

基于洋面场景的 MERSI 偏振辐射特性反演及其分析方法

何玉青^{1**}, 姜梦蝶², 胡秀清^{3*}, 刘明奇¹, 金伟其¹, 胡奇¹

¹北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081;

²中国电子科技集团公司第二十八研究所, 江苏 南京 210007;

³中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081

摘要 辐射传递链路的偏振灵敏度会影响中分辨率光谱成像仪(MERSI)遥感观测数据的精度及其后续应用,故需要对其偏振灵敏度进行反演、分析及定量去除以提高辐射定标的精度。针对在轨后的 MERSI,选择洋面场景这一偏振度较大的区域,通过对卫星观测数据和环境数据进行预处理,基于海洋表面三维波浪斜坡的概率密度模型和非涅耳反射定律来描述海表辐射状态,利用 6SV 辐射传输模拟工具来分析大气对偏振辐射状态的影响,将其与海表辐射状态耦合可得到大气顶偏振辐射状态,实现了对 MERSI 偏振辐射特性的反演。实验分析了 MERSI 在特定波段的偏振辐射特性,发现其偏振度随着卫星天顶角的变化呈现不对称分布,反射率误差随着卫星天顶角及偏振度的变化基本比较稳定;分析了 MERSI 在不同观测几何、风速风向向下偏振敏感性的变化规律。

关键词 遥感; 偏振; 中分辨率光谱仪; 海表辐射; 大气顶; 偏振敏感性

中图分类号 O436.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0628002

Retrieval and Analysis of MERSI Polarization Radiation Characteristics Based on Ocean Scene

He Yuqing^{1**}, Jiang Mengdie², Hu Xiuqing^{3*}, Liu Mingqi¹, Jin Weiqi¹, Hu Qi¹

¹MOE Key Laboratory of Optoelectronic Imaging Technology and System, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

²The 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing, Jiangsu 210007, China;

³National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Abstract The polarization sensitivity of the radiative transfer link will affect the accuracy and subsequent application of the remote sensing data of the medium resolution spectral imager (MERSI), so it is necessary to invert, analyze, and quantitatively remove the polarization sensitivity to improve the accuracy of radiometric calibration. Aiming at the MERSI in orbit, the region with large polarization degree of ocean scene is selected. Through the preprocessing of satellite observation data and environmental data, the sea surface radiation state is described based on the probability density model of ocean surface three-dimensional wave slope and Fresnel reflection law. 6SV radiative transfer simulation tool is used to analyze the influence of atmosphere on polarized radiation state. By coupling it with the sea surface radiation state, the atmospheric top polarized radiation state can be obtained, and the inversion of the polarized radiation characteristics of MERSI can be realized. The polarization radiation characteristics of MERSI in specific wave band are analyzed experimentally, and it is found that the polarization degree of MERSI is asymmetrically distributed with the change of satellite zenith angle, and the reflectivity error is stable with the change of satellite zenith angle and polarization degree. The variation law of polarization sensitivity of MERSI under

收稿日期: 2021-08-18; 修回日期: 2021-09-22; 录用日期: 2021-09-27

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504901)

通信作者: *huxq@cma.gov.cn; **yuqinghe@bit.edu.cn

different observation geometry and wind direction is analyzed.

Key words remote sensing; polarization; MERSI; sea surface radiation; top of atmosphere; polarization sensitivity

1 引言

在遥感探测中地物目标的辐射偏振状态可用来反演风速以及气溶胶的类型和光学厚度等^[1],国内外都有相关的辐射偏振探测仪搭载于卫星进行偏振信息的探测与分析,例如法国的地球反射偏振测量仪(POLDER)和我国搭载于天宫二号卫星的多角度偏振探测仪^[2]以及搭载于高分五号卫星的星载高精度偏振扫描仪^[3]。但是对于非偏振卫星载荷,偏振是一种干扰信息,辐射传递链路的偏振灵敏度会影响遥感观测数据的精度及其后续应用,为此需要对仪器的偏振灵敏度进行反演分析及定量去除以提高辐射定标精度^[4-6]。

中分辨率光谱成像仪(MERSI)是搭载在第二代极轨卫星风云三号上的新一代多光谱光学成像载荷^[7]。受到我国在反射波段星上定标装置的设计能力及技术水平方面的限制,早期对 MERSI 的设计及在轨辐射定标主要关注了一些对仪器辐射误差影响较大的因素,而未考虑偏振灵敏度等因素。随着定标技术的进步,科研人员对精细化定标及精度提出了更高的要求,同时发现载荷定标后仍然存在“残余误差”,这一误差在地表偏振度较高的区域(海洋)似乎更为明显^[6,8]。因此,对非偏仪器 MERSI 辐射链路的偏振辐射响应进行建模、反演及分析,可确定其偏振灵敏度,故能够建立更精细的定标模型,从而提高我国辐射定标的水平。

对仪器进行在轨偏振辐射的校正主要是结合发射前实验室中仪器的偏振灵敏度^[9],以及利用辐射传输模拟工具模拟观测目标的大气顶(TOA)偏振辐射状态这两部分实现的^[8,10]。但是由于以往一些国产卫星仪器在发射前未测量仪器的偏振灵敏度,且仪器的在轨特性往往会使其偏离发射前实验室中的状态,为此需要对仪器进行在轨偏振灵敏度的分析及反演,以便更准确地对仪器进行在轨偏振辐射的校正。为此,国际上已对在轨非偏仪器的偏振灵敏度及其辐射校正方法开展了相关研究。中分辨率成像光谱仪(MODIS)是搭载在 Terra 和 Aqua 卫星上的重要仪器。MODIS/Aqua 利用发射前实验室的偏振测量数据来计算斯托克斯偏振分量并将其应用于发射后的偏振校正^[4],并对因偏振产生的海洋离水辐射率进行校正^[5]。MODIS/Terra 利用交叉定标方法对地球

观测的水色数据对经过偏振影响到达 TOA 的离水辐射率进行校正^[6],利用沙漠观测数据进行可见光波段的在轨辐射定标^[10]。NASA(National Aeronautics and Space Administration)的气候绝对辐射和折射观测台任务是用来对不同洋面目标和大气条件下的偏振分布模型进行分析,以消除偏振在交叉定标时的影响^[8,11]。VIIRS 仪器分析了在轨偏振敏感性对海洋水色的影响^[12]。国内对海洋一号水色水温扫描仪(COCTS)基于海洋-大气耦合矢量辐射传输模型,并通过观测水体的偏振辐射状态进行了在轨偏振辐射的校正^[13]。对于推扫式可见光/近红外成像光谱仪,利用发射前的偏振测试数据对仪器在轨偏振响应的校正进行探索^[14]。利用海洋场景从理论上分析了不同成像载荷的目标辐射经大气传输后在有无偏振校正模式下到达 TOA 的辐射量差异^[15]。综上所述可以看出,国内外已开展了不同探测器的偏振辐射校正的研究,可借鉴用于 MERSI 的偏振校正。

