

基于海表耀斑中红外基准 NPP/VIIRS 反射通道在轨验证

景欣¹, 晏磊¹, 胡秀清^{2*}, 贺丽琴¹, 赵帅阳¹, 胡兴帮¹, 徐寒列², 林沂^{1*}, 马蔼乃¹

(1. 北京大学空间信息集成与 3S 工程应用北京市重点实验室, 北京 100871;

2. 国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 将美国 NPP 卫星可见光红外成像辐射仪 (Visible Infrared Imaging Radiometer, VIIRS) 的中红外通道 (中心波长 3.697 μm) 作为检验基准, 使用菲涅尔反射定理建立中红外和被验证通道的海表反射率关系, 对四个太阳反射通道 (中心波长位于 0.672、0.862、1.238 和 1.602 μm) 进行了基于海水表面耀斑区反射率精度验证并深入分析该方法的不确定度. 结果表明: VIIRS 四个通道的验证不确定度分别为 3.8%、3.9%、4.1% 和 4.1%, 这一方法可实现 VIIRS 部分光学通道的在轨较高精度验证.

关键词: 中红外; 海面耀斑; 可见光红外成像辐射仪 (VIIRS); 定标验证; 菲涅尔定律

中图分类号: TP732 **文献标识码:** A

NPP/VIIRS solar reflectance bands radiation validation based on mid-infrared reference standard on sea surface sun glint sites

JING Xin¹, YAN Lei¹, HU Xiu-Qing^{2*}, HE Li-Qin¹, ZHAO Shuai-Yang¹,
HU Xing-Bang¹, XU Han-Lie², LIN Yi^{1*}, MA Ai-Nai¹

(1. Beijing Key Laboratory of Spatial Information Integration and Its Application, Peking university, Beijing 100871 China;

2. National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081 China)

Abstract: This paper built up the reflectance relationship between MWIR and solar reflectance bands based on Fresnel's law. VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer) mid-infrared band (3.697 μm) has been used as the reference standard to validate the four solar reflectance bands (0.672、0.862、1.238 and 1.602 μm) on sea surface sun glint regions. Finally the uncertainties of this validation model were analyzed. The results show that the uncertainties of the four solar reflectance bands are 3.8%、3.9%、4.1%、4.1%, respectively. Therefore, the model proposed in this paper can be used for optical inter bands cross validation.

Key words: mid-infrared, sun-glint, visible infrared imaging radiometer (VIIRS), calibration/validation, Fresnel Law

PACS: 07.07.Df

引言

卫星传感器入瞳处接收到的中红外波段 (3 ~ 5 μm) 能量包含反射的太阳能量与自身的发射能量. 通常该波段反射的太阳能量很弱, 但在海表太阳

耀斑区等特定情况下, 被中红外通道探测到的反射太阳能量是比较可观的, 且其对大气影响的敏感性较低^[1], 海表耀斑区近似镜面反射, 且不同波长反射率几乎相等. 同时, 对于搭载有星上定标系统的卫星传感器, 中红外波段黑体定标精度较高而且稳定.

收稿日期: 2017-01-25, 修回日期: 2017-09-10

Received date: 2017-01-25, revised date: 2017-09-10

基金项目: 国家自然科学基金 (41371492)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (41371492)

作者简介 (Biography): 景欣 (1985-), 女, 四川绵阳人, 博士, 主要从事卫星传感器定标与验证方面的研究. E-mail: xin.jing@sdstate.edu

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: huxq@cma.gov.cn, yi.lin@pku.edu.cn

因此,本文将中红外波段的海表耀斑区反射率作为用于反射太阳波段反射率验证的基准。

海表耀斑区的特点适合作为卫星传感器验证的验证场景.利用太阳耀斑区对卫星进行在轨定标的研究在国外已开展多年. Kaufman 和 Holben^[2] 在 1993 年使用海洋表面耀斑区 NOAA 气象卫星的高级甚高分辨率辐射计(Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR)遥感影像的可见光波段反射辐射能量来校准近红外波段,作者发现太阳耀斑区波段间海表反射率比值对于海面风速不敏感. Zavody 等^[1] 于 1997 年利用沿轨扫描辐射计-2(Along Track Scanning Radiometer, ATSR)的 3.7 μm 通道在海洋表面耀斑区的等效反射率对 1.6 μm 通道进行了校正,并考虑了 ATSR-2 仪器的偏振特性对校正系数的影响.结果表明此方法计算 1.6 μm 通道海表反射率与实际得到的 1.6 μm 处海表反射率呈极好的线性关系. Hagolle 等^[3] 在 2004 年用 SPOT 上搭载的 VEGETATION 传感器使用耀斑区可见光波段(0.65 μm)海洋表面反射率对可见光和近红外波段(0.45、0.85 和 1.65 μm)进行绝对定标,450 nm 和 850 nm 处的定标不确定度小于 4%,1650 nm 波段不确定度小于 5%. Luderer 等^[4] 在 2005 年利用有辐亮度变化的太阳耀斑区对 MODIS 0.64、0.84、1.6 和 2.1 μm 通道间的大气层顶反射率进行了回归线性斜率和截距的相对辐射检验,文章中使用的耀斑区大气层顶辐亮度强度变化构建通道间回归关系的验证方法是可行的,其不确定度约为 5%.

