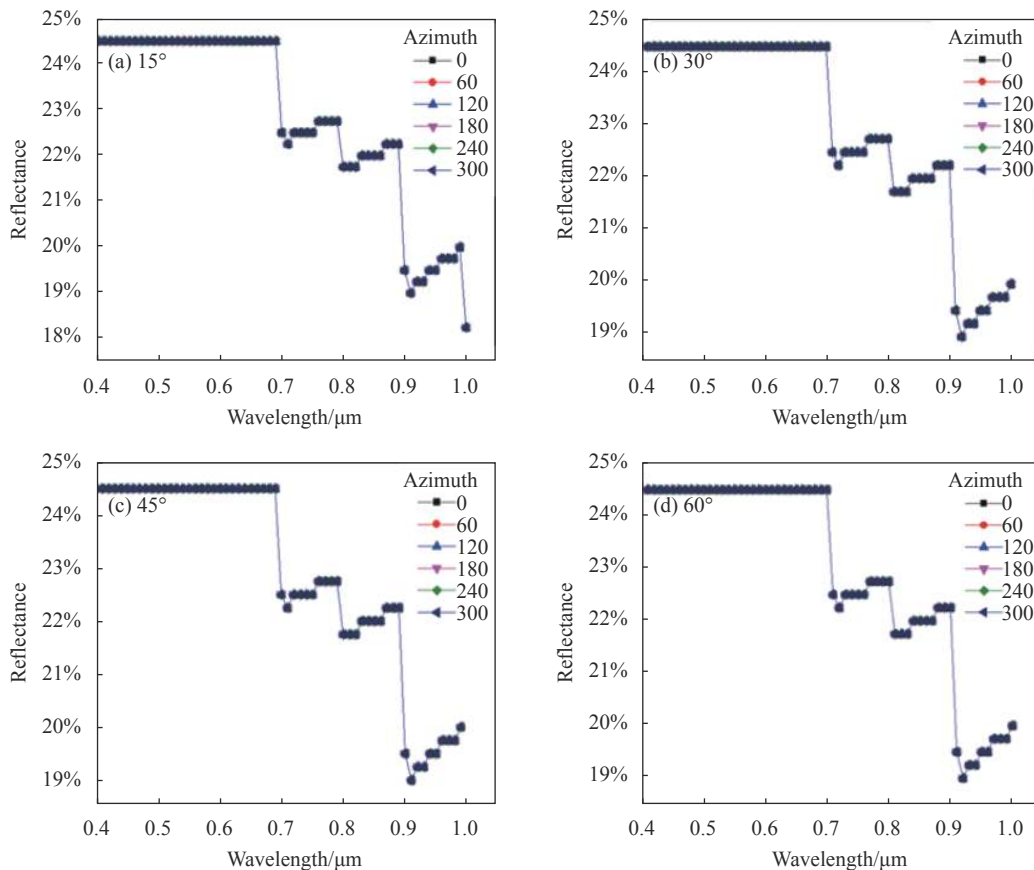


图 4 白帽在不同天顶角及方位角下的反射率

Fig.4 Reflectivity of the whitecaps at different zenith and azimuths angles

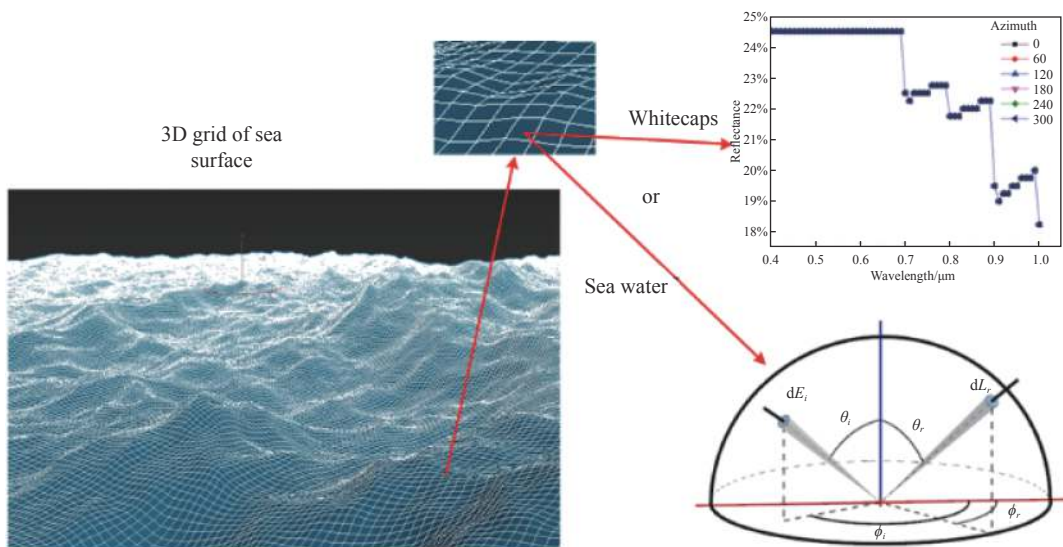


图 5 面片类型判断

Fig.5 Patch type judgment

2 高分辨率海面成像模拟

2.1 模拟流程

高分辨率海面成像仿真, 首先是根据第 1 节所述

的海面三维辐射模型, 根据光照和观测条件计算海面出射辐射分布 (或零视距辐射分布), 再利用蒙特卡洛方法模拟大气邻近效应, 再扣除大气的衰减, 模拟混

合像元, 得到卫星入瞳处的辐亮度分布, 最后模拟传感器的光谱及空间响应, 得到仿真结果, 即传感器最

终输出图像^[16-17]。整体流程如图 6 所示。

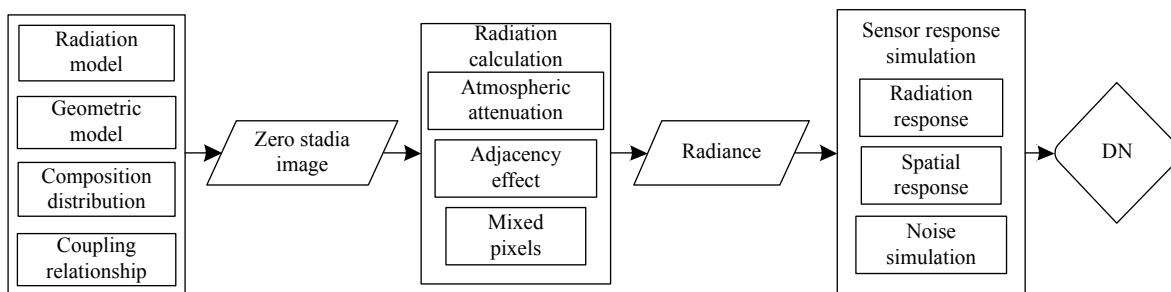


图 6 高分辨率卫星海洋背景成像仿真流程图

Fig.6 High-resolution satellite ocean background imaging simulation flowchart