观测目标表面的偏振辐射状态及偏振度存在差异,一般来说大型平坦的目标偏振度较高,例如沙漠、草地和海洋等,太阳光在其表面反射所产生的偏振特性遵循菲涅耳定律^[1]。海洋目标较易获得且区域面积大,数据中的太阳天顶角和卫星天顶角范围广,因此可选择海洋场景作为目标进行 MERSI 的偏振辐射反演。此外,在太阳反射波段,大气瑞利散射和气溶胶米氏散射均会对观测目标的偏振辐射状态产生影响^[16-17],此时可选择较为成熟的大气辐射传输模型对大气偏振辐射状态进行模拟。

本文基于菲涅耳反射定律、海洋表面三维模型和辐射传输模拟工具对洋面场景的 TOA 偏振辐射状态进行建模,用来反演分析 MERSI 的偏振灵敏度,并与 MODIS 进行对比分析。

2 洋面场景 TOA 偏振辐射建模方法

挑选处理洋面区域的卫星观测数据和环境数据,利用海洋表面三维模型和菲涅耳反射定律来模拟真实海洋的表面辐射状态,基于辐射传输模拟工具来分析大气瑞利散射和气溶胶散射对偏振辐射状态的影响,将其与海表辐射状态进行耦合可以得到 TOA 偏振辐射状态。洋面场景 TOA 偏振辐射模型的具体建模流程如图 1 所示。为了验证辐射传输模拟的正确性,对偏振探测器 POLDER 进行辐射

传输的模拟并与实际观测数据对比。验证仿真方法与结果正确后,将该方法应用于 MERSI 并对其进

行偏振灵敏度分析,最后将 MERSI 和 MODIS 的偏振灵敏度进行对比。

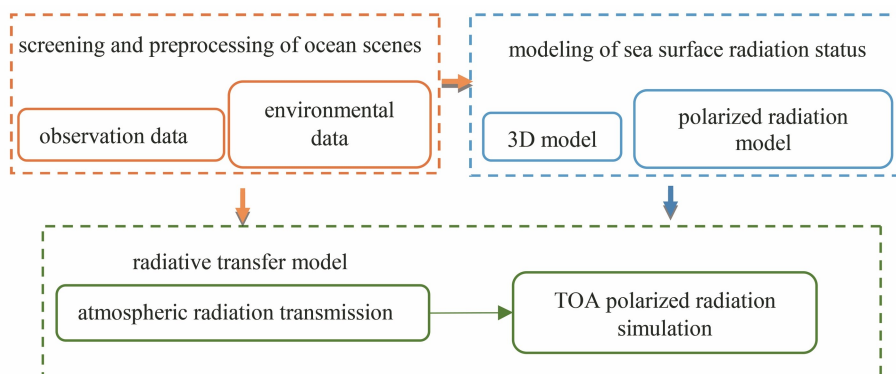


图 1 洋面场景 TOA 偏振辐射特性的建模流程图

Fig. 1 Modeling flowchart of TOA polarization radiation characteristics in ocean scene

2.1 卫星观测数据的选择与预处理

卫星观测数据主要采用 MERSI、MODIS 和 POLDER 的海洋数据,用来进行偏振辐射的模拟和验证,这里主要利用这些载荷的太阳反射波段数据进行模拟。

MERSI 搭载于我国风云三号 D 星,涵盖了 0.412~1.030 μm 的 19 个太阳反射波段的观测数据,空间分辨率有 250 m 和 1000 m 两种。根据各波段原始遥感影像中像元的亮度值并通过线性定标,可以获得太阳反射波段的反射率。

MODIS 搭载于 NASA 的地球观测系统,这是国内外公认的先进遥感器,其具有严格细致的发射前实验室测试、星上定标装置、持续整个遥感器生命周期的星上和替代定标,基于此可以获得目前高质量的卫星辐射观测数据。MODIS Level1B 数据包括 MYD021KM 中的太阳反射波段反射率和 MYD03 中的地理参数(纬度、经度、大地水准面以上的表面高度、太阳天顶角和方位角、卫星天顶角和方位角及每 1 km 样本的陆地/海洋标识)。

POLDER 是搭载在 PARASOL 卫星上的中分辨率多光谱成像辐射计,具有 2400 km 的宽视场,星下点区域大小为 6 km×7 km,其中波长为 490, 670, 865 nm 的通道为偏振通道。POLDER Level1 数据中提供的 I、Q 和 U 分量是在 16 个不同观测视角下的归一化辐亮度值,其中 I 为偏振总强度,Q 和 U 均为线偏振分量。可将归一化辐亮度值转化为反射率,表达式为

$$\begin{cases} R = \frac{I}{\cos \theta_s} \\ R_p = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{\cos \theta_s} \end{cases}, \quad (1)$$

式中:θ_s 为太阳天顶角;R 为归一化反射率;R_p 为归一化偏振反射率,下文简称反射率或偏振反射率。

对卫星观测数据进行预处理,这是保证后续数据仿真结果正确的前提,主要为通过轨道预报的方法挑选与卫星轨道接近的洋面数据,对数据进行反射率定标、云检测以及将多个 5 min 块数据合并成完整的一个轨道数据。反射率定标采用国家卫星气象中心的定标方法并确定具体系数。由于目标均为洋面数据,因此云检测采用简单算法,用变异系数(标准差/平均值)来进行云检测,将波长为 650 nm 通道的反射率大于 0.15 且 1380 nm 通道的变异系数大于 0.01 的判定为云。本文为了更好地对比 MERSI 和 MODIS 的偏振灵敏度,挑选了两者轨道较为接近的太平洋洋面在同样日期下的数据进行下一步的分析。由于 POLDER 与 MERSI 和 MODIS 的在轨时间不重合,故挑选了其同样位于太平洋其他时间的数据。

2.2 环境数据的选择与预处理

模拟所需要的环境数据为气溶胶光学厚度(AOD)和风速风向。AOD 从 MODIS 3 级大气 8 天全球联合产品 MYD08_E3 中获得,其分辨率为 1°×1°,MYD08_E3 中还包含大气颗粒物特性、总臭氧负荷、大气水蒸气、云的光学和物理特性以及大气稳定性指数等参数,其还为每个参数提供标准偏差、质量保证加权平均值和其他统计得出的数量。数据中的 AOD 是在 550 nm 通道处得到的结果,经过简单地定标计算即可得到真实的 AOD。

风速风向使用欧洲中期天气预报中心提供的全球大气再分析数据中的 10 m 风场资料,每日共有 0, 6, 12, 18 h(协调世界时间,UTC)4 组数据,空间分辨率从 0.125°×0.125°到 3.000°×3.000°不等。

选择时间与卫星观测时间最为接近的、空间分辨率最高的一组数据作为模拟过程中风速风向的输入。风速风向是由经度方向上的 U (单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和纬度方向上的 V (单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 共同表示的, 经过转化可得到风速 w_s 和风向方位角 ϕ_w 分别为

$$\begin{cases} w_s = \sqrt{U^2 + V^2} \\ \phi_w = \arctan \frac{V}{U} \end{cases} \quad (2)$$

