

基于海浪谱修正方法的海面建模

宿德志¹, 刘亮^{2*}, 吴世永¹, 刘陵顺¹¹海军航空大学航空基础学院, 山东 烟台 264001;²海军航空大学岸防兵学院, 山东 烟台 264001

摘要 海面场景偏振特性研究对于红外偏振目标检测具有重要意义,海面建模是进行海面偏振仿真研究的关键环节。分析了海浪谱模型和空间采样点数对海面建模的影响,建立了将海浪谱的高频分量以指数形式叠加到低频分量的修正方法。将 RadTherm 软件与偏振度计算模型相结合,对比研究了所提方法与传统方法模拟生成海面的长波红外偏振特性。仿真结果表明,所提方法可以在低空间采样率下有效提高模拟生成海面的高度分布、微面元斜率分布与海面实测数据的吻合度。

关键词 物理光学; 偏振特性; 红外偏振; 海浪谱; 海面建模

中图分类号 TN21

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0226001

Sea Surface Modeling Based on Ocean Wave Spectrum Correction Method

Su Dezhi¹, Liu Liang^{2*}, Wu Shiyong¹, Liu Lingshun¹¹College of Basic Sciences for Aviation, Naval Aviation University, Yantai, Shandong 264001, China;²Coast Guard College, Naval Aviation University, Yantai, Shandong 264001, China

Abstract The study of polarization characteristics of sea surface scene is of great significance to infrared polarization target detection, and sea surface modeling is the key step of sea surface polarization simulation. The influence of wave spectrum model and spatial sampling points on sea surface modeling is analyzed, and a correction method is established, which superimposes the high frequency component of wave spectrum to the low frequency component in the exponential form. Combining RadTherm software with the polarization degree calculation model, the long-wave infrared polarization characteristics of simulated sea surface generated by the proposed method and the traditional method are compared. The simulation results show that the proposed method can effectively improve the consistency among the height distribution of simulated sea surface, the microfacet slope distribution of simulated sea surface and the measured sea surface data at a low spatial sampling rate.

Key words physical optics; polarization properties; infrared polarization; wave spectrum; sea surface modeling

1 引言

海面建模是海面红外偏振特性研究的基础性工作,模拟生成海面与实际海面的微面元斜率分布的一致性,决定了海面偏振特性仿真研究的准确性。海面微面元的斜率分布研究工作开展较早。Cox 等^[1]根据海面闪光出现的概率实验给出了海面斜率分布公式——Cox-Munk 公式,并被广泛应用于海

面辐射和偏振研究中。Ebuchi 等^[2]使用亚热带海洋观测中收集的约 3000 万个数据点得到了近似估计,近似估计的坡度分布比 Cox-Munk 公式窄,对风向的依赖性较弱。Fukushima 等^[3]利用 ADEOS-II (advanced earth observing satellite 2) 卫星拍摄的全球图像的辐射数据和海风数据进行了与文献[2]中类似的研究,发现 Cox-Munk 公式更适合于中等风速的海面,而文献[2]中的模型更适合于低风速的

收稿日期: 2021-06-28; 修回日期: 2021-07-23; 录用日期: 2021-08-09

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(11704411)

通信作者: *liul513@126.com

海面。上述研究虽然对 Cox-Munk 公式进行了微小的修改,但没有改变 Cox-Munk 公式的主要特征,即斜率的分布与均方斜率和风速呈线性关系^[4]。

近年来基于海浪谱和快速傅里叶变换(FFT)的海面建模技术得到了快速发展,很多人采用这种方法进行海面模拟研究工作,如张延冬等^[5]利用 Jonswap(Joint North Sea Wave Project)谱模拟生成海面,并研究了散射及红外成像规律;杨振军等^[6]采用 PM(Pierson-Moscowtz)谱进行了海面建模研究工作;贾俊涛等^[7]采用 Phillips 谱进行海面高度场模拟工作;张弛等^[8-9]采用 Elfouhaily 海浪谱和 FFT 模拟了海面,并进行了红外偏振的相关研究。然而, Mobley 等^[10]指出傅里叶变换的空间采样频率是有限的,采用这种方法模拟生成的海面的微面元斜率分布与实测数据不符,特别是当空间采样点较少时差别更大。此外,海浪谱的选择对海面建模的准确性也有很大影响^[11-12]。目前,海面偏振仿真中常用的海浪谱有 PM 谱、Jonswap 谱和 Elfouhaily 谱^[13-14]等。PM 谱是针对稳态海面建立的充分发展的海浪谱, Jonswap 谱是在 PM 谱的基础上对重力波进行了修正,而 Elfouhaily 谱则是综合考虑了海浪谱中的低频和高频得到的全波数谱。这三种海浪谱都是依据实测数据得到的半经验海浪谱,对于电影、动画等精度要求不高的应用场景,其均能满足要求。然而,对于海面偏振特性研究则需要更高的模拟精度,由于只有 Elfouhaily 谱的海面斜率方差和高度方差的理论值与 Cox-Munk 公式一致,故选择 Elfouhaily 谱来进行海面建模。