2.2 大气影响作用模拟

光学卫星传感器单个像元所能接收到的辐射能量可以表示为三部分辐射的总和, 包括: (1) 经过海表反射且未发生散射部分, L_{su} ; (2) 经海表反射后在大气中再次散射进入视场的部分, L_{sd} ; (3) 未到达海表, 经大气散射直接进入传感器部分, L_{sp} 。即传感器入瞳处接收到的所有辐射亮度可表示为:

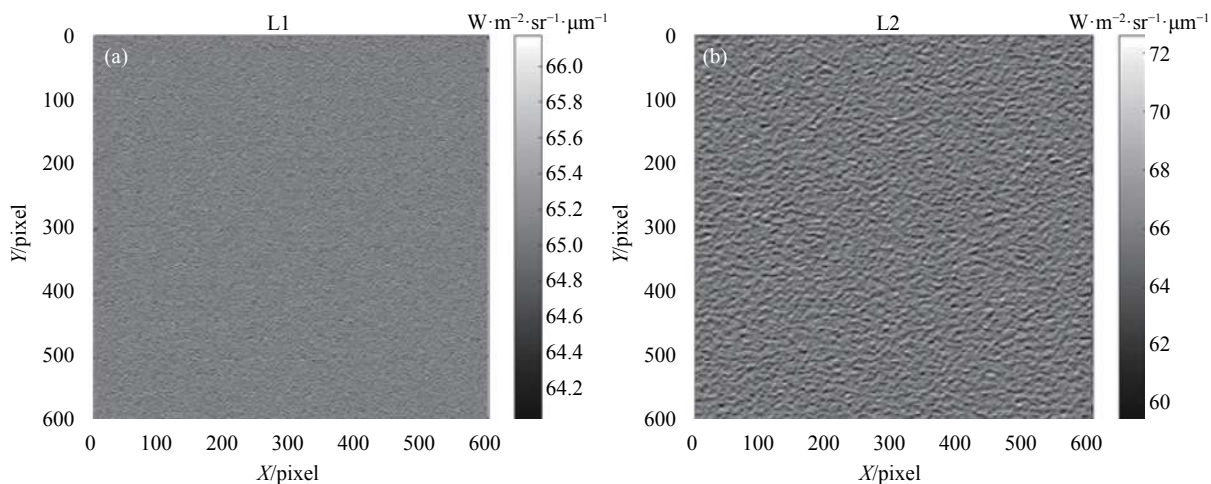
$$L_0(x,y) = L_{su} + L_{sd} + L_{sp} = \rho(x,y,\lambda) \frac{\tau_v(\lambda)\tau_s(\lambda)E_\lambda^0}{\pi} \cos[\theta(x,y)] + T(x,y)\rho(x,y,\lambda) \frac{\tau_v(\lambda)E_\lambda^d}{\pi} + L_{sp} = \rho(x,y,\lambda) \frac{\tau_v(\lambda)}{\pi} \times \{ \tau_s(\lambda)E_\lambda^0 \cos[\theta(x,y)] + T(x,y)E_\lambda^d \} + L_{sp} \quad (7)$$