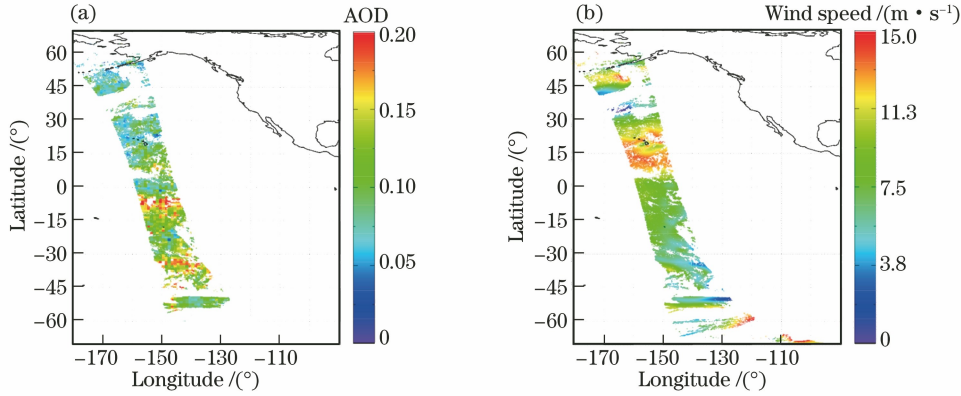


图 2 与 POLDER 匹配之后的环境参数(2005 年 3 月 28 日, 太平洋)。(a) AOD; (b) 风速

Fig. 2 Environmental parameters after matching with POLDER (March 28, 2005, Pacific). (a) AOD; (b) wind speed

2.3 海洋表面三维模型和偏振辐射模型

真实场景中的海洋表面并不是“完美”的镜面, 可以利用 Cox 等^[18]所建立的仅由海洋表面风速风向决定的三维波浪斜坡分布模型来准确地表征海洋表面场景, 同时利用菲涅耳反射理论来描述其偏振辐射特性。因此, 实际海洋表面的反射情况是由三

AOD 和风速风向等环境参数需要根据待模拟数据的经纬度网格, 以查找对应经纬度网格上的环境参数, 从而实现与待模拟观测数据所在的地理位置匹配。图 2 表示了与 POLDER 进行地理位置匹配之后太平洋场景的 AOD 和风速, 可以看到待模拟数据一般选择 AOD 在 0.2 以下、风速在 15 m/s 以下的数据。

维波浪斜坡的概率密度函数和菲涅耳反射理论共同描述的。

2.3.1 海洋表面三维模型

在由海洋表面风速风向决定的三维波浪斜坡分布模型中, 波浪斜坡面沿侧风和上风方向的倾斜度用 Z_x 和 Z_y 分别表示为

$$\begin{cases} Z_x = \frac{-\sin \theta_v \sin(\phi_s - \phi_v)}{\cos \theta_s + \cos \theta_v} \cos \chi + \frac{\sin \theta_s + \sin \theta_v \cos(\phi_s - \phi_v)}{\cos \theta_s + \cos \theta_v} \sin \chi \\ Z_y = \frac{\sin \theta_v \sin(\phi_s - \phi_v)}{\cos \theta_s + \cos \theta_v} \sin \chi + \frac{\sin \theta_s + \sin \theta_v \cos(\phi_s - \phi_v)}{\cos \theta_s + \cos \theta_v} \cos \chi \end{cases}, \quad (3)$$

式中: θ_v 、 ϕ_s 和 ϕ_v 分别为卫星天顶角、太阳方位角和卫星方位角; χ 为从 ϕ_s 到 ϕ_w 的旋转角, $\chi = \phi_s - \phi_w$ 。

起伏的海面斜坡的概率密度函数可表示为

$$P(Z_x, Z_y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left(-\frac{\xi^2 + \eta^2}{2}\right) \left[1 - \frac{1}{2}C_{21}(\xi^2 - 1) - \frac{1}{6}C_{03}(\eta^3 - 3\eta) + \frac{1}{24}C_{40}(\xi^4 - 6\xi^2 + 3) + \frac{1}{4}C_{22}(\xi^2 - 1)(\eta^2 - 1) + \frac{1}{24}C_{04}(\eta^4 - 6\eta^2 + 3)\right], \quad (4)$$

式中: σ_x 和 σ_y 分别为 Z_x 和 Z_y 的均方根值, $\sigma_x^2 = 0.003 + 0.00192w_s \pm 0.002$, $\sigma_y^2 = 0.00316w_s \pm 0.004$; 偏度系数 C_{21} 和 C_{03} 以及尖峰强度系数 C_{40} 、 C_{22} 和 C_{04} 定义为

$$\begin{cases} C_{21} = 0.01 - 0.0086w_s \pm 0.03 \\ C_{03} = 0.04 - 0.0330w_s \pm 0.12 \\ C_{40} = 0.40 \pm 0.23 \\ C_{22} = 0.12 \pm 0.06 \\ C_{04} = 0.23 \pm 0.41 \end{cases}. \quad (5)$$

对于洁净表面, ξ 和 η 表示为

$$\begin{cases} \xi = \frac{Z_x}{\sigma_x} \\ \eta = \frac{Z_y}{\sigma_y} \end{cases} \quad (6)$$

2.3.2 偏振辐射模型

利用上述海洋表面三维模型中海面斜坡的概率密度函数 $P(Z_x, Z_y)$, 可以得到特定观测几何条件下的反射率 ρ_g 和偏振反射率 $\rho_g^{(pol)}$, 表达式为

$$\begin{cases} \rho_g(\theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v) = \frac{\pi P(Z_x, Z_y) R(n, \theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v)}{4 \cos \theta_s \cos \theta_v \cos^4 \theta_n} \\ \rho_g^{(pol)}(\theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v) = \frac{\pi P(Z_x, Z_y) R^{(pol)}(n, \theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v)}{4 \cos \theta_s \cos \theta_v \cos^4 \theta_n} \end{cases}, \quad (7)$$

式中: θ_n 为波面斜率; n 为海水的折射率; $R(n, \theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v)$ 和 $R^{(pol)}(n, \theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v)$ 分别为菲涅耳反射系数和偏振反射系数。

菲涅耳反射理论中的入射角 θ_i 和反射角 θ_t 为

$$\begin{cases} \theta_i = \frac{1}{2} \arccos[\cos \theta_s \cos \theta_v + \sin \theta_s \sin \theta_v \cos(\phi_s - \phi_v)], \\ \theta_t = \arcsin \frac{n_1 \sin \theta_i}{n} \end{cases} \quad (8)$$

式中: n_1 为空气的折射率。

根据菲涅耳定律, 入射光电矢量被分解成两个分量, 一个平行于入射面, 另一个垂直于入射面。如果记 $r_{//}$ 和 r_{\perp} 分别为两个分量的反射率, 则菲涅耳方程可写为

$$\begin{cases} r_{//} = \frac{n \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} \\ r_{\perp} = \frac{n_1 \cos \theta_i - n \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n \cos \theta_t} \end{cases} \quad (9)$$