本文采用将海浪谱高频分量能量以指数形式叠加到低频分量上的方法对传统的基于 Elfouhaily 海浪谱和 FFT 的海面建模技术进行了修正,可以在不增加运算复杂度的情况下,提升模拟生成海面的微

面元斜率分布与基于实测数据的 Cox-Munk 公式的吻合度。

2 海面建模修正模型

为解决传统方法模拟海面的微面元斜率分布与实测数据不符的问题,需要对海浪谱进行修正。海面高度方差 z^2 和微面元斜率方差 σ^2 与海浪谱的关系为

$$\begin{cases} z^2 = \int_0^\infty S(k) dk \\ \sigma^2 = \int_0^\infty k^2 S(k) dk \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $S(k)$ 为海浪谱; k 为波数。当采用海浪谱和 FFT 进行海面建模时,若空间采样点数不足,则海浪谱的高频能量会丢失,这将引入误差,从而使得模拟生成海面高度方差和斜率方差与实测数据不符。因此,采用海浪谱的高频成分以指数形式叠加到低频部分的修正方法来提高海面建模的精度,记修正后的海浪谱为 $\hat{S}(k)$,其可以表示为

$$\hat{S}(k) = \begin{cases} S(k), & k \leq k_p \\ \left[1 + \delta_{Ny} \left(\frac{k - k_p}{k_{Ny} - k_p} \right)^r \right] S(k), & k > k_p \end{cases}, \quad (2)$$

式中: k_p 为峰值处的波数; k_{Ny} 为 FFT 中的最大采样波数; r 为修正参数; δ_{Ny} 为待定常数,可以由以下过程确定。由(1)式可得

$$\sigma^2 = \int_{k_f}^{k_h} k^2 S(k) dk = \int_{k_f}^{k_{Ny}} k^2 S(k) dk + \int_{k_{Ny}}^{k_h} k^2 S(k) dk, \quad (3)$$

式中: k_f 和 k_h 为海浪谱中包含了足够大能量的波数区间的最大值和最小值。为使得修正后的海浪谱在 $k_f \sim k_{Ny}$ 采样区间内具有与原始海浪谱在 $k_f \sim k_h$ 区间内相同的能量,令

$$\sigma^2 = \int_{k_f}^{k_{Ny}} k^2 \hat{S}(k) dk = \int_{k_f}^{k_p} k^2 S(k) dk + \int_{k_p}^{k_{Ny}} k^2 \left[1 + \delta_{Ny} \left(\frac{k - k_p}{k_{Ny} - k_p} \right)^r \right] S(k) dk = \int_{k_f}^{k_{Ny}} k^2 S(k) dk + \delta_{Ny} \int_{k_p}^{k_{Ny}} k^2 \left(\frac{k - k_p}{k_{Ny} - k_p} \right)^r S(k) dk. \quad (4)$$

结合(3)式和(4)式可得

$$\int_{k_f}^{k_{Ny}} k^2 S(k) dk + \int_{k_{Ny}}^{k_h} k^2 S(k) dk = \int_{k_f}^{k_{Ny}} k^2 S(k) dk + \delta_{Ny} \int_{k_p}^{k_{Ny}} k^2 \left(\frac{k - k_p}{k_{Ny} - k_p} \right)^r S(k) dk \Rightarrow \delta_{Ny} = \frac{\int_{k_{Ny}}^{k_h} k^2 S(k) dk}{\int_{k_p}^{k_{Ny}} k^2 \left(\frac{k - k_p}{k_{Ny} - k_p} \right)^r S(k) dk}. \quad (5)$$

因此,海面建模修正模型为

$$\hat{S}(k) = \begin{cases} S(k), & k \leq k_p \\ \left[1 + \frac{\int_{k_p}^{k_{Ny}} k^2 S(k) dk}{\int_{k_p}^{k_{Ny}} k^2 \left(\frac{k - k_p}{k_{Ny} - k_p}\right)^r S(k) dk} \left(\frac{k - k_p}{k_{Ny} - k_p}\right)^r \right] S(k), & k > k_p \end{cases} \quad (6)$$