式中: $\rho(x,y,\lambda)$ 表示地面反射率; λ 表示波长; τ_v 表示大气上行透过率; τ_s 表示大气下行透过率; E^0 表示太阳

到达大气层顶的辐照度; θ 表示太阳天顶角; $T(x,y)$ 表周边像元对中心像元的辐射贡献比重, 可用第 1 章中的三维海面辐射模型及蒙特卡罗模拟的周边像元邻近效应进行描述^[18-19]; E^d 表示大气向下散射的辐照度。该部分各大气参数的数值, 在确定观测条件后, 都可根据成熟的辐射传输模型 MODTRAN (MODerate resolution atmospheric TRANsmission) 计算得到。

利用逆向蒙特卡罗光线跟踪方法^[20-21], 通过随机地向从传感器向观测场景发射成千上万条光线, 跟踪它们与大气和场景的相互作用, 并返回光线与场景碰撞点处的出射辐射亮度场, 叠加上大气的衰减和程辐射作用后返回该点在入瞳处的辐射亮度。

假定卫星垂直观测, 大气条件良好的情况下, 模拟计算分辨率为 0.5 m, 图像大小为 600×600 的海面图像, 不同海浪等级下 450~520 nm 波段海面辐亮度在卫星入瞳处分布如图 7 所示。



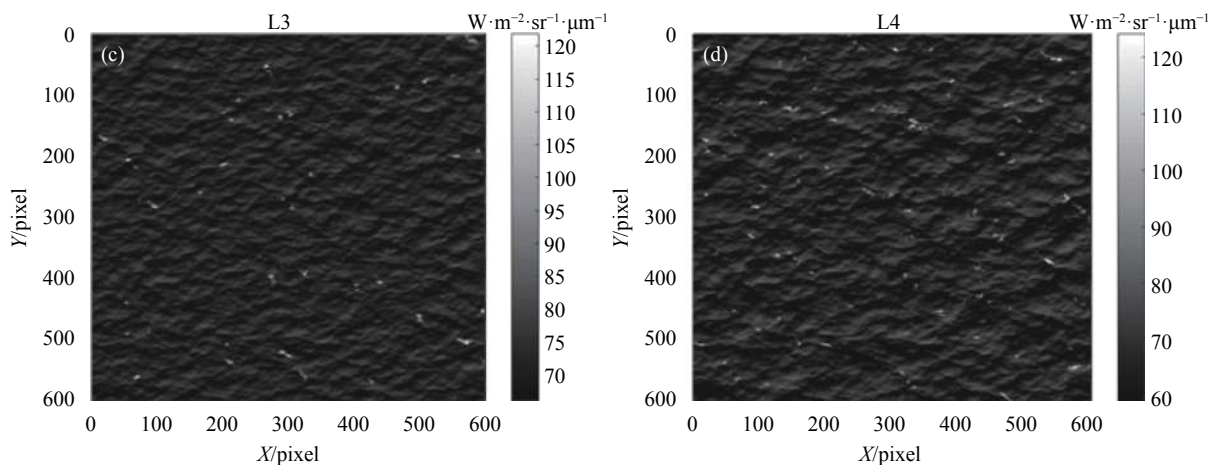


图 7 不同海浪级别下卫星入瞳处辐射场。L1: 1 级海浪; L2: 2 级海浪; L3: 3 级海浪; L4: 4 级海浪

Fig.7 Radiation field at the entrance pupil of the satellite under different wave levels. L1: Level 1 waves; L2: Level 2 waves; L3: Level 3 waves; L4: Level 4 waves