由于直射的太阳光是自然光(非偏振光), 其沿各个方向的振幅分量都相等, 所以总反射率 ρ 和偏振反射率 $\rho^{(pol)}$ 为

$$\begin{cases} \rho = \frac{r_{//}^2 + r_{\perp}^2}{2} \\ \rho^{(pol)} = \frac{r_{//}^2 - r_{\perp}^2}{2} \end{cases} \quad (10)$$

偏振度可表示为

$$P = \frac{\rho^{(pol)}}{\rho} = \left| \frac{r_{//}^2 - r_{\perp}^2}{r_{//}^2 + r_{\perp}^2} \right| \quad (11)$$

2.4 基于辐射传输模型建立大气查找表

受到大气辐射传输的影响, 辐射会在链路中发

生改变, 此时可以基于国际上现有的辐射传输模型来建立大气查找表以进行不同条件下准确辐射的计算。

6SV 矢量模型是大气校正算法常用的模型之一, 它考虑了观测目标的海拔高度和朗伯/各向异性的地表, 计算了气体吸收率, 对真实的分子/气溶胶/混合大气的散射基于近似和逐次散射算法进行计算, 并对在辐射传输路径中对光线受大气的影响进行了不同的描述。此外, 由于考虑了偏振的影响, 6SV 矢量模型可以模拟出斯托克斯矢量, 这可以用来表征辐射强度以及垂直、平行和椭圆偏振。本文使用 6SV 1.0B 模型对大气辐射传输模式进行分析。

由于 6SV 模型需要逐点计算, 实际使用中计算时间过长, 而建立查找表可以提高计算效率。利用 6SV 模型建立查找表需要逐点输入的参数主要包括观测几何(太阳天顶角 θ_s 、太阳方位角 ϕ_s 、卫星天顶角 θ_v 和卫星方位角 ϕ_v) 和 AOD, 查找表的主要参数间隔如表 1 所示, 其他参数均设为固定值, 包括大气模型、气溶胶类型、目标海拔高度和光谱信息等。利用该模型构建的查找表的输出参数主要包括瑞利散射和气溶胶散射的偏振度、偏振反射率和斯托克斯矢量等。

表 1 大气查找表的主要输入参数

Table 1 Main input parameters of atmospheric lookup table

Parameters	Range	Unit	Interval
Solar zenith	0-90	(°)	1
Solar azimuth	0-180	(°)	2
Sensor zenith	0-90	(°)	1
Sensor azimuth	0-180	(°)	1
AOD	0-0.2		0.02

2.5 TOA 偏振辐射状态耦合

分别计算出海表和大气偏振辐射状态后, 需要将它们耦合在一起可以得到 TOA 的偏振辐射状态。TOA 的反射率和偏振反射率的计算公式^[19]为

$$\rho \cong (\rho_g + \rho_w + \rho_f) \exp(-M\delta) + \rho_m + \rho_a, \quad (12)$$

$$\rho^{(pol)} \cong \rho_g^{(pol)} \exp(-M\delta) + \rho_m^{(pol)} + \rho_a^{(pol)}, \quad (13)$$

式中: ρ_m 、 $\rho_m^{(pol)}$ 和 ρ_a 、 $\rho_a^{(pol)}$ 分别为由 6SV 查找表查找到的瑞利散射和气溶胶散射的反射率和偏振反射率; ρ_w 为离水辐射率; ρ_f 为泡沫反射率; M 为空气质量因子; δ 为大气的总光学厚度。由于泡沫反射率通常较小(小于 0.001), 离水辐射率的大小与海

水中的叶绿素浓度等相关,本文默认选择的海洋都是较为“干净”的深海,因此忽略 ρ_w 和 ρ_f ,则 TOA 的反射率和偏振度为

$$\rho \cong \rho_g \exp(-M\delta) + \rho_m + \rho_a, \quad (14)$$

$$P = \frac{\rho_g P_g \exp(-M\delta) + \rho_m P_m + \rho_a P_a}{\rho_g \exp(-M\delta) + \rho_m + \rho_a}, \quad (15)$$

式中: P_g 、 P_m 和 P_a 分别为海表、瑞利散射和气溶胶散射的偏振度。

将上述步骤结合,可以获得特定日期、特定环境条件下特定海表目标到达 TOA 的偏振辐射状态。

3 反演结果与分析

对上述偏振辐射模拟方法基于 POLDER 偏振探测器进行正确性验证,在此基础上再进行 MERSI

偏振特性的反演及分析。

3.1 偏振辐射模拟方法正确性验证

为了验证本文提出的偏振辐射特性建模方法的正确性,将本方法基于 POLDER 这一偏振探测器进行模拟,通过模拟对应的洋面场景的反射率和偏振度等辐射量并与 POLDER 探测器实际获取的偏振数据进行对比验证分析。

对 POLDER 的 490 nm 通道进行完整的辐射传输模拟,以 2005 年 3 月 28 日观测太平洋的条件开展模拟,反射率和偏振度的模拟结果及对应的实际观测值如图 3 所示,可以看到观测值和模拟值的整体趋势及一致性较好,反射率和偏振度的相关系数 R^2 分别为 0.8465 和 0.9732,验证了本方法的正确性和有效性。

