

基于深对流云的夜间微光传感器定标技术

马 烁, 黄云仙*, 严 卫, 艾未华, 赵现斌

(解放军理工大学气象海洋学院, 江苏 南京 211101)

摘要: NPP(National Polar-orbiting Partnership)卫星于 2011 年 10 月 28 日发射升空,其上搭载的 VIIRS(Visible Infrared Imaging Radiometer Suite)传感器包含 DNB(Day Night Band)波段,该波段采用三增益设置,可在白天、晨昏甚至夜间实现地球观测.其中,在夜间月光条件下,主要采用高增益,定标实现较为困难.以此为目的,首次提出了基于深对流云的夜间微光传感器替代定标方法.将月亮辐射模型引入到 SCIATRAN 中,实现了全天候的辐射传输计算,并利用该改进的辐射传输模式,通过确定深对流云光学属性、地表特性及大气廓线等的参考值,对接收大气层顶反射辐射进行敏感性试验,分析得到主要影响因子为云光学厚度 COT(Cloud Optical Thickness)与有效粒子半径 Re(Effective Radius),且利用固定参考值得到最大模拟误差小于 5%.为了检验该替代方法的可行性,通过改进的辐射传输模式,对 2012 年 08 月~2013 年 01 月共 6 个月夜间 DNB 数据所确定的深对流云替代目标像素进行辐射传输模拟,结果表明基于深对流云的替代定标方法效果较好,基于日变化的辐射不确定度在 $\pm 10\%$ 之内,可实现对 DNB 夜间高增益阶段的直接辐射定标.

关键词: 辐射定标;NPP;深对流云;辐射传输模式

中图分类号: P414.4 **文献标识码:** A

Calibration of low-level light sensor using deep convective clouds

MA Shuo, HUANG Yun-Xian*, YAN Wei, AI Wei-Hua, ZHAO Xian-Bin

(College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

Abstract: The National Polar-orbiting Partnership (NPP) satellite was successfully launched in 28 October 2011. The day night band (DNB) is mounted on the Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) on board the NPP to greatly improve the night time imaging capabilities. In order to cover this wide dynamic radiation range, the three gain stages are employed to view the earth at daytime, twilight and even nighttime. Especially, the radiance measured at night is relatively low, so the radiance calibration is too difficult to realize. In order to realize radiance calibration at night, the vicarious calibration method of Low-level light detection at night using the deep convection clouds is presented. The lunar irradiance model was introduced to enhance the SCIATRAN to realize the radiance transfer simulation at all time. Then, the reference values of the surface albedo, atmospheric profiles and optical properties of deep convection clouds were inputted to the enhanced model to study the sensitivity of the TOA radiance. The simulation results show that the main factors are the Cloud Optical Thickness (COT) and Effective Radius(Re) and the maximum reflectance errors are no more than 5%. In order to examine the feasibility of the calibration method, the 6 months NPP data range from August 2012 to January 2013 was used. The simulated albedos were calculated using the enhanced radiative transfer model and compared with the observed albedos. The result shows that the radiance uncertainties on a daily basis are in the range of $\pm 10\%$, which means that the calibration method using Deep convection clouds is very well to calibrate the DNB high gain stage directly.

Key words: radiance calibration, NPP, deep convection clouds, radiative transfer model

PACS: 07.07. Df, 42.68. Ge, 95.75. Rs, 95.75. Wx

引言

JPSS(The Joint Polar Satellite System)是 2010 年

5 月美国国会终止军民共同发展计划 NPOESS(National Polar-orbiting Operational Environment Satellite System)之后,美国 NOAA(National Oceanic and At-

收稿日期:2014-07-14,修回日期:2015-01-15

Received date: 2014-07-14, revised date: 2015-01-15

基金项目:国家自然科学基金(41375029、41575028)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(41375029、41575028)