使用耀斑区进行验证的研究不多,主要分为两大类:一是基于耀斑区不同通道海洋表面反射率比值的定标方法^[1,4,6],二是基于通道间耀斑区大气层顶反射率的斜率和截距的定标方法^[6].两种方法的定标精度约为 4%~5%.本文则将以美国 NPP 卫星可见光红外成像辐射计(Visible Infrared Imaging Radiometer, VIIRS)的中红外通道(中心波长 3.697 μm)海表反射率作为参考基准,使用菲涅尔反射定理建立中红外和被验证通道的反射率关系,得到四个被验证通道(中心波长位于 0.672、0.862、1.238 和 1.602 μm)海表理论反射率,进而得到被验证通道海表反射率的偏差,详细评价验证方法的不确定度,分析基于耀斑区验证模型精度的影响因素。

1 研究数据与样本区选择

1.1 研究数据

本文使用的 VIIRS 传感器是搭载在 Suomi 国家极轨联合卫星(Suomi National Polar-Orbiting Partnership, Suomi NPP)上的多波段传感器,其上共有 22 个光谱通道(0.412~12.01 μm),包括 16 个中分辨率通道(M 通道,空间分辨率 750 m),5 个成像分辨率通道(I 通道,空间分辨率 375 m)和一个全色昼夜通道(DNB 通道,空间分辨率 750 m).M 通道包括 11 个位于可见光-近红外区间的光学通道和 5 个热发射通道^[5-6].表 1 列出了本文使用到的 VIIRS 通道的编号及中心波长,以及相关通道的设计定标精度指标^[7].

表 1 本文使用的 VIIRS 通道编号及中心波长
Table 1 Channel numbers and center wavelengths of VIIRS channels used in this work

通道	中心波长/ μm	定标精度指标	通道	中心波长/ μm	定标精度指标
M5	0.672	2%@L	M10	1.602	2%@L
M7	0.862	2%@L	M12	3.697	0.7@T
M8	1.238	2%@L	M13	4.067	0.7@T

1.2 样本区选择原则

选择南印度洋深海区域的海表耀斑区作为光学通道在轨验证的验证场景.南印度洋海域为远洋深海区,热带海洋性气候.南印度洋夏季平均风速全年最小^[8],该区域气溶胶含量较低并且主要成分为颗粒尺寸较大的海盐^[9-10],大气洁净无污染.为了满足验证的需求,在南印度洋选择的样本区条件如下:

- 1) 选择的时间段尽量集中,减少由于传感器辐射响应改变对结果的影响;
- 2) 样本区域位于深海远洋,避开海岸线以及海洋生物物质的影响;
- 3) 选择样本区要求无云;
- 4) 所选样本尽量位于耀斑区中心,确保卫星信号贡献绝大部分来自海表耀斑区的反射,减少大气程辐射带来的不确定度的影响;
- 5) 区域包含有多个条带,并对沿轨方向平均,减小条带噪声的影响。

因此每个样本区最终参与计算的数据为每个样本沿轨方向平均后的一行像元.本文样本区为手动提取,集中选择 2012 年 12 月~2016 年 1 月四个时间段的南印度洋(夏季)作为研究样本区域,共 367 样本.卫星过境时间为协调世界时(Coordinated Universal Time, UTC)早上 10 点前后,地方时约是午后 1~2 点.表 2 是采集的南印度洋夏季样本区的时间段与对应坐标信息。

表 2 采集南印度洋夏季样本区的时间段与对应几何信息
Table 2 Acquisition periods and correspondent geometric information of all samples

时间段	样本数	中心经度/(°)	中心纬度/(°)
2012.12~2013.01	99	68.52	-24.04
2013.12~2014.01	62	79.53	-23.66
2014.12~2015.01	85	79.14	-20.48
2015.12~2016.01	121	75.08	-26.19

2 基于海表耀斑区的 VIIRS 光学通道在轨验证模型

在上述研究数据和样本区提取的基础上,本部分主要构建基于海表耀斑区的光学通道反射率验证模型.模型构建首先计算 VIIRS 的 M12 中红外通道的海表耀斑区反射率,将其作为验证基准,分析其精度;然后分析可见光-近红外通道在海表耀斑区的反射物理模型,从而获得通道的海表耀斑区的实际反射率;随后借助菲涅尔反射定理,建立中红外通道与可见光-近红外通道在海表耀斑区反射率比值关系;在此基础上将 M12 通道的海表耀斑区反射率作为验证基准,对 VIIRS 的四个可见光-近红外通道进行通道间的验证,最后评价 VIIRS 通道反射率的偏差.