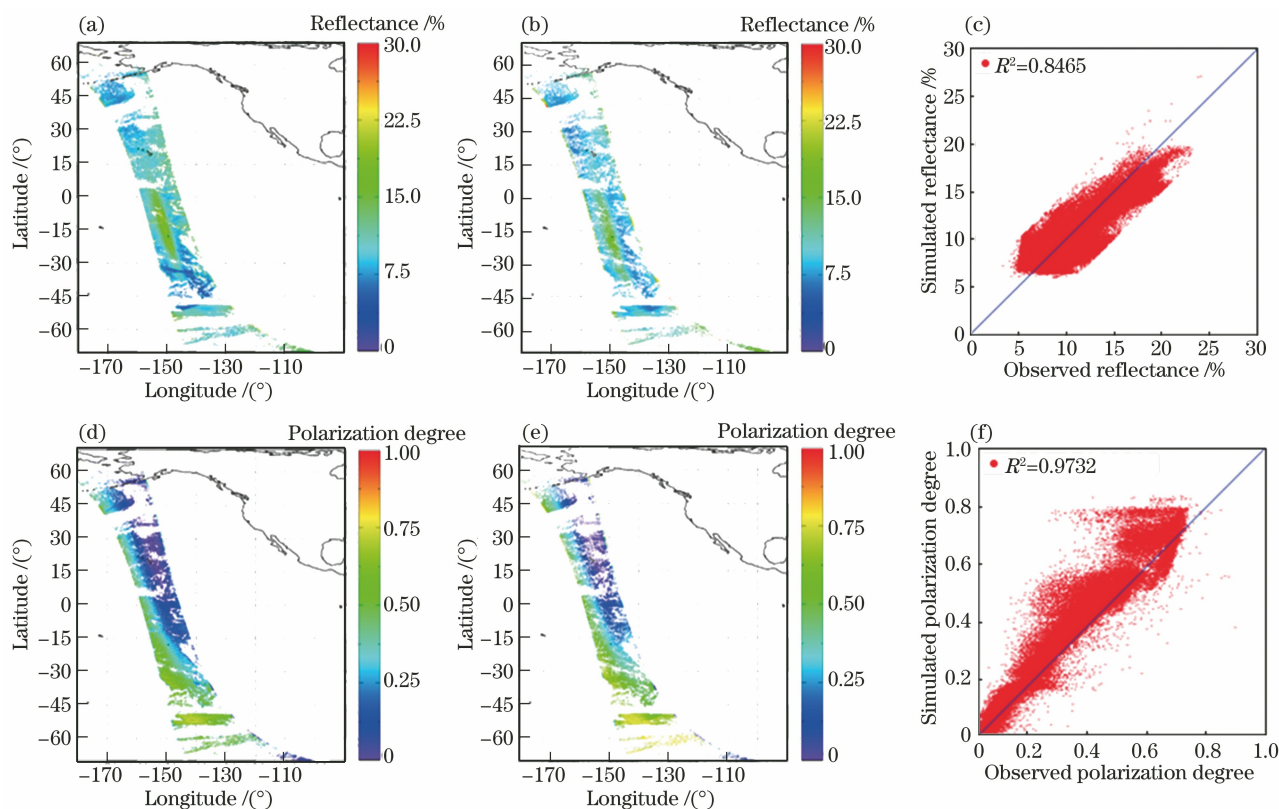


图 3 POLDER 反射率与偏振度模拟结果的对比。(a)反射率的观测值;(b)反射率的模拟值;(c)反射率的相关性;(d)偏振度的观测值;(e)偏振度的模拟值;(f)偏振度的相关性

Fig. 3 Comparison of reflectance and polarization degree simulation results for POLDER. (a) Observation value of reflectance; (b) simulation value of reflectance; (c) relevance of reflectance; (d) observation value of polarization degree; (e) simulation value of polarization degree; (f) relevance of polarization degree

对于仿真结果中存在的一些噪点和相关系数较差的数据,主要的原因分析如下:云检测不够充分,部分云的存在使得结果的相关性较低;反射率非常高的区域(耀斑区中心)可能由传感器的饱和而导致观测值与模拟值的拟合效果变差。

3.2 MERSI 偏振辐射反演结果及分析

基于本文的偏振辐射模拟方法对 MERSI 的 412 nm 通道进行偏振辐射模拟的反演,以 2018 年 4 月 3 日 23:00~23:30 太平洋的场景为例,风速风向选择 2018 年 4 月 4 日 0 h 风场产品,风场产品与

卫星过境的时间差不超过 1 h,由风场环境参数引入的误差较小。反射率模拟结果与真实观测反射率的对比如图 4 所示。选择 412 nm 通道的原因:一是国际上的研究显示该通道探测器具有较大的偏振

响应^[4],因此分析和展示效果相对比较明显;另外该通道能与 MODIS 同样谱段的通道进行对应以便后续对比。本文方法可以推广应用至分析 MERSI 在其他不同波长下的通道偏振特性。

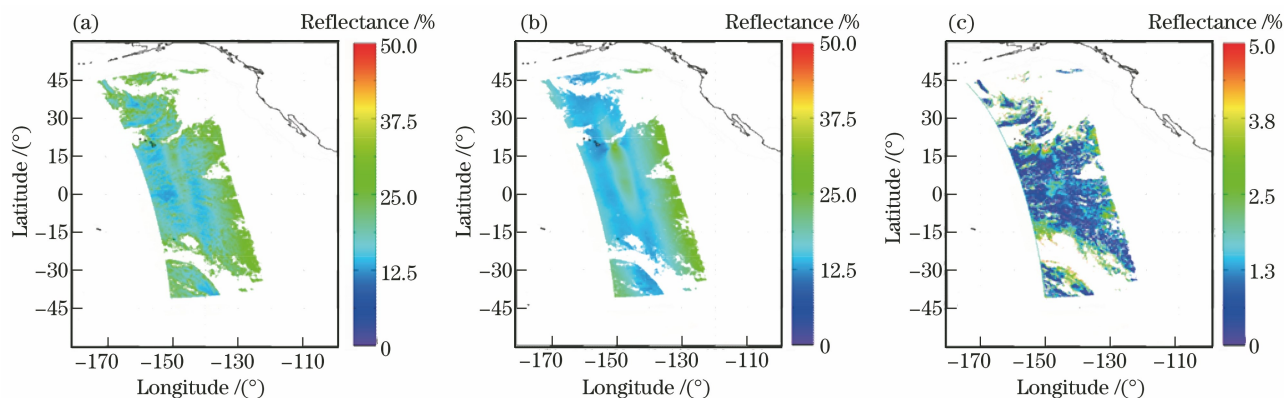


图 4 MERSI 模拟反射率与观测值的对比。(a)观测值;(b)模拟值;(c)差值

Fig. 4 Comparison of reflectance simulation and observation results of MERSI. (a) Observation value; (b) simulation value; (c) difference

对 MERSI 的偏振灵敏度进行定量评估,以 MODIS 遥感器在同样日期下观测的洋面场景目标作为参考并进行对比分析。利用本文的偏振辐射模拟方法对 MODIS 同样在 2018 年 4 月 3 日的 412 nm 通道进行辐射传输模拟。根据卫星轨道预报进行数据

的筛选,选用的数据中 MODIS 与 MERSI 的星下点距离不超过 5 km,时间差不超过 30 min,环境参数基本一致。反射率的模拟结果对比如图 5 所示。基于本文模型对 MERSI 与 MODIS 在该地点同样日期下的偏振度进行模拟,得到的结果如图 6 所示。

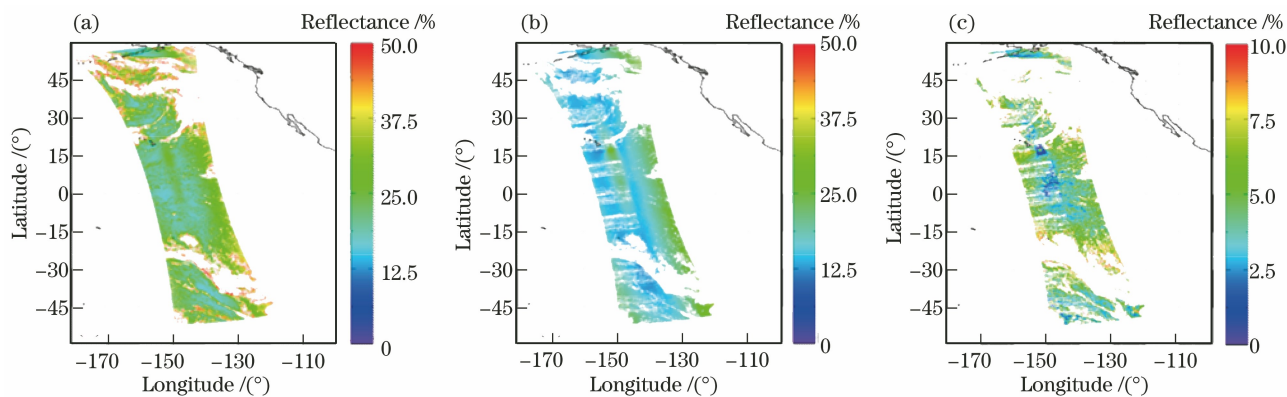


图 5 MODIS 模拟反射率与观测值对比。(a)观测值;(b)模拟值;(c)差值

Fig. 5 Comparison of reflectance simulation and observation results of MODIS. (a) Observation value; (b) simulation value; (c) difference