3 仿真分析

3.1 海面建模仿真

相比 PM 谱和 Jonswap 谱,Elfouhaily 谱对高频和低频都进行了修正,三种海浪谱曲线如图 1 所示。此外,利用(1)式可以求出三种海浪谱在不同风速下的微面元斜率方差和海面高度标准差(ESTD)的理论值,如图 2 所示。可以看出,Elfouhaily 谱的理论值与 Cox-Munk 公式和 Apel 的海浪高度经验公式符合得很好。因此,为取得更高的海面建模精度,仿真中将 Elfouhaily 谱作为修正对象。图 2 中 Apel 数据取自文献[9],Cox-H和Cox-L分别表示Cox-Munk公

式中微面元斜率方差的最大值和最小值。

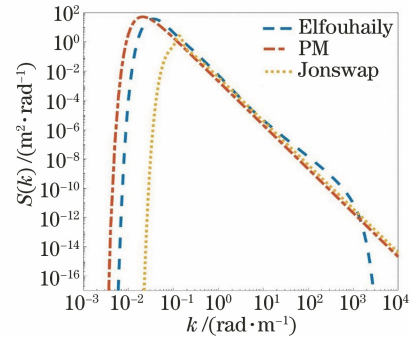


图 1 三种海浪谱曲线

Fig. 1 Three wave spectrum curves

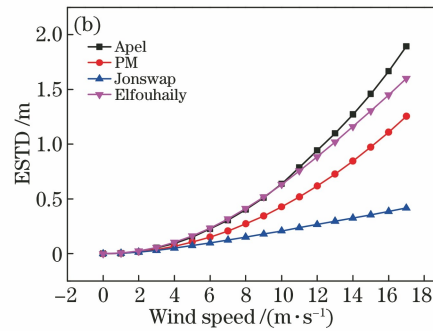
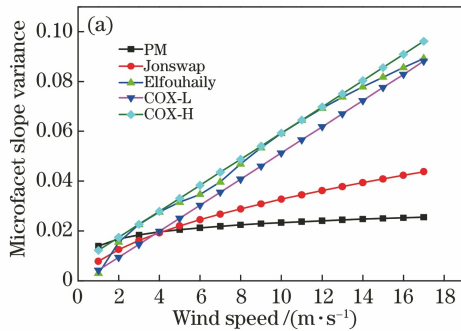


图 2 海浪谱的微面斜率方差和 ESTD 随风速的变化。(a)微面斜率方差;(b) ESTD

Fig. 2 Microfacet slope variance and ESTD of wave spectra varying with wind speed.

(a) Microfacet slope variance; (b) ESTD

目前,在海面偏振特性仿真研究中普遍利用基于海浪谱和 FFT 的传统方法来模拟海面。当空间采样点较少时,这种模拟方法会引入误差。在风速为 5,10,15 m/s 情况下,当采用(1)式计算得到的 Elfouhaily 谱的理论值、海面建模传统方法和修正方法(暂取参数 $r=1$)时,模拟海面的微面元斜率方差和高度方差随空间采样点数的变化情况,如图 3 和图 4 所示。

从图 3 中可以看出,当采样点数较少时,利用海面建模传统方法与 Elfouhaily 谱理论值得到的微面元斜率方差差别较大。例如,当模拟海面大小为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$,采样点数为 256×256 时,最小采样空间波数为 0.0245 rad/m ,最大采样空间波数为 3.1416 rad/m ,采样间隔为 0.0245 rad/m ,取风速

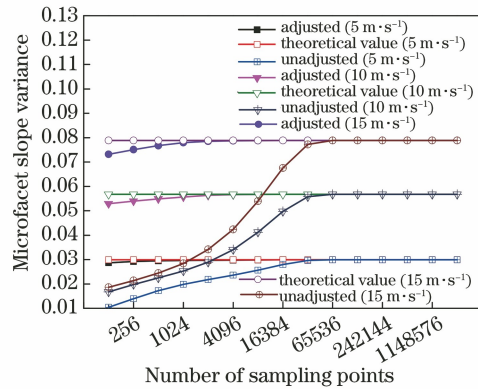


图 3 不同风速下微面元斜率方差随采样点数的变化

Fig. 3 Microfacet slope variance varying with number of sampling points under different wind speeds