2.3 传感器效应模拟

(1) 传感器光谱响应模拟

从传感器孔径前段探测到的大气层顶辐亮度信号转化为探测器输出的光电信号 DN 值这一过程, 可以表示为:

$$DN = K \cdot \int R(\lambda)\tau_0(\lambda)L_0(\lambda) d\lambda + DN_{dark} \quad (8)$$

式中: $R(\lambda)$ 为传感器的光谱响应; K 为辐射定标系数; $L_0(\lambda)$ 为大气层顶的辐亮度信息; DN_{dark} 为传感器暗像元的光电响应值; $\tau_0(\lambda)$ 为传感器光学系统的透过率, 为减少测量带来的误差, 这部分会在传感器辐射定标时直接黑盒处理, 体现在定标的信号增益系数中。根据中国资源卫星中心官网提供的数据, 仿真的目标载荷 ZY3-02 星的全色多光谱相机 (PMS) 载荷各通道光谱响应曲线如图 8 所示。

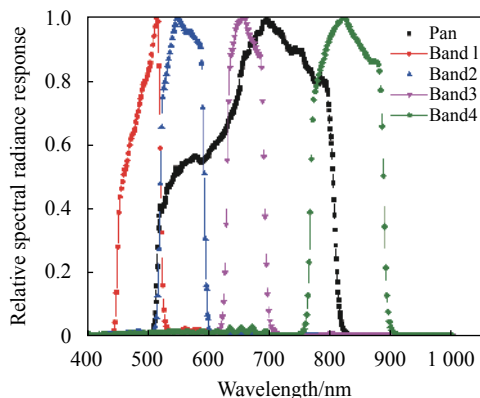


图 8 ZY3-02 星 PMS 载荷光谱响应曲线图

Fig.8 ZY3-02 star PMS load spectral response function

(2) 传感器空间响应模拟

在空间线性不变系统的假设下, 可以采用空间频率域的 MTF 来描述传感器成像的空间响应, 且总体响应的调制传递函数是各个环节 MTF 的乘积。

$$MTF_{SYS} = \prod_{i=1}^n MTF_i \quad (9)$$

把传感器的响应看作是一个数学变换, 经传感器光谱响应的图像表示为 $S\{DN(x,y)\}$, (x,y) 为参考平面的空间几何坐标, 则传感器响应后的图像表示为:

$$DN'(x,y) = DN(x,y) * FT\{MTF_{SYS}\} \quad (10)$$

式中: FT 表示傅里叶变换; $*$ 表示卷积。因载荷的 MTF 多与传感器性能相关, 其参数一般不对外公开。在这里利用目标卫星图像的明暗像元分界处, 在对图像进行大气校正以后, 采用刃边法计算相机的 MTF^[22]。取卫星图像中的沿轨跟垂轨两个方向分别计算出相机 Nyquist 频率处的 MTF 值为 0.073 和 0.186, 取其均值约为 0.13, 作为相机的 MTF。计算的点扩散函数及 MTF 曲线如图 9 所示。

(3) 噪声模拟

在上述信号的传输和转化过程中始终伴随着各种随机噪声的干扰, 假设所有噪声都从传感器的输出端引入。对于 CCD 成像器件, 占主导地位的随机噪声主要有背景光子散射噪声、暗电流散粒噪声、读出噪声和量化噪声。附加在输出信号上的全部随机噪声的总水平由他们各自统计分布的标准差决定。