从图 5 和图 6 可以看到:对于反射率和偏振度, MERSI 和 MODIS 的模拟值和观测值在整体分布上都比较一致;MERSI 模拟与观测的反射率误差的绝对值基本小于 5%,而 MODIS 模拟与观测的反射率误差的绝对值基本在 5%左右。

对 MERSI 和 MODOS 模拟的反射率误差和偏振度基于不同的观测几何进行进一步的分析,发现反射率与偏振度的变化与卫星天顶角相关,如图 7 所示,其中图 7(a)和图 7(d)为模拟的偏振度随着卫

星天顶角的变化情况,图 7(b)、图 7(e)、图 7(c)和图 7(f)分别展示了卫星传感器观测到的反射率、模拟得到的 TOA 反射率和它们的误差随卫星天顶角及偏振度变化的情况。

从 MERSI 和 MODIS 的数据对比分析可以看到:MERSI 的模拟结果与 MODIS 具有一致性,说明 MERSI 的偏振敏感性与 MODIS 类似,且 MERSI 具有较小的偏振辐射误差;MERSI 的偏振度随着卫星天顶角的变化呈现“碗状”,但其强度具

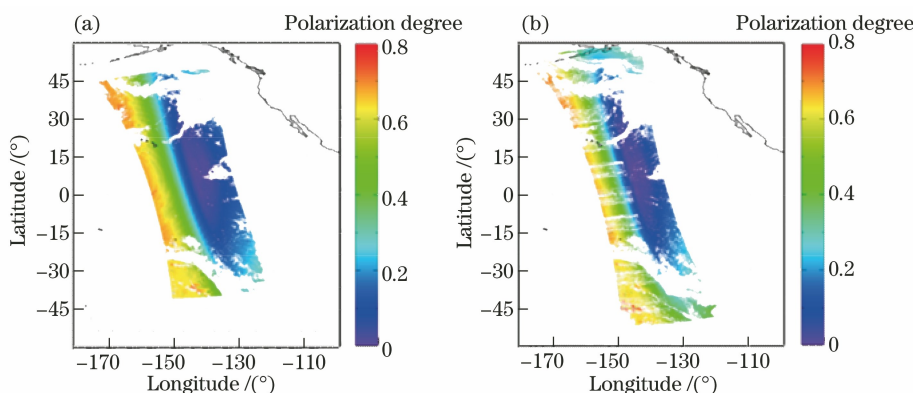


图 6 MERSI 与 MODIS 模拟偏振度的对比。(a) MERSI;(b) MODIS

Fig. 6 Comparison of polarization degree simulation results for MERSI and MODIS. (a) MERSI; (b) MODIS

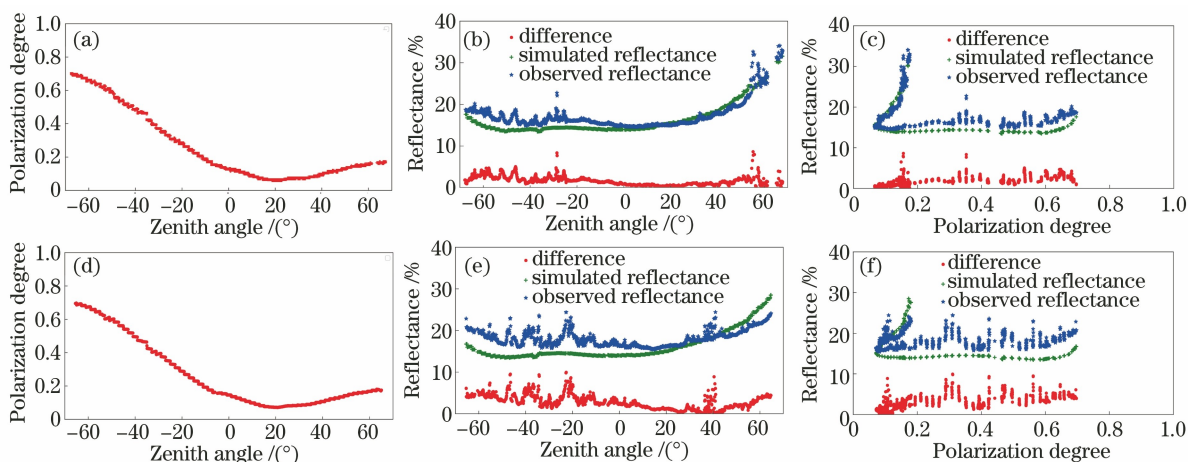


图 7 MERSI 和 MODIS 模拟数据的变化。(a)偏振度随卫星天顶角的变化(MERSI);(b)反射率及反射率误差随卫星天顶角的变化(MERSI);(c)反射率及反射率误差随偏振度的变化(MERSI);(d)偏振度随卫星天顶角的变化(MODIS);(e)反射率及反射率误差随卫星天顶角的变化(MODIS);(f)反射率及反射率误差随偏振度的变化(MODIS)

Fig. 7 Changes in simulated data by MERSI and MODIS. (a) Variation of polarization degree versus zenith angle of the satellite (MERSI); (b) variation of reflectance and reflectance difference versus zenith angle of the satellite (MERSI); (c) variation of reflectance and reflectance difference versus polarization degree (MERSI); (d) variation of polarization degree versus zenith angle of the satellite (MODIS); (e) variation of reflectance and reflectance difference versus zenith angle of the satellite (MODIS); (f) variation of reflectance and reflectance difference versus polarization degree (MODIS)

有不对称性,卫星天顶角在 20° 左右时偏振度最小; MERSI 的反射率模拟误差随着卫星天顶角及偏振度的变化基本比较稳定。

3.3 MERSI 偏振敏感性分析

利用建立好的偏振辐射特性模型对 MERSI 进行敏感性分析,以便更好地了解影响 TOA 的偏振度和反射率的因素,主要的影响因素包括观测几何(太阳天顶角、卫星天顶角和相对方位角)和风速风向^[19]。