为 10 m/s ,风区长度为 100 km 。此时,Elfouhaily

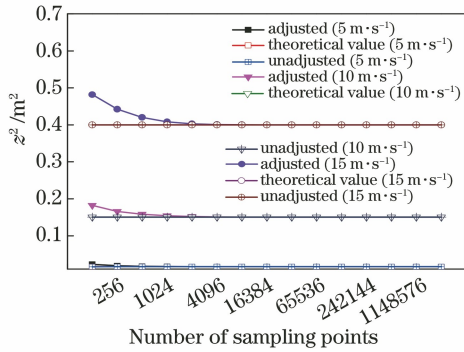


图 4 不同风速下海面高度方差随采样点数的变化

Fig. 4 Sea surface height variance varying with number of sampling points under different wind speeds

谱微面元斜率方差的理论值为 0.0568, 而海面建模传统方法的结果为 0.0198, 其仅为理论值的 34.86%, 修正方法的结果为 0.0540, 其为理论值的 95.1%。可以发现, 在采样点数较少时, 修正方法减小了模拟海面的微面元斜率方差与理论值的误差。微面元斜率方差主要由海浪谱高频能量决定, 当采样点数较少时, Elfouhaily 谱高频能量丢失严重, 此时模拟海面的微面元斜率方差远低于 Elfouhaily 谱理论值, 而修正方法通过将高频分量能量采用指数形式叠加到低频分量上的方法, 使得在较少采样点数时就有与理论值接近的结果。若不采用修正方法, 则需要在进行 FFT 时取更多采样点, 这会产生较大的计算量。例如, Kay 等^[15] 研究模拟了 3 mm~200 m 的全范围空间尺度, 这需要利用 FFT 计算 65536×65536 个网格点, 且进行 6 h 的计算才可模拟产生单个海面。从图 3 中可以发现, 当单方向采样点数达到 131072 时, 模拟海面的微面元斜率方差才与 Elfouhaily 谱理论值接近, 即需要处理 1.718×10^{10} ($2^{17} \times 2^{17}$) 个采样点, 才能模拟出与实测数据相符的海面。然而, 修正方法在采样点数为 512 时就具有和理论值接近的微面元斜率方差。

从图 4 中可以看出, 传统海面建模的海面高度方差与 Elfouhaily 谱理论值是一致的, 而修正方法在采样点数较少时的海面高度方差会略高于理论值。例如, 当风速为 10 m/s, 采样点数为 256×256 时, Elfouhaily 谱海面高度方差理论值为 0.1505, 海面建模传统方法的结果也是 0.1505, 而修正方法的结果为 0.1660, 其为理论值的 110.4%。然而, 随着采样点数的增加, 修正方法得到的结果与理论值间的误差会逐渐减小。例如, 当采样点数为 1024×1024 时, 修正方法的结果为 0.1543, 其为理论值的 102.6%。海面高度分布主要由海浪谱低频能量决

定, 而修正方法主要改变的是高频能量, 故修正方法并不会显著改变海面高度分布。为验证修正方法对模拟生成海面的高度分布的影响, 截取了 X 轴上 50 m 内的高度曲线, 如图 5 所示。可以看到, 修正方法对海面的高度分布影响较小。因此, 在选取合适的空间采样点数后, 修正方法引入的海面高度分布误差可以忽略。从图 5 中也可以观察到, 修正方法没有大幅度改变海面高度分布, 而是通过在斜率变化较大处增加很多抖动的方式, 使得微面元斜率方差与理论值更接近。

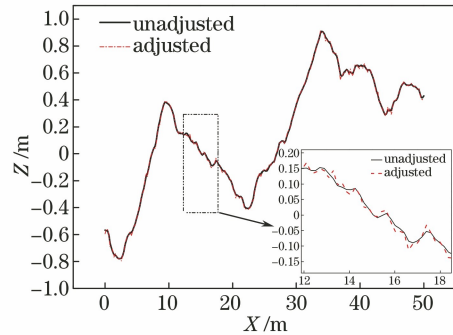


图 5 修正前后海面高度对比

Fig. 5 Comparison of sea surface height before and after correction

图 3~5 是以修正参数 $r=1$ 为例讨论了修正方法对海面高度和微面元斜率分布的影响, 下面将讨论不同修正参数对海面建模的影响。当风速为 10 m/s 时, 不同 r 值对模拟海面高度方差和微面元斜率方差的影响如图 6 和图 7 所示。