2.1 基准通道海面耀斑反射率计算

由于是以 VIIRS 的 M12 中红外通道的海表耀斑区反射率作为验证基准,因此需要较高精度的中红外反射率计算结果.本文采用景欣等^[11]提出的适用于 VIIRS 中红外通道的非线性劈窗算法计算海表的反射率.方法借助另一中心波长位于 4.0 μm 的中红外波段(M13 通道),假设两个中红外通道(3.7 μm 和 4.0 μm)去除太阳直射辐射项的海表亮温相等,在此基础上,使用 UCSB 发射率数据库中红外发射率与 VIIRS 海面温度(Sea Surface Temperature, SST)产品得到 367 个样本区的两个中红外通道的反射率初值之间的线性回归关系.基于这个假设和反射率的线性关系,对两个中红外通道的海面亮温进行非线性劈窗计算,得到 3.7 μm(M12 通道)通道无太阳辐射的海表亮温,即可计算出海表反射率.该方法的理论推导可参考文献 Tang 等^[12]和景欣等^[11].计算结果如表 3 所示,样本区的反射率均在变化范围为 26.8%~29.2%,四年均值为 27.3%±4.00%.

表 3 VIIRS M12 通道所有样本区海表反射率均值统计结果
Table 3 Statistic results of M12 sea surface average reflectance of all samples

	2012.12~2013.01	2013.12~2014.01	2014.12~2015.01	2015.12~2016.01
M12	27.0%±3.75%	29.2%±3.15%	27.4%±4.58%	26.8%±4.21%

进而对其计算结果的精度进行评价.使用 UCSB 提供的发射率库和 MODIS 的海面温度产品直接计算 M12 通道的海面反射率进行验证.表 4 是统计的每个样本区 M12 通道反射率在四个时间段的差值,四年的平均反射率计算误差为 0.31%±0.41%,精度足够作为波段间验证的基准通道.

表 4 所有样本区光学通道计算反射率和反射率初值之间的差值统计

Table 4 Reflectance difference between calculated and initial reflectance of optical channels

	2012.12~2013.01	2013.12~2014.01	2014.12~2015.01	2015.12~2016.01
M12/(%)	-0.14±0.36	0.49±0.42	0.44±0.54	0.45±0.56

2.2 海表耀斑区 VIIRS 光学通道反射物理模型

计算 VIIRS M5、M7、M8 和 M10 四个光学通道在海表耀斑区反射率.传感器光学通道接收到的能量来源分为五个部分:

$$R_i^{toa} = R_i^u + R_i^{wc} \rho_i^{wc} \tau_i^{sat} \tau_i^{sun} + R_i^d \tau_i^{sat} \rho_i^d + E_i \cos(\theta_{sun}) \rho_i^s \tau_i^{sun} \tau_i^{sat} + R_i^{water} \tau_i^{sat} \quad (1)$$

式中, R_i^{toa} 是可见光-近红外波谱区间通道 i 的大气层顶入瞳处的辐亮度值. R_i^u 是传感器接收到的大气气溶胶或者分子的单次或多次散射能量, $R_i^d \rho_i^d \tau_i^{sat}$ 是大气向下的散射辐射 R_i^d 经海表反射后再经过海面-传感器方向的透射到达传感器的能量部分; ρ_i^d 是通道 i 的大气向下的散射辐射在海表的反射率^[13]; $R_i^{wc} \rho_i^{wc} \tau_i^{sat} \tau_i^{sun}$ 是传感器接收到的海洋表面白帽反射并经过海面-传感器方向透射到达传感器的能量, R_i^{wc} 是通道的海表的白帽反射能量, ρ_i^{wc} 是通道 i 的海表白帽反射率; $E_i \cos(\theta_{sun}) \rho_i^s \tau_i^{sun} \tau_i^{sat}$ 是太阳能经大气透射到达海表,反射能量的角度与其入射的角度近似于镜面反射,再经大气透射到达传感器的部分,即太阳耀斑反射能量, ρ_i^s 即耀斑反射率; $R_i^{water} \tau_i^{sat}$ 是海水的离水辐射经过海面-传感器方向透射到达传感器的能量, R_i^{water} 是海水离水辐射能量.