$$\sigma_N = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2} \quad (11)$$

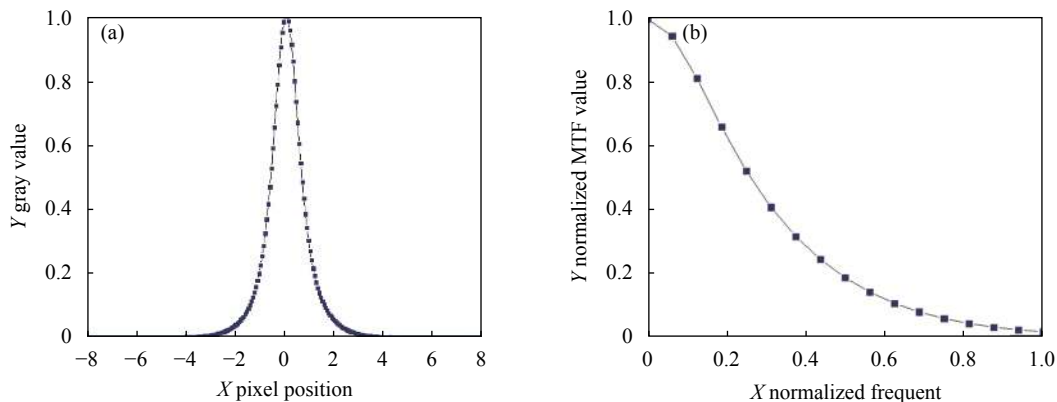


图 9 计算出的相机点扩散函数及 MTF 曲线。(a) 点扩散函数; (b) MTF

Fig.9 Calculated camera point spread function and MTF curve. (a) Point spread function; (b) MTF

文中采用的是白噪声模型,由均值为 0,以传感器空间响应模拟后的图像标准差 σ_N 为标准差的 Gauss 随机数发生器产生,并表示成数字图像。

$$DN'' = DN' + \sigma_N \quad (12)$$

3 实验对比验证

为了验证仿真结果的真实性,根据获取的 ZY3-02 星全色相机 2019 年 2 月 7 号拍摄的大连港数据,仿真模拟了在当时的大气及观测条件下的 ZY3-02 星多光谱相机卫星影像。仿真参数如表 3 所示。

根据卫星成像时的风力等级选择对应的海浪模型进行仿真计算,得到 4 000×4 000 pixel 大小的仿真图像,为了更好呈现细节,截取 200×200 pixel 大小的

海面图像及其 DN 值分布如图 10、图 11 所示。仿真与卫星实测结果对比如表 4 所示。

通过仿真结果与卫星实测结果对比图,由图 10 可以看出,仿真的结果中,白帽的影响效果已经出现,海面的起伏状态也得到显示。但因卫星成像时刻,鉴于海上情况的复杂性与随机性,仿真的结果与卫星的实测结果在目视效果上存在差异。主要原因可能是构建的海面三维模型,是通过数学的方法模拟得到,而自然界的海浪受多种因素影响,单纯的数学模型无法完整的表征出其几何特征,且成像时刻海面的风场等影响模型构建的因素不一定均匀且稳定。

从图 11 仿真与实测结果辐射分布对比图以及表 4 的定量对比可以看出,仿真的结果与实测结果的

表 3 仿真条件

Tab.3 Simulation conditions

Simulation band	Band1(450-520 nm)\Band2(520-590 nm)\Band3(630-690 nm)
ZY3-02 imaging time	Beijing time 11:00:10-11:00:18
Sun zenith angle/(°)	56.63
Sun azimuth/(°)	160.4
Observation azimuth/(°)	237.32
Observation zenith angle/(°)	0.1
Resolution/m	5.8
MODISatellite imaging time	Beijing time 11:05
AOD@550 nm	0.196
Wind speed/m·s ⁻¹	8
Wind direction	N
Chlorophyll concentration/mg·m ⁻³	3
Salt content/ppt	34.6