作者简介(Biography):马 烁(1989-),男,安徽利辛人,博士研究生,主要从事大气与海洋遥感研究. E-mail:mashuo0601@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail:13813891802@163.com

mospheric Administration)的新一代极轨气象卫星系列^[1]. NPP(National Polar-orbiting Partnership)是检验 NPOESS 前期研究成果,由 NOAA 卫星向 JPSS 过渡的演示验证试验卫星,于 2011 年 10 月发射升空^[2]. 该卫星上携带的可见光红外扫描成像辐射计组 VIIRS(Visible Infrared Imaging Radiometer Suite)共包含 $0.4\mu\text{m} \sim 12\mu\text{m}$ 范围内的 22 个波段,刈幅宽度为 3 000 km,是目前世界上综合探测能力最强的扫描成像辐射计^[3]. 其中,DNB(Day Night Band)可在白天、夜间以及晨昏时段获取影像,是该探测器的特色之一. DNB 光谱波段为可见光近红外波段($0.5 \sim 0.9\mu\text{m}$),辐射动态范围为 $3.0\text{E}-9\text{Wcm}^{-1}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1} \sim 2.0\text{E}-2\text{Wcm}^{-1}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$,跨度达七个数量级^[2]. 为了满足如此大的动态范围,DNB 采用了三种不同的焦平面设计,实现了三种不同的增益—高增益 HGS(High Gain Stage)、中间增益 MGS(Median Gain Stage)及低增益 LGS(Low Gain Stage). 在不同的时间段内,DNB 通过像素饱和与否及信噪比大小两个条件选择不同增益. 在三个增益相互转换之间存在两个过渡区域,在该过渡区域内使用相邻增益进行目标观测,既保证像素不饱和,同时又能使两者的信噪比达到规定的范围,从而可确定不同增益间的比例关系. 通过传递机制可由低增益推知中间增益与高增益,巧妙地实现了 DNB 的辐射定标^[4].

针对目前的可见光-近红外通道辐射定标技术,一般采用星上定标器如太阳漫反射板等进行在轨定标,但由于受电力、重量及空间限制,有些卫星上并没有携带此类定标器. 为了补偿星上定标系统的局限性,一些替代定标方法逐渐涌现^[5-9]. 基于几乎不变的地表属性,沙漠以及海洋地区经常作为替代定标的目标区域^[10-15]. 但是在辐射传输模拟中,相对较小的海洋及沙漠目标反射率会使小的输入误差产生相对较大的辐射模拟误差,误差的相对不确定度超过了 5%^[11]. 相对于海洋以及沙漠目标,高反射率的云目标可提高模拟准确率,减少模拟的相对不确定度. 其中,DCC(Deep Convective Cloud)是一种发展深厚的对流云,它往往能发展到对流层之上,其光谱特征类似于辐射定标用参考白板,在可见光/近红外波段能够提供较高且相对稳定的反照率^[14-16],较为适合作为替代定标源. 相对于海洋、沙漠目标而言,DCC 不仅能提供更高更稳定的反照率,而且目标数目较多,更适合将其应用于不同卫星的数据定标中^[17]. 另外,DCC 发展深厚且多位于对流层顶部,不需考虑地表信息及低层大气廓线等的影响^[17,18].

目前,针对 DNB/HGS(即夜间微光条件)而言,太阳漫反射光会造成其像素饱和,导致直接在轨定标实现较为困难;另外,就交叉定标而言,在夜间月光条件下没有比 NPP/DNB 辐射精度更好的传感器,所以替代定标可能是实现夜间数据定标的较好方式. 由于辐射较小会引起辐射不确定度成倍增加,所以在夜间月光条件下,反射率较低的海洋目标并不适合作为替代定标源. Liao 等^[19]通过对沙漠地区的观测实现对 DNB/HGS 的直接定标,但是其对月光光照条件的严格限制及辐射传输模型对当地大气廓线等参数的要求使结果有待进一步考究. Shao 等^[20]利用 Greenland 及 Dome C 区域对 DNB/HGS 直接定标进行初步研究,但是观测几何条件同样受到严格限制,且辐射极易受杂散光影响,使满足定标条件的个例较少. 相对于上述替代定标方法来说,反射率较高且稳定的 DCC 在中低纬地区广泛存在,理论上可作为较好的替代定标源. 本文就此展开研究,以 DCC 作为替代定标源对 DNB/HGS 进行辐射定标.