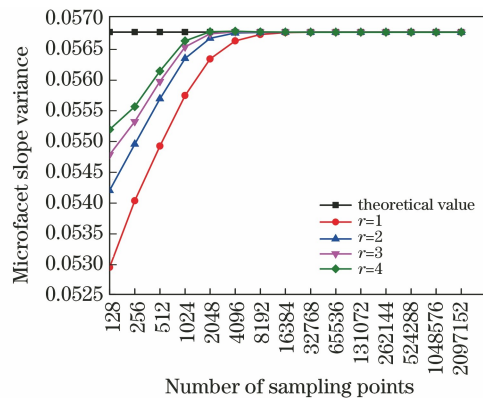


图 6 修正后微面元斜率方差随采样点数的变化

Fig. 6 Microfacet slope variance varying with number of sampling points after correction

从图 6 和图 7 中可以看出, 随着 r 的增大, 模拟海面的高度方差和微面元斜率方差能够更快速地逼近理论值。例如, 设定 $r=4$, 当单方向采样点数为 256 时, $\sigma^2=0.0555 \text{ rad}^2$, $z^2=0.1515 \text{ m}^2$, 二者分别为理论值的 97.9% 和 100.6%, 已基本达到了仿

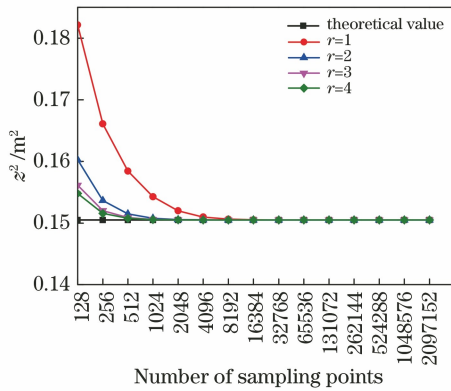


图 7 修正后海面高度方差随采样点数的变化

Fig. 7 Sea surface height variance varying with number of sampling points after correction

真研究的要求。根据(2)式可知,修正方法将海浪谱中 $k_{Ny} \sim k_h$ 高频区间内的能量以指数形式叠加到 $k_p \sim k_{Ny}$ 区间中, r 值越大, $k_p \sim k_{Ny}$ 区间内高频部分的改变就会越大,其对海浪谱低频部分的改变会越小,故修正方法能够使模拟生成海面的微面元斜率方差和海面高度方差更快速地逼近理论值。图 6 和图 7 分析了风速为 10 m/s 时,修正参数 r 对海面建模的影响。下面继续研究了不同风速下修正参数 r 的适用性。利用(6)式和 Elfouhaily 谱模拟生成海面,模拟海面大小为 512 m \times 512 m,采样点数为 512 \times 512,风区长度为 100 km,分别采用不同 r 值和风速条件模拟生成海面,并计算其微面元斜率方差和高度方差,如图 8 和图 9 所示。

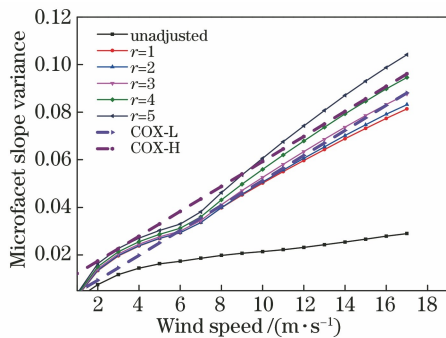


图 8 不同 r 下微面元斜率方差随风速的变化

Fig. 8 Microfacet slope variance varying with wind speed under different r

从图 8 和图 9 中可知, r 值对不同风速下海面高度方差影响不大,但对微面元斜率方差有较大影响。在风速小于 10 m/s 时,各 r 值情况下模拟海面的微面元斜率方差都能与 Cox-Munk 公式符合得较好,但当风速较大时, r 值过小或过大都会导致模拟海面的微面元斜率方差与 Cox-Munk 公式不符。从图 8 中可以看出,当 $r=4$ 时,微面元斜率方差与

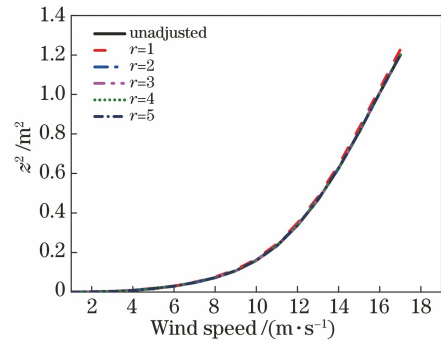


图 9 不同 r 下海面高度方差随风速的变化

Fig. 9 Sea surface height variance varying with wind speed
Cox-Munk 公式符合较好。

3.2 海面偏振特性仿真

在海面红外偏振研究中,通常采用几何光学近似,一般采用基于微面元理论的 Cook-Torrance 模型^[16],该模型将海面分成很多个微小面元,每个微面元处的反射近似为镜面反射,服从菲涅耳反射定律。由于海面形状对海面偏振特性具有很大影响,因此利用修正方法模拟得到的海面进行红外偏振特性仿真研究,最终得到的结果会更准确。利用 RadTherm 软件仿真研究海面建模修正方法对海面红外偏振特性的影响。