海面风速大于 7 m/s 时通常才会出现白帽现象^[14],对于本文选择的区域在四个时间段的风速为(4.29±1.34)m/s,因此认为白帽现象可以忽略.对于离水辐射项 $R_i^{water} \tau_i^{sat}$,实测与理论模拟计算表明, $\lambda > 750 \text{ nm}$, $R_i^{water} \tau_i^{sat} \approx 0$ ^[17-18],因此认为对 M7、M8、M10 和 M12 通道没有影响;文献^[19]的实测结果显示在 670 nm(VIIRS M5 通道)处远洋海表非耀斑区的离水辐射项 $R_i^{water} \tau_i^{sat}$ 占传感器接收到的总能量约 2.2%,

采集十个非耀斑区无云区域的 M5 通道大气层顶辐亮度,取均值为 $13.1 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2/\text{sr}/\mu\text{m}$,则其中离水辐射能量大小约为 $0.29 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2/\text{sr}/\mu\text{m}$. 本文使用 ECMWF 提供的大气柱水汽总量,MODIS 的 MOD08_D3 数据产品获得南印度洋每个样本区气溶胶光学厚度的均值,使用 Modtran 4 对 VIIRS 的四个被验证通道的海表反射率进行大气辐射传输的计算. 表 5 是 367 个样本区的 VIIRS M5、M7、M8、M10 通道所有样本区海表反射率计算值及标准差统计结果. 需要说明的是,本文的验证是基于每个样本,而非所有样本的均值,此处的统计值仅是计算结果的展示.

表 5 VIIRS M5、M7、M8、M10 通道耀斑区海表计算反射率及标准差统计结果

Table 5 Statistic results of calculated sea surface reflectance of M5, M7, M8 and M10 channels

反射率/(%)	M5	M7	M8	M10
2012.12~2013.01	21.8±3.14	22.7±3.47	21.0±3.15	19.9±2.96
2013.12~2014.01	23.6±2.71	24.5±2.88	22.8±2.51	21.5±2.29
2014.12~2015.01	22.7±3.64	22.9±3.86	21.2±3.50	20.1±3.26
2015.12~2016.01	21.2±3.51	22.2±3.93	20.6±3.53	19.5±3.26
四年平均	22.0±3.40	22.9±3.70	21.3±3.33	20.1±3.10

2.3 海表耀斑区菲涅尔反射率

本节使用菲涅尔反射定理建立中红外通道与被验证通道在海表耀斑区的关系. 自然光在任意两种介质的分界面发生反射和折射时,反射光、透射光与入射光传播方向之间的关系可以用菲涅尔定理描述. 对于平静且无大气存在的海面,通道的理论反射率满足菲涅尔反射定理:

$$\rho_{i,j}^F = \frac{1}{2}(\rho_{i,j}^V + \rho_{i,j}^H) \quad , \quad (2)$$

式中, $\rho_{i,j}^F$ 是通道样本的海面菲涅尔反射率, $\rho_{i,j}^V$ 和 $\rho_{i,j}^H$ 分别表示通道 i 样本 j 入射光垂直分量和平行分量的反射率,只与通道海水折射率以及样本 j 的太阳天顶角相关. 对于粗糙海面,最为常见的海表反射率模型是 Cox-Munk 模型^[20],通道 i 样本 j 的粗糙海面反射率为:

$$\rho_{i,j}^{\text{cox_munk}} = \rho_{i,j}^F \times \Gamma_j \quad , \quad (3)$$

式中, $\rho_{i,j}^{\text{cox_munk}}$ 是通道 i 样本 j 的 Cox-Munk 模型的海面反射率, Γ_j 是样本 j 权重,与样本 j 入射方向方位角、反射方向天顶角、反射方向方位角以及风速和风向有关,与波长无关. 因此, M12 通道与四个被验证通道海表反射率的关联关系为^[21]:

$$R_{ri,j} = \frac{\rho_{i,j}^F}{\rho_{12,j}^F} \quad , \quad (4)$$

式中, $R_{ri,j}$ 是被验证通道 i 与 M12 通道在样本 j 真实海表菲涅尔反射率的比值. 根据文献[22]可知 M5、M7、M8、M10、M12 通道的海水复折射率如表 6:

表 6 不同通道海水的复折射率
Table 6 Complex refractive index

通道	实部	虚部
M5	1.331	2.23e-8
M7	1.328	3.53e-7
M8	1.323	1.10e-5
M10	1.317	8.55e-5
M12	1.374	3.00e-3