3.3.1 观测几何敏感性分析

卫星观测角度的不同会导致辐射传输中大气路径的不同,也会改变辐射传输中的偏振特性,从而影响到达 TOA 的辐射状态,此外传感器所接收到的

反射辐射强度还会受到观测角度的影响,因此观测几何是分析偏振敏感性的重要条件。观测几何主要包括卫星方位角和天顶角,同时还需要考虑太阳天顶角。以 MERSI 在 2018 年 4 月 3 日太平洋的数据进行分析展示。

图 8 给出了在不同的相对方位角和太阳天顶角下,模拟的偏振度和反射率随着卫星天顶角的变化。从图 8 可以看到:TOA 的偏振辐射状态对太阳天顶角的依赖性远大于相对方位角;相对方位角只能微弱地影响反射率和偏振度的绝对值,其随着卫星天顶角的变化规律不会被改变;太阳天顶角会完全改变偏振度,偏振度随着卫星天顶角的变化而发生变

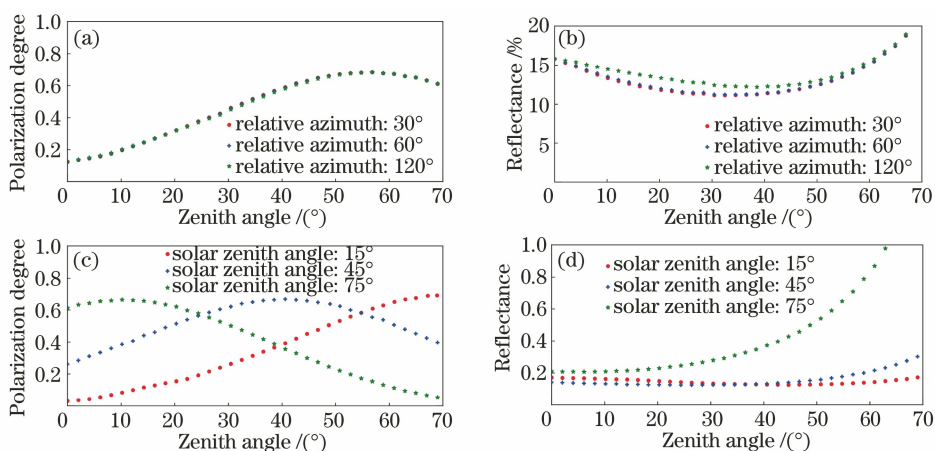


图 8 不同相对方位角和太阳天顶角下反射率和偏振度随卫星天顶角的变化 (AOD 为 0.15, 风速为 15 m/s, 风向角为 150°)。 (a) 太阳天顶角为 30° 的偏振度变化; (b) 太阳天顶角为 30° 的反射率变化; (c) 相对方位角为 120° 的偏振度变化; (d) 相对方位角为 120° 的反射率变化

Fig. 8 Variation of reflectance and polarization degree with satellite zenith angle under different relative azimuths and solar zenith angles (AOD is 0.15, wind speed is 15 m/s, wind direction angle is 150°). (a) Variation of polarization degree at solar zenith angle is 30°; (b) variation of reflectance at solar zenith angle is 30°; (c) variation of polarization degree at relative azimuth is 120°; (d) variation of reflectance at relative azimuth is 120°

化; 不同太阳天顶角对反射率的影响不同, 在卫星天顶角较大 (大于 40°) 时, 反射率的变化也很显著。

3.3.2 风速风向敏感性分析

风速会引起海面粗糙度的变化, 从而对海表的反射率产生影响, 但是对 TOA 的反射率和偏振度的影响可能会被削弱。图 9 为在不同的风速和风向角下 TOA 的偏振度和反射率随着卫星天顶角的变化。

从图 9 可以看到, 风速风向对偏振度几乎没有影响, 对反射率有较为微弱的影响。因此, 当基于卫星观测数据进行 TOA 偏振辐射状态的模拟时, 虽然卫星过境时间与风场产品固定时刻存在一定的时间差, 但是在这期间由风速风向变化引起的偏振度和反射率的误差十分微弱, 因此这一不确定量对分析结果的影响比较小, 可以忽略。

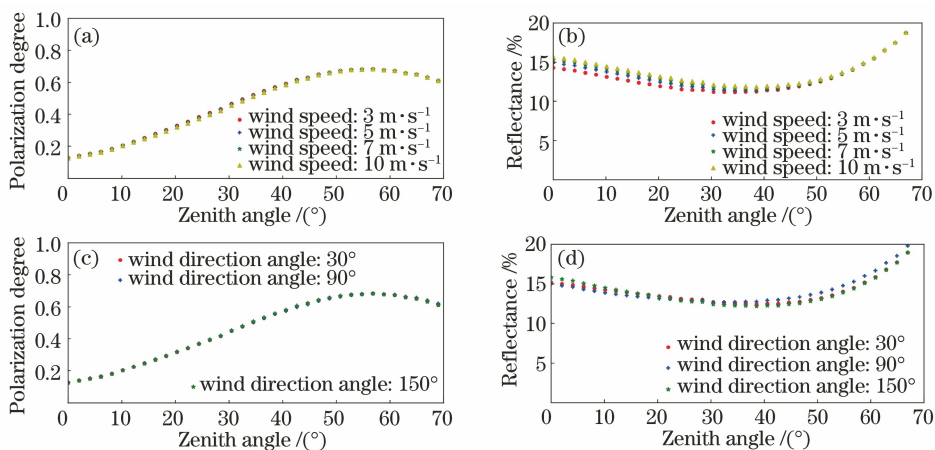


图 9 不同风速和风向角下反射率和偏振度随卫星天顶角的变化 (太阳天顶角为 30°, 相对方位角为 120°, AOD 为 0.15)。 (a) 风向角为 150° 的偏振度变化; (b) 风向角为 150° 的反射率变化; (c) 风速为 15 m/s 的偏振度变化; (d) 风速为 15 m/s 的反射率变化

Fig. 9 Variation of reflectance and polarization degree with satellite zenith angle under different wind speeds and wind direction angles (solar zenith angle is 30°, relative azimuth is 120°, AOD is 0.15). (a) Variation of polarization degree at wind direction angle is 150°; (b) variation of reflectance at wind direction angle is 150°; (c) variation of polarization degree at wind speed is 15 m/s; (d) variation of reflectance at wind speed is 15 m/s

由上述分析可以看到, MERSI 传感器的偏振灵敏度是非线性响应的, 与通道波长和卫星观测角等

自身参数相关, 观测几何尤其是太阳天顶角和卫星天顶角对 TOA 偏振辐射状态的影响较大, 对风速

风向的影响较为微弱,这样会引起测量得到的反射率发生变化而偏离实际值。综合考虑这些因素在不同条件下对 TOA 偏振辐射影响的差异,仪器的偏振灵敏度应该是根据这些规律设计成查找表的形式以进行后续的偏振校正和辐射定标。此外,MERSI 传感器的偏振辐射特性与国际上的仪器具有一致性,且偏振灵敏度相对 MODIS 较小,说明所设计的 MERSI 仪器在偏振灵敏度方面基本达到了国际高水平仪器的水准。