海面场景中进入探测器的能量分为海水热辐射、海面反射的太阳辐射、海面反射的环境辐射(包括大气辐射和天空散射光辐射)、海面到传感器之间的路程辐射,如图 10 所示。由于在长波红外波段中太阳的辐射能量较少,若避开耀光区域可暂不考虑太阳辐射的影响,同时路程辐射总体上不表现出偏振特性,对海面场景偏振效应的影响很小^[17],因此只考虑海水热辐射和海面反射的环境辐射的影响。

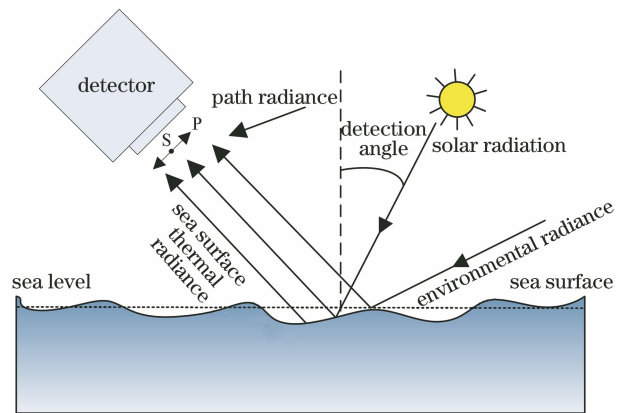


图 10 海面红外辐射模型

Fig. 10 Model of sea surface infrared radiation

仿真流程如图 11 所示。首先,应用两种海面建模方法得到海面形状,并将其划分为大量三角形面

元。然后,利用RadTherm软件导入天气条件,并对

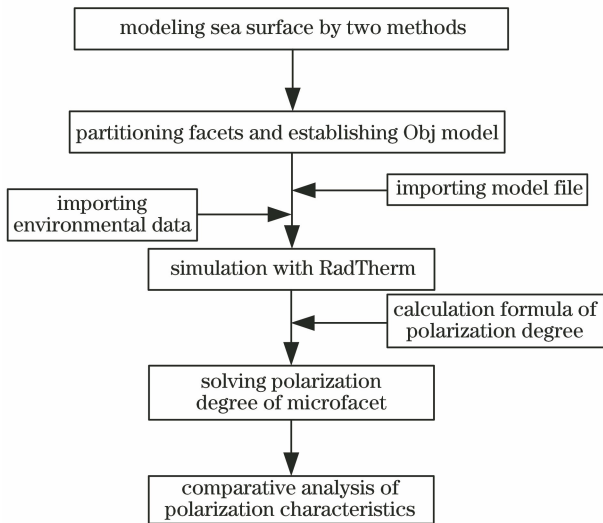


图 11 仿真流程图

Fig. 11 Simulation flow chart

每个面元进行热分析,可以得到不同气象条件下每个面元的温度分布和天空大气辐亮度。接着,利用菲涅耳反射定律、黑体辐射公式和偏振度计算公式^[18-19]计算出每个微面元的偏振度。最后,进行偏振特性对比分析。

海面建模大小设置为 512 m×512 m,单方向的采样点数目设置为 512 个,仿真波长为 8~12 μm,设置 RadTherm 软件中海面各微面元的发射率为 0.9,导入芝罘岛观测站的 24 h 实测数据,包括海水温度、大气温度和云层情况等数据,并设置经纬度和海拔。仿真中重点考察探测角和风速对海面偏振特性的影响,分别计算了当风速为 5,10,15 m/s 时,不同探测角下海面各微面元偏振度的均值、方差、最大值和最小值,如图 12 所示。其中,实心符号曲线表示修正方法模拟海面的数据,空心符号曲线为传统方法模拟海面的数据。