2.4 基于海表耀斑区的 VIIRS 光学通道在轨验证模型

2.1 节计算得到了 M12 通道的海表反射率,2.2 节计算了四个被验证通道的海表反射率值,并且通过 2.3 节菲涅尔反射率的比值将 M12 通道和四个被验证通道海表反射率关联了起来,为构建基于海表耀斑区的 VIIRS 光学通道在轨验证模型提供了理论基础和验证基准. 本节按照以下步骤建立基于海表耀斑区的 VIIRS 光学通道在轨验证模型:

1) 计算样本 j 验证基准 M12 通道的海表反射率 $\rho_{12,j}^S$ 与样本 j 四个被检验通道每个像元的海表反射率 $\rho_{i,j}^S$,即下文提到的计算得到反射率;

2) 计算样本 j M12 通道与四个被验证通道每个像元海面耀斑区菲涅尔反射率,进而计算样本 j 四个被验证通道与 M12 通道实际大气状况下每个样本区每个像元海面耀斑区菲涅尔反射率比值 $R_{ri,j}$;

3) 计算样本 j M5、M7、M8、M10 通道海表耀斑区像元的理论反射率值:

$$\rho_{i,j}^t = R_{ri,j} \times \rho_{12,j}^S \quad , \quad (5)$$

式中, $\rho_{i,j}^t$ 是通道 i 样本 j 海面理论反射率值;

4) 计算 VIIRS 光学通道的海表反射率相对误差,以评价通道的在轨辐射性能:

$$RE_{i,j} = \text{mean} \left(\left(\frac{\rho_{i,j}^S}{\rho_{i,j}^t} - 1 \right) \times 100\% \right) \quad , \quad (6)$$

式中, $RE_{i,j}$ 是不同被验证通道的海面反射率相对误差,mean 是对样本 j 的所有像元的差值求平均,得到样本 j 的反射率误差. 表 8 是四个通道每一个样本区的海面反射率相对误差的标准差均值,即求出每一个样本四个通道海面反射率相对误差的标准差后,再对所有 367 个样本反射率相对误差标准差求均值,用以评价由于对每个样本所有像元反射率相对误差求平均导致最终结果的不确定度.

表 7 VIIRS M5、M7、M8、M10 通道所有样本区海表反射率相对误差的标准差

Table 7 Standard deviation of average sea surface reflectance relative difference of each sample

通道	标准差/%
M5	0.6
M7	0.5
M8	0.4
M10	0.5

图 1 是四个被检验通道每个样本区的海表计算反射率和理论反射率关系的散点图,图中每个通道的数据点个数为 367. 实线与虚线的偏离程度表现了海表实际反射率和理论反射率的绝对差值. 由图 1 看出每个样本四个通道的海表反射率值足够高,可以减少气溶胶和分子散射的影响;在反射率较高的区域,计算得到的反射率高于理论反射率;各通道拟合相关系数均大于 0.87.

统计所有样本区的四个被验证通道的反射率相对误差均值,表 8 和图 2 是统计结果和误差线. 表 8 中误差均值是使用公式(10)计算得到海表耀斑区的理论反射率与实际反射率的相对误差在每个时间段的均值,整体相对误差是指该通道在 2012 年 12 月~2016 年 01 月期间的所有样本区相对误差的均值.

图 2 显示了 M5、M7、M8、M10 通道在四个时间段的海表反射率偏差的均值和标准差. 可以看出四个被验证通道在四个时间段内反射率偏差的离散程

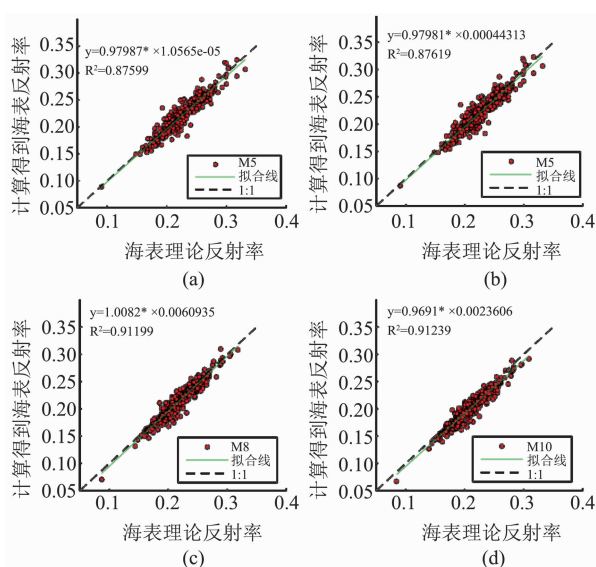


图 1 每个样本区四个被验证通道的海表计算反射率和理论反射率的关系,每个通道的数据点个数为 367

Fig. 1 The relationship between calculated and theoretical sea surface reflectance of four validated channels, each channel contains 367 samples