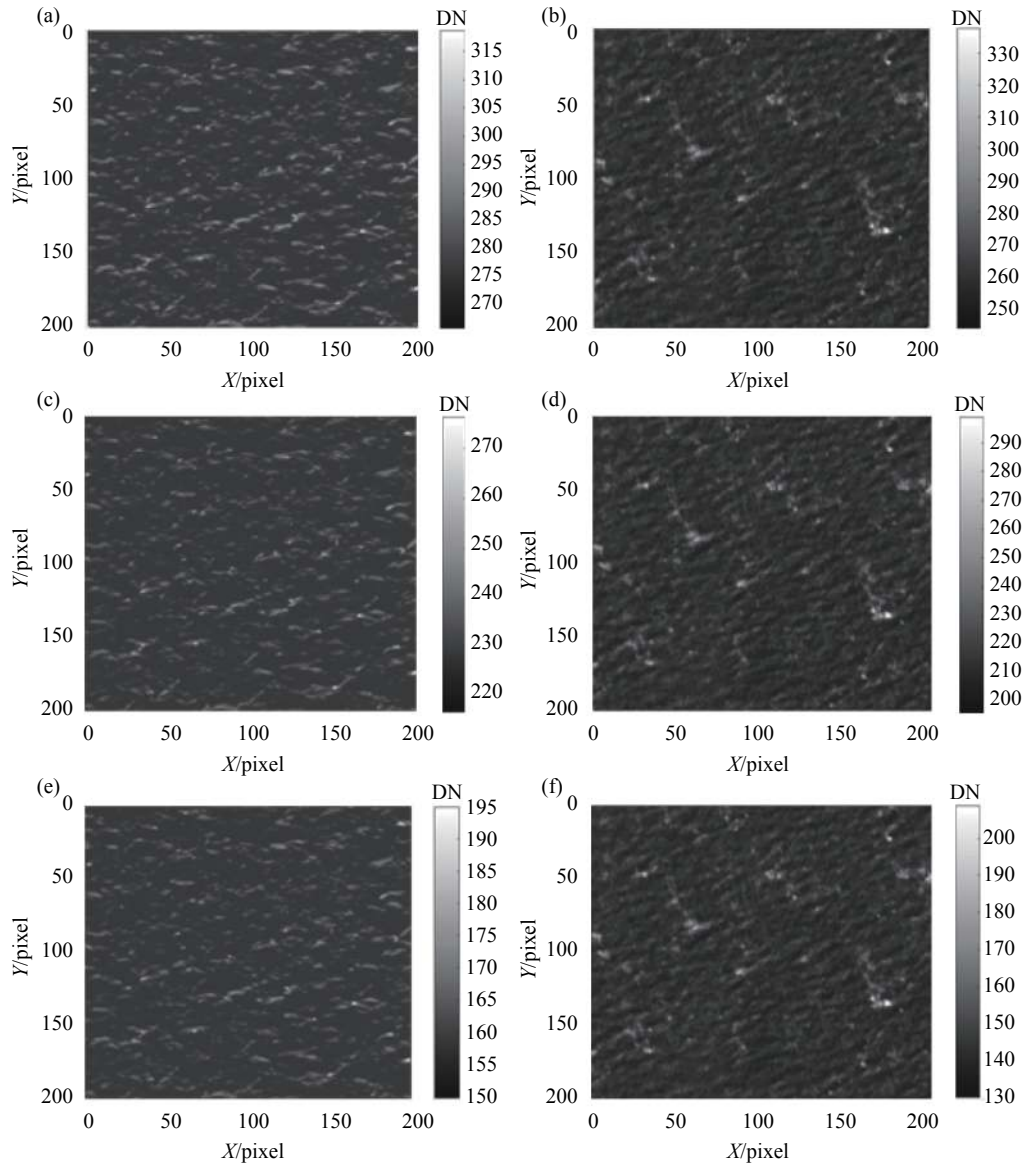
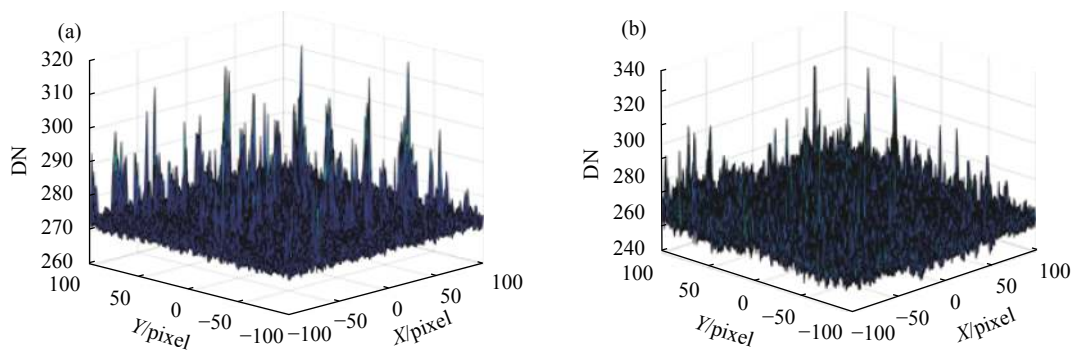


图 10 仿真结果与卫星数据对比。(a) 仿真 Band1 海面;(b) ZY3-02 实测 Band1 海面;(c) 仿真 Band2 海面;(d) ZY3-02 实测 Band2 海面;(e) 仿真 Band3 海面;(f) ZY3-02 实测 Band3 海面

Fig.10 Comparison of simulation results with satellite data. (a) Simulating the sea surface of Band1; (b) ZY3-02 measured sea surface of Band1; (c) Simulating the sea surface of Band2; (d) ZY3-02 measured sea surface of Band2; (e) Simulating the sea surface of Band3; (f) ZY3-02 measuring the sea surface of Band3