本方法虽然利用洋面场景进行辐射偏振灵敏度的模拟,但其获得的是 MERSI 仪器在不同的卫星天顶角及偏振度时的偏振灵敏度特性,该特性与辐射入射角度有关,与成像场景不存在变化关联。从实际的偏振辐射校正来考虑,由于成像场景的多样性,本方法能够应用到不同地物、不同几何目标的辐射定标修正,具有普适性。偏振辐射定标修正方法如下:一方面利用洋面场景 TOA 偏振辐射特性模型可以反演出仪器在不同入射角度等参数下的偏振辐射响应查找表;另一方面结合本文建立的 6SV 大气查找表,对不同地物、不同几何目标,如草地、沙漠等进行 TOA 偏振辐射特性的模拟,将不同地物、不同几何目标的 TOA 偏振辐射特性与仪器的偏振响应进行耦合,即可得到仪器在观测不同地物、不同几何目标时产生的偏振反射率,从而实现不同观测场景的偏振辐射定标。

4 结 论

对洋面目标的 TOA 偏振辐射特性进行模拟,增加对洋面目标海表、TOA 反射率和偏振度分布规律的认识,这是对仪器进行偏振响应反演分析和偏振辐射定标工作的基础。为了更好地分析了解国产卫星仪器 MERSI 的偏振灵敏度并进行偏振辐射校正,本文利用海洋表面三维模型和菲涅耳反射定律对洋面目标海表偏振辐射状态进行模拟,利用 6SV 辐射传输模型建立大气瑞利散射和气溶胶散射的查找表,将其耦合得到了洋面目标 TOA 的偏振辐射特性模型,实现了对在轨 MERSI 的偏振辐射特性的反演。将模拟的偏振辐射特性模型与偏振探测仪 POLDER 的观测结果进行比对,发现反射率和偏振度的相关系数较高,验证反演方法的正确可行。将偏振辐射特性反演模型应用于非偏仪器 MERSI,得到该仪器的偏振辐射特性;通过与国际高水平同类仪器 MODIS 选择同样的时间地点进行模拟对比,两者偏振辐射特性具有一致性;对 MERSI 偏振敏

感性随观测几何和环境条件的变化进行分析,得出偏振辐射随不同条件的变化规律,后续可将其设计为查找表并用于实际的辐射校正。未来工作可以对偏振辐射特性模型进行更精确地模拟,模拟过程中考虑海表泡沫反射率和离水辐射率的模拟和偏振分量的模拟等因素,从而提高反演精度以实现精细化辐射定标。

参 考 文 献

- [1] Yan L, Chen W, Xiang Y. Polarization remote sensing physics[M]. Beijing: Science Press, 2014. 晏磊, 陈伟, 相云. 偏振遥感物理[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [2] Yin D K. Multi-angle polarization detection technology[J]. Infrared, 2019, 40(1): 1-6, 23. 殷德奎. 多角度偏振探测技术[J]. 红外, 2019, 40(1): 1-6, 23.
- [3] Li Z Y, Liu Z H, Zou P, et al. Prelaunch calibration and ground verification test of spaceborne particulate observing scanning polarimeter [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(3): 0312002. 李朕阳, 刘振海, 邹鹏, 等. 星载偏振扫描仪发射前定标及地面验证实验[J]. 光学学报, 2021, 41(3): 0312002.
- [4] Meister G, Kwiatkowska E J, Franz B A, et al. Moderate-resolution imaging spectroradiometer ocean color polarization correction [J]. Applied Optics, 2005, 44(26): 5524-5535.
- [5] Meister G, Franz B A, Kwiatkowska E J, et al. Corrections to the calibration of MODIS aqua ocean color bands derived from SeaWiFS data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(1): 310-319.
- [6] Kwiatkowska E J, Franz B A, Meister G, et al. Cross calibration of ocean-color bands from moderate resolution imaging spectroradiometer on Terra platform[J]. Applied Optics, 2008, 47(36): 6796-6810.
- [7] Hu X Q, Sun L, Liu J J, et al. Calibration for the solar reflective bands of medium resolution spectral imager onboard FY-3A [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2013, 3(4): 71-83. 胡秀清, 孙凌, 刘京晶, 等. 风云三号 A 星中分辨率光谱成像仪反射太阳波段辐射定标[J]. 气象科技进步, 2013, 3(4): 71-83.
- [8] Sun W, Lukashin C. Modeling polarized solar radiation from the ocean-atmosphere system for CLARREO inter-calibration applications [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 13(20):

- 10303-10324.
- [9] Moyer D, McIntire J, Young J B, et al. JPSS-1VIIRS prelaunch polarization testing and performance[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(5): 2463-2476.
- [10] Angal A, Geng X, Xiong X X, et al. On-orbit calibration of Terra MODIS VIS bands using polarization-corrected desert observations[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(8): 5428-5439.
- [11] Lukashin C, Jin Z H, Kopp G, et al. CLARREO reflected solar spectrometer: restrictions for instrument sensitivity to polarization[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(12): 6703-6709.
- [12] Kulkarny V, Hauss B, Jackson J, et al. The impact of VIIRS polarization sensitivity on ocean color[C]//2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 25-30, 2010, Honolulu, HI, USA. New York: IEEE Press, 2010: 220-223.
- [13] He X Q, Pan D L, Bai Y, et al. Effect of aerosol scattering on polarization correction of ocean color remote sensing[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2009, 4(2): 88-98.
何贤强, 潘德炉, 白雁, 等. 气溶胶散射对海洋水色遥感辐射偏振校正的影响[J]. *大气与环境光学学报*, 2009, 4(2): 88-98.
- [14] Wang H B. Research on in-orbit spectral calibration and polarization correction technology of visible/near-infrared pushbroom imaging spectrometer[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, 2016.
- 王宏博. 推扫式可见光/近红外成像光谱仪的在轨光谱定标与偏振校正技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2016.
- [15] Liu T Y, Chi T H, Chen W. Effects of polarization calibration on aerosol optical depth retrieval: an ocean case sensitivity analysis[J]. *Science China Earth Sciences*, 2015, 58(6): 939-948.
- [16] He L Q, Duan J, Zhang S, et al. Simulation of polarization transmission characteristics of laser in sea fog environment[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(3): 0329001.
赫立群, 段锦, 张肃, 等. 激光在海雾环境中偏振传输特性仿真研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(3): 0329001.
- [17] Mao Q J, Jin S S, Zhang H X. Aerosol optical properties of typical areas of the world based on CALIPSO satellite remote sensing data[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(24): 2428002.
毛前军, 金穗穗, 张恒星. 基于 CALIPSO 卫星遥感数据的全球典型区域气溶胶光学特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(24): 2428002.
- [18] 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.
- [19] Toubbe B, Bailleul T, Deuze J L, et al. In-flight calibration of the POLDER polarized channels using the sun's glitter[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(1): 513-524.