表 8 所有样本区的 M5、M7、M8、M10 通道的反射率相对误差均值统计

Table 8 Reflectance relative difference between calculated and theoretical sea surface reflectance of four channels in different time periods

通道	时间段	相对误差均值/(%)	相对误差标准差/(%)	整体相对误差/(%)
M5	2012.12~2013.01	-0.98	4.29	-1.88 ± 5.10
	2013.12~2014.01	-2.02	5.43	
	2014.12~2015.01	-1.30	5.43	
	2015.12~2016.01	-3.23	5.10	
M7	2012.12~2013.01	3.13	4.90	1.99 ± 5.47
	2013.12~2014.01	2.22	5.68	
	2014.12~2015.01	1.87	5.03	
	2015.12~2016.01	1.09	5.91	
M8	2012.12~2013.01	-1.23	4.24	-2.09 ± 4.48
	2013.12~2014.01	-2.01	4.57	
	2014.12~2015.01	-2.32	4.09	
	2015.12~2016.01	-2.62	4.78	
M10	2012.12~2013.01	-3.21	4.19	-4.27 ± 4.28
	2013.12~2014.01	-4.32	4.44	
	2014.12~2015.01	-4.50	3.84	
	2015.12~2016.01	-4.87	4.44	

度是近似的,约为 5%,说明即使由于各通道对于计算过程中的影响参数的敏感性不同,本验证模型对于四个通道的精密度是近似的,本模型的可重复性也是较好的.

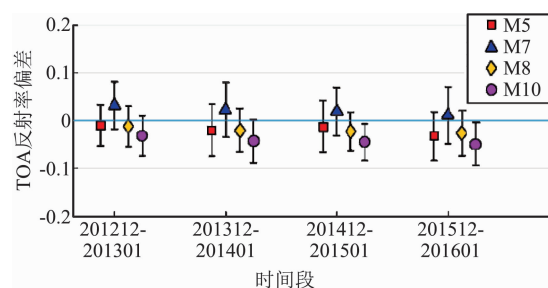


图 2 M5、M7、M8、M10 通道在四个时间段的反射率偏差误差线

Fig. 2 Reflectance error lines of four optical channels in different time periods

3 验证不确定度分析

建立的基于海表耀斑区光学通道的验证模型以中红外 M12 通道的海水表面反射率为检验基准,基于海水表面耀斑区进行的光学通道间验证,最终计算得到各通道的反射率偏差.

假设各种误差因素相互独立,以每一个误差源的平均值作为测量真值,经过辐射传输计算得到的验证结果作为验证的真值.然后以每个误差源的误差范围作为新的输入进行辐射传输计算得到新的验

证结果. 计算新的验证结果和验证结果真值之间的绝对差与验证真值的百分比, 作为这个误差源产生的不确定度, 将每一个误差源得到的不确定度的平方和根作为辐射验证的总不确定度. 对于通道反射率偏差计算过程主要考虑以下影响因素对验证结果产生影响:

(1) MODTRAN 模型误差: 辐射传输模型 MODTRAN4 对验证的结果影响不大于 1%^[23].

(2) 基准误差: 根据 2.1 节的计算可得到 M12 基准通道海表反射率计算的相对误差, 将其引入到可见光-近红外通道验证的计算中计算光学通道的海面反射率相对误差, 结果如表 9 所示.

(3) 偏振敏感性: 太阳耀斑是偏振性很强的目标, 因此为了完全理解验证的结果, 仪器偏振敏感性的影响也要考虑在内. 对于 VIIRS 传感器来说, 偏振敏感性是存在的, 有文献显示 VIIRS 传感器的所有波长 < 1 000 nm 的通道均有约 3% 的偏振敏感性^[24].

(4) 水汽观测误差: 水汽含量使用 ECMWF 提供的大气柱水汽总量, 认为其测量误差为实测值的 $\pm 20\%$.

(5) 气溶胶光学厚度观测误差: 文献[25]指出 MOD08_D3 气溶胶光学厚度在海洋区域测量误差不到 10%, 本文认为其误差为 10%.

(6) 海面折射率对结果的影响: 海面折射率影响了海面菲涅尔反射率的计算, 会随着海水温度和盐度在可见光-近红外通道有轻微变动. 文献[26]给出了变化模型, 并得到 200 ~ 1 100 nm 通道范围的折射率的不确定度为 0.1%, 大于 1 100 nm 则不确定度为 0.3%.

(7) 对每个样本所有像元反射率相对误差求平均对结果的影响: 将每个样本所有像元反射率相对误差的标准差带入验证模型, 可以评价由于对样本区反射率相对误差求平均对结果的影响.