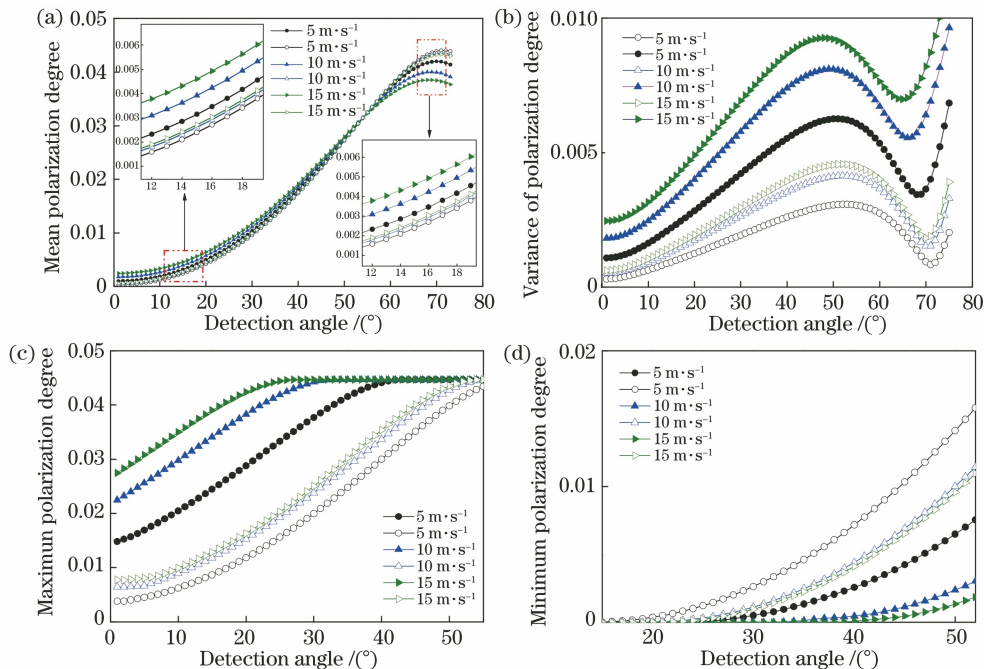


图 12 不同风速下偏振度随探测角的变化。(a)偏振度均值;(b)偏振度方差;(c)偏振度最大值;(d)偏振度最小值

Fig. 12 Polarization degree varying with detection angle under different wind speeds. (a) Mean polarization degree;

(b) variance of polarization degree; (c) maximum polarization degree; (d) minimum polarization degree

由图 12(a)可知,当探测角为 54°时,修正前后海面偏振度均值基本相同;当探测角小于 54°时,修正方法模拟生成海面的平均偏振度要大于传统方法模拟的海面,其最大差值可达 0.0019;当探测角大于 54°时,结果与探测角小于 54°的情况相反,此时最大差值约为 0.0050,且随着风速的增加,修正方法与传统方法模拟海面的平均偏振度差值逐渐增大。由图 12(b)可知,偏振度方差随风速增加而增

大,主要原因是风速增加使得模拟海面粗糙度增大,各面元的法向分布更加分散。在相同风速下修正方法模拟的海面偏振度方差明显大于传统方法,这是因为与传统方法相比,修正方法生成的海面具有更大的偏振度最大值和更小的偏振度最小值,如图 12(c)和图 12(d)所示,该现象的根本原因是修正方法增加了海浪谱的高频分量能量,使模拟的海面更加粗糙,偏振度分布范围更大。以上分析表明修正方

法与传统方法模拟生成海面的偏振特性有一定差别,且这必然会对后续海面场景目标检测和增强研究工作产生影响。

4 结 论

针对海面建模传统方法对空间采样率要求过高的问题,建立了一种海面建模的修正方法,该方法可用于高精度红外偏振特性仿真研究。结合热分析软件,对比研究了所提方法与传统方法模拟生成海面的红外偏振特性。仿真结果表明,修正方法能够在低空间采样率下有效提高模拟海面的高度方差、微面元斜率方差与实测数据的吻合度,其模拟生成海面的偏振特性与传统方法有一定差异。根据微面元理论,应用修正方法进行海面建模可以获得更高的模拟精度,进而可以提高海面场景红外偏振仿真研究的准确度,对后续海面场景目标检测和增强研究具有一定指导意义。此外,由于采用的海浪谱为深水谱,因此所提方法适用于深水海面建模,下一步工作中将考虑近岸等浅水情况下的非线性海面建模。