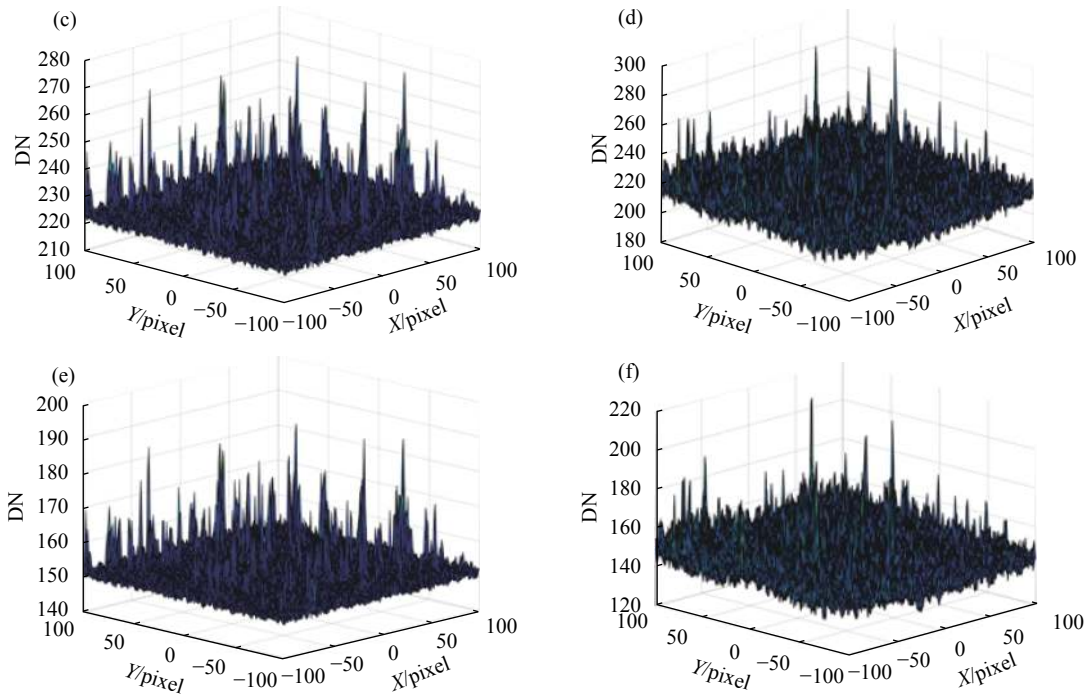


图 11 仿真与实测结果辐射分布对比。(a) 仿真 Band1 海面; (b) ZY3-02 实测 Band1 海面; (c) 仿真 Band2 海面; (d) ZY3-02 实测 Band2 海面; (e) 仿真 Band3 海面; (f) ZY3-02 实测 Band3 海面

Fig.11 Comparison of radiation distribution between simulated and measured results. (a) Simulating the sea surface of Band1; (b) ZY3-02 measured sea surface of Band1; (c) Simulating the sea surface of Band2; (d) ZY3-02 measured sea surface of Band2; (e) Simulating the sea surface of Band3; (f) ZY3-02 measuring the sea surface of Band3

表 4 仿真结果与实测结果对比

Tab.4 Comparison of simulation results and measured results

Image type	Max			Min			Mean			Standard deviation		
	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3
ZY3-02(DN)	338	299	209	243	196	130	260	216.5	146.3	6.57	6.91	5.78
Simulation(DN)	318.6	276.3	182.5	266.1	216	137.9	273.3	223.5	141.6	5.8	6.1	5.4
Mean relative error	8.6%			7.8%			3.7%			9.9%		

相似度较高,其均值、极值相近,各波段的辐射强度相似,高值区域的离散分布情况相仿。这其中的误差则主要来源于辐射传输模型的计算及卫星辐射定标等系统误差。

4 结论

文中综合考虑了高分辨率成像下海面呈现的波浪起伏、白帽、方向反射等细节因素,提出一种高分辨率海洋背景卫星成像仿真方法:将海面三维几何结构、组分分布和辐射特性结合,通过建立海面三维辐射场、大气和传感器效应模拟,得到卫星遥感仿真图

像。与卫星实测图像比较,各波段仿真结果最大值误差 8.6%,最小值误差 7.8%,均值误差 3.7%,标准差误差 9.9%。在各波段平均灰度值、灰度分布、纹理细节等方面都具有较好的一致性。该方法将为进一步的高分辨率舰船目标仿真,以及目标与海面背景的耦合作用模拟提供必要基础。