(8) 总不确定度: 表 9 中列出验证模型总不确定度. 从结果来看, 四个被验证通道的不确定度相差不大, 分别为 3.8%、3.9%、4.1% 和 4.1%, 但是不同的通道影响因素的构成和所占比例各有不同: 对于 M5 和 M7 通道, 主要的不确定度贡献项是基准误差, 均达到约 3.5%, 气溶胶的观测误差对总不确定度的贡献也有 1%; 对于 M8 和 M10 通道, 最大的不确定度贡献项是基准的误差, 均达到约 3.4%, 气溶胶观测误差接近 1%; 海面折射率的误差对总不确定度的贡献达到 1.9%.

表 9 基于海水表面的可见光—近红外通道验证模型不确定度分析

Table 9 Error budget of validation model

不确定度贡献项	不确定度/(%)			
	M5	M7	M8	M10
MODTRAN 模型误差	1.00	1.00	1.00	1.00
参考基准误差	3.40	3.59	3.41	3.43
偏振敏感性/(3% @ M5/M7)	0.74	0.79	-	-
水汽观测误差/(20%)	0.02	0.06	0.17	0.04
气溶胶观测误差/(10%)	1.12	0.94	0.68	0.59
海面折射率误差/(0.1% @ M5/M7; 0.3% @ M8/M10)	0.63	0.67	1.92	1.90
样本像元反射率相对误差均值计算	0.03	0.02	0.02	0.02
总不确定度	3.8	3.9	4.1	4.1

表 9 对基于海表耀斑区的 VIIRS 光学通道验证模型的使用提供的参考: 基准通道的精度对四个通道的总不确定度都非常敏感, 导致约 3.5% 的不确定度贡献; 对于 < 1 000 nm 的波段, 偏振敏感性是需要考虑的影响因素, 气溶胶的观测精度也需要尽可能提高; 对于 > 1 000 nm 的近红外波段区间, 海面折射率的误差影响较大, 达到约 2%, 气溶胶光学厚度有一定影响, 需要精确测量.

4 结论

使用海表耀斑区作为验证场景进行验证是一种波段间的验证方法, 本方法使用海表的太阳镜面反射将验证基准从参考通道传递到其他被验证通道. 除了需要一个精确标定过的参考通道作为前提, 这种验证方法最大的优势在于不需要耗费大量的人力物力在卫星过境时测量配套参数和地面光谱就能达到较高的精度, 且验证频率高, 可实现全年持续的验证; 同时, 由于验证模型中的参考基准通道与被验证通道数据是同步获取, 因此也适用于历史数据的验证.

本文以 VIIRS M12 通道的海面反射率为参考基准, 使用菲涅尔反射定理建立 M12 中红外通道与光学通道的反射率关系, 在耀斑区构建了基于海水表面反射率偏差的光学通道的验证模型. 验证结果发现 M5、M7、M8、M10 四个被验证通道在四个时间段内的耀斑区反射率偏差波动范围分别为 -1.19% ~ -3.45%、1.09% ~ 3.13%、-1.23% ~ -2.62% 和 -3.21% ~ -4.87%, 反射率整体偏差分别为 -2.23%、1.99%、-2.09% 和 -4.28%.

在此基础上评价验证模型的不确定度. 根据验证的流程, 考虑影响验证结果的因素包括 MODTRAN 软件误差、验证基准误差、仪器偏振敏感性误

差、水汽观测误差、气溶胶观测误差、海面折射率误差以及验证场景不均一性的影响,通过详细分析得到四个通道总不确定度分别为 3.8%、3.9%、4.1% 和 4.1%。虽然四个通道的不确定度在一个量级,均约 4%,但是每个通道不确定度的主要构成因素各不相同:验证基准的误差对四个通道不确定度影响 ~3.5%,而气溶胶观测误差对 M5 和 M7 通道的影响高于 M8 和 M10 通道,海面折射率的误差对 M8 和 M10 通道的影响则高于 M5 和 M7 通道。

本文建立了以中红外通道(3~5 μm)海表反射率为参考基准、以海洋耀斑区为验证场景的波段间在轨验证模型,为卫星传感器在轨辐射性能验证提供新途径,为提高航天载荷定量化水平提供有效验证手段;同时,分离中红外波段的反射和发射能量并以此为基础,连接可见光近红外-中红外-热红外波段间的关联关系,增加遥感数据信息,为新型载荷的通道设置提供思路,为其研制提供精度判别的依据。