参 考 文 献

- [1] Cox C, Munk W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1954, 44(11): 838-850.
- [2] Ebuchi N, Kizu S. Probability distribution of surface wave slope derived using sun glitter images from geostationary meteorological satellite and surface vector winds from scatterometers [J]. *Journal of Oceanography*, 2002, 58(3): 477-486.
- [3] Fukushima H, Suzuki K, Li L P, et al. Improvement of the ADEOS-II/GLI sun-glitter algorithm using concomitant microwave scatterometer-derived wind data [J]. *Advances in Space Research*, 2009, 43(6): 941-947.
- [4] Kay S, Hedley J, Lavender S. Sun glint correction of high and low spatial resolution images of aquatic scenes: a review of methods for visible and near-infrared wavelengths [J]. *Remote Sensing*, 2009, 1(4): 697-730.
- [5] Zhang Y D, Wu Z S. Light scattering and imaging of two-dimensional rough sea surface in the infrared [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(9): 1039-1043.
张延冬, 吴振森. 二维粗糙海面的光散射及其红外成像 [J]. *光学学报*, 2002, 22(9): 1039-1043.
- [6] Yang Z J, Yang Y Y, Fan D, et al. Research on dynamic sea surface modeling and simulation technology based on Monte Carlo method [J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2015, 36(6): 128-130.
杨振军, 杨雨迎, 范栋, 等. 基于蒙特卡洛方法的大型动态水面建模与仿真技术 [J]. *四川兵工学报*, 2015, 36(6): 128-130.
- [7] Jia J T, Zhai J S, Meng C Y, et al. The computing of wave model with 2D FFT [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2004, 24(4): 26-28.
贾俊涛, 翟京生, 孟婵媛, 等. 使用 2D FFT 优化计算海浪波高模型 [J]. *海洋测绘*, 2004, 24(4): 26-28.
- [8] Zhang C, Wu X, Xie J. Infrared polarization characteristics on sea surface based on bidirectional reflection distribution function [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(6): 1303-1313.
张弛, 吴鑫, 谢建. 基于双向反射分布函数的海面红外偏振特性表征模型 [J]. *光学精密工程*, 2020, 28(6): 1303-1313.
- [9] Xia R Q, Wang X, Jin W Q, et al. Distance model of infrared polarization imaging system used in sea-surface environment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 0304007.
夏润秋, 王霞, 金伟其, 等. 海面环境中红外偏振成像系统作用距离模型 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(3): 0304007.
- [10] Mobley C D. Polarized reflectance and transmittance properties of windblown sea surfaces [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(15): 4828-4849.
- [11] Xu D L, Yu D Y. Theory of random ocean waves [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001.
徐德伦, 于定勇. 随机海浪理论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [12] Su D Z, Wu S Y, Liu L, et al. Ocean wave spectrum modeling-based sea surface polarization simulation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(14): 1411001.
宿德志, 吴世永, 刘亮, 等. 基于海浪谱建模的海面偏振仿真研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(14): 1411001.
- [13] Hou X L, Shen P Z, Wang W Y. Method of ocean wave synthesis based on directional spectrum [J]. *Journal of System Simulation*, 2010, 22(1): 130-134.
侯学隆, 沈培志, 王文辉. 基于方向谱的海浪合成方法 [J]. *系统仿真学报*, 2010, 22(1): 130-134.
- [14] Elfouhaily T, Chapron B, Katsaros K, et al. A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(C7): 15781-15796.
- [15] Kay S, Hedley J, Lavender S, et al. Light transfer at the ocean surface modeled using high resolution sea surface realizations [J]. *Optics Express*, 2011, 19

- (7): 6493-6504.
- [16] Cook R L, Torrance K E. A reflectance model for computer graphics[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1981, 15(3): 307-316. [LinkOut]
- [17] Zhang J H, Zhang Y, Shi Z G. Study and modeling of infrared polarization characteristics based on sea scene in long wave band[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2018, 37(5): 586-594.
张景华, 张焱, 石志广. 基于长波红外的海面场景偏振特性分析与建模[J]. 红外与毫米波学报, 2018, 37(5): 586-594.
- [18] Deng Y, Fu Q, Zhang S, et al. Research on the method of suppressing solar flare based on polarization detection technology[J/OL]. Laser & Optoelectronics Progress [2021-09-22]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.tn.20210120.1033.002.html>.
- 邓宇, 付强, 张肃, 等. 基于偏振检测技术的海面太阳耀光抑制方法研究[J/OL]. 激光与光电子学进展 [2021-09-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.tn.20210120.1033.002.html>.
- [19] Yang M, Xu W B, Tian Y Z, et al. Time-sharing infrared polarization imaging system for moving target detection[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(15): 1511001.
杨敏, 徐文斌, 田禹泽, 等. 面向运动目标探测的分时型红外偏振成像系统[J]. 光学学报, 2020, 40(15): 1511001.