该仿真方法在原理、模型和流程上基本正确,但一些输入参数因缺乏实际测量数据可能造成仿真结果存在一定误差。比如海水和白帽的方向反射模型,应当进一步通过实测反射率数据进行修正;海水的含盐量数据,Argo 公布的是目标区域一个月份的平均

值,并非卫星成像时刻的实测值;大气的光学厚度数据是 MODIS 准同步过顶数据的反演结果,并不是卫星过顶时的实测数据。这些在后续研究工作中,可以通过实测数据对模型做一定的修正,对误差源做进一步控制,得到更真实的仿真结果。

参考文献:

- [1] Yin N, Huang H, Zhang Z X. Research on ship detection technology based on optical remote sensing image [J]. *Computer Science*, 2019, 46(3): 82-87. (in Chinese)
- [2] Yu H Y. An optical remote sensing ship recognition method based on probability generative model [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2020, 40(7): 46-50. (in Chinese)
- [3] Yingying Yin, Na Liu, Chaoyang Li, et al. Coarse-to-fine ship detection using visual saliency fusion and feature encoding for optical satellite images[C]//IEEE International Conference on Audio, Language and Image Processing, 2016: 705-710.
- [4] Song M Z, Qu H S, Jin G. Weak ship target detection of noisy optical remote sensing image on sea surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 101104. (in Chinese)
- [5] Wang S L, Kang F J, Xu J H. Research on general ocean simulation technology [J]. *Journal of System Simulation*, 2017, 29(2): 381-386. (in Chinese)
- [6] Zheng M Q, Ma C X, Wang Z B. Improvement of wave simulation based on ocean wave specturm [J]. *Journal of System Simulation*, 2014, 26(2): 369-375. (in Chinese)
- [7] Strube de L D, Braun H, Raupp M S. A model for real time ocean breaking waves animation[C]//2010 Brazilian Symposium on Games and Digital Entertainment, 2010: 19-24.
- [8] Tang J W, Tian G L, Chen Q L. Bidirectionality of water-leaving radiance: simulation results and its correction [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2000, 22(2): 48-57. (in Chinese)
- [9] Zhang J, He X X, Zhao F S. Simulation of the properties of information relating to ocean colour remote sensing by radiative transfer in the atmosphere-ocean system [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2003, 20(5): 623-628. (in Chinese)
- [10] Zhang C G, Xiong B L, Kuang G Y. A survey of ship detection in optical satellite remote sensing images [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2020, 35(5): 637-647. (in Chinese)
- [11] Y J Kaufman, C Sendra. Algorithm for atmospheric corrections.Int.[J]. *Remote Sens*, 1988.9: 1357-1381.
- [12] Wang S L. Research of large-scale ocean waves 3D visualization[D]. Xian: Northwestern Polytechnical University, 2017. (in Chinese)
- [13] Koepke P. Effective reflectance of oceanic whitecaps [J]. *Applied Optics*, 1984, 23(11): 1816-1824.
- [14] Monahan E C, O 'Muircheartaigh I G. Optimal power-law description of oceanic whitecap coverage dependence on wind speed. [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1980, 10(12): 2094-2099.
- [15] E F Vermote, D Tanré, J L Deuzé, et al. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum[C]//IEEE Trans,1997, 35: 675-686.
- [16] Ma X S, Yang Z, Li L G. Scene simulation based on optical field theory [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(8): 0818003. (in Chinese)
- [17] Chen C. Key techniques studying on high-resolution remote sensing imaging simulation[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)
- [18] Wang H, Xu J, Zhang Y X. Simulate research of trajectory with monte-carlo method based on matlab [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2005, 25(1): 181-183. (in Chinese)
- [19] Li H S, Liu W. Analysis of the adjacency effect in satellite remote sensing by using backward monte carlo method [J]. *J Huazhong Univ of Sci & Tech (Nature Science Edition)*, 2004, 32(11): 1-3. (in Chinese)
- [20] Pharr M, Jakob W, Humphreys G. Physically Based Rendering: From Theory to Implementation[M]. Burlington: Morgan Kaufmann, 2016.
- [21] Ma X S, Guo X Y, Meng X, et al. Simulation and analysis of the adjacency effect in each-imaging process of the optical remote sensing [J]. *Journal of Infrared and Millim Waves*, 2015, 34(2): 250-256. (in Chinese)
- [22] Wang X H, Qiao Y L, Yi W N. In-flight measurement of satellite optical camera MTF [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(3): 322. (in Chinese)