References

- [1] Zavody A M, Watts P D, Smith D L, *et al.* A novel method for calibrating the ATSR-2 1.6 μm channel using simultaneous measurements made in the 3.7 μm channel in sun glint [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1998, **15**(6): 1243–1252.
- [2] Kaufman Y J, Holben B N. Calibration of the AVHRR visible and near-IR bands by atmospheric scattering, ocean glint and desert reflection [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, **14**(1): 21–52.
- [3] Hagolle O, Nicolas J M, Fournier B, *et al.* Absolute calibration of VEGETATION derived from an interband method based on the sun glint over ocean [J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2004, **42**(7): 1472–1481.
- [4] Luderer G, Coakley J A, Tahnk W R. Using sun glint to check the relative calibration of reflected spectral radiances [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2005, **22**(10): 1480–1493.
- [5] Cao C, Xiong J, DeLuccia F, *et al.* Visible/infrared imager radiometer suite (VIIRS) sensor data record (SDR) [J]. *User's Guide, version*, 2011, 1.
- [6] Jing X, Shao X, Cao C, *et al.* Comparison between the Suomi-NPP day-night band and DMSP-OLS for correlating socio-economic variables at the provincial level in China [J]. *Remote Sensing*, 2015, **8**(1): doi: 10.3390/rs8010017.
- [7] Oudrari H, McIntire J, Xiong X, *et al.* Pre-launch radiometric characterization and calibration of the S-NPP VIIRS sensor [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, **53**(4): 2195–2210.
- [8] Liang Y Q, Liu J F, Zhang X, *et al.* Spatial and temporal characteristics analysis of wind field in southern Indian Ocean [J]. *Marine Forecasts* (梁玉清, 刘金芳, 张弦, 等. 南印度洋风场时空特征分析. *海洋预报*), 2003, **20**(1): 25–31.
- [9] Ramanathan V, Crutzen P J, Lelieveld J, *et al.* Indian ocean experiment: An integrated analysis of the climate forcing and effects of the great Indo-Asian haze [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, **106**(D22): 28371–28398.
- [10] Coakley J A, Tahnk W R, Jayaraman A, *et al.* Aerosol optical depths and direct radiative forcing for INDOEX derived from AVHRR: Theory [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, **107**(D19): 10.
- [11] Jing X, Hu X, Zhao S, *et al.* The sunglint area reflectance calculation of VIIRS middle infrared channel in South Indian Ocean based on the improved nonlinear split window model [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (景欣, 胡秀清, 赵帅阳, 等. 基于改进非线性劈窗算法的 VIIRS 中红外海面耀斑区反射率计算. *光谱学与光谱分析*), 2017, **37**(2): 394–402.
- [12] Tang B, Li Z L. Retrieval of land surface bidirectional reflectivity in the mid-infrared from MODIS channels 22 and 23 [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, **29**(17): 4907–4925.
- [13] Philpot W. Estimating atmospheric transmission and surface reflectance from a glint-contaminated spectral image [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, **45**(2): 448–457.
- [14] Koepke P. Effective reflectance of oceanic whitecaps [J]. *Applied Optics*, 1984, **23**(11): 1816–1824.
- [15] Xu X R. *Physics of remote sensing* [M]. Peking University Press (徐希孺. 遥感物理. 北京: 北京大学出版社), 2005.
- [16] Zhao W, Chen G, Niu S. Studying the calibration of China's ocean color sensors using Rayleigh scattering [J]. *Acta Oceanologica Sinica (in Chinese)* (赵巍, 陈光明, 牛生丽. 中国海洋水色遥感器瑞利散射定标研究. *海洋学报*), 2013, **35**(2): 52–58.
- [17] Kay S, Hedley J D, 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.
- [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 (1917-1983)*, 1954, **44**(11): 838–850.
- [19] Zhang H, Wang M. Evaluation of sun glint models using MODIS measurements [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2010, **111**(3): 492–506.
- [20] Hale G M, Querry M R. Optical constants of water in the 200-nm to 200 μm wavelength region [J]. *Applied Optics*, 1973, **12**(3): 555–563.
- [21] Thome K J. Absolute radiometric calibration of Landsat 7 ETM+ using the reflectance-based method [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, **78**(1): 27–38.
- [22] Cao C, Xiong J, Blonski S, *et al.* Suomi NPP VIIRS sensor data record verification, validation, and long-term performance monitoring [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2013, **118**(20): 11.
- [23] Remer L A, Kaufman Y J, Tanré D, *et al.* The MODIS aerosol algorithm, products, and validation [J]. *Journal of the atmospheric sciences*, 2005, **62**(4): 947–973.
- [24] Huibers P D T. Models for the wavelength dependence of the index of refraction of water [J]. *Applied Optics*, 1997, **36**(16): 3785–3787.