1 数据与方法

1.1 数据

VIIRS 数据集包含原始数据集 RDR(Raw Data Records)、传感器数据集(Sensor Data Records)以及环境数据集(Environmental Data Records). 其中,为了实现夜间 DNB/HGS 的辐射定标,用到以下四种数据:VIIRS/DNB SDR 数据 SVDNB, VIIRS/DNB SDR 定位数据集 GDNBO, VIIRS/M15(Moderate Resolution Band 15) SDR 数据 SVM15 以及 VIIRS/MOD SDR 定位数据集 GMODO. 其中,SVDNB 产品包括所测辐射率及质量标志信息;GDNBO 产品包括与之对应的经纬度信息、月亮天顶角、月相角、月亮方位角、卫星方位角等地理定位信息;SVM15 产品包含 M15 红外通道($10.263 \sim 11.263\mu\text{m}$)亮温及质量标志信息;GMODO 包含与之对应的经纬度等相关定位信息. 由于 DNB 与中分辨率波段面板设计不同导致两者定位信息不同,所以上述两种定位信息用来匹配数据. 为了检验利用 DCC 进行夜间 DNB/HGS 定标的可行性,本文采用了 2012 年 08 月 ~ 2013 年 01 月共 6 个月的数据($\geq 20\text{TB}$)进行实验研究.

1.2 数据选取

DCC 的定义为发展到对流层顶的对流云. 当强对流云发展到对流层顶之上时,上升气团的温度随着上升运动而降低. 由于该高度水汽含量较低,此上

升过程可被看成是干绝热过程. 同时, 强烈的上升运动抑制 DCC 中气团与周围空气的热量交换, 从而导致云顶温度通常低于对流层顶温度. 除此之外, 在对流层顶之上, 温度随着高度的升高而逐渐升高, 导致上升气流不明显的其他云层温度通常大于对流层顶温度^[21]. 由于在热带地区对流层顶温度大约为 190 K, 从而 DCC 云顶温度大都低于 190 K^[22]. 因此, 利用 M15 通道亮温 190K 作为判定 DCC 的首要标准. 其次, 由于 DCC 云顶较为均匀, 本文取 9×9 相邻像素变化率阈值 0.02 进一步选取 DCC, 该条件可有效减小云层边缘及快速发展的小云团的影响. 另外, DCC 目标像素对应的月亮天顶角小于 60° 且月相角小于 90° , 以保证足够的月光条件及辐射传输计算的准确性. 只有同时满足上述三个条件才被选取为定标对象. 由于 DCC 在中低纬地区发生频率较大, 所以研究选取 (30°N - 30°S , 180°W - 180°E) 热带地区作为目标区域.

1.3 方法

本研究以 DCC 为目标实现夜间 DNB/HGS 的直接辐射定标, 首先通过 1.2 中描述的改进的辐射传输模式, 对大气层顶辐射进行敏感性试验, 分析影响辐射的主要影响因子并确定不同参数的参考值; 接着通过 1.2 确定的选取标准获取 DCC 目标, 将 1.3 描述的 DCC 光学属性、地表特性及大气廓线等参考值输入到改进的辐射传输模式, 模拟当前观测几何条件下的大气层顶辐射率, 同时与实际观测辐射率进行对比分析. 由于在不同月相、不同月亮天顶角条件下大气层顶月亮辐射不同, 所以为了易于对比, 统一将辐射率转化为反照率.

2 基于 DCC 目标的辐射传输模拟

2.1 月亮辐射模型

在一个月亮周期内, 月亮被照亮的部分随太阳、月亮及地球的相对位置而不断变化. 当太阳、月亮与地球三点一线时 ($\theta_p = 180^\circ$), 即发生新月; 当太阳、地球与月亮三点一线时 ($\theta_p = 0^\circ$), 即发生满月. 当月亮月相角 θ_p 从 180° (新月) 减小到 0° (满月) 再增加到 180° (新月) 时, 经历了一个月亮周期. 在该周期内, 月相函数 f 表示为最大月亮辐射的乘数因子 (0-1), 描述不同波长条件下月亮亮度随月相角的变化程度 (如式 1 所示^[23]). 其中, a, b 为月相角函数系数.

$$f(\theta_p, \lambda) = 10^{-0.4(a(\theta_p) - b(\theta_p)\lambda)} \quad (1)$$

一般来说, 大气层顶月亮辐照度与太阳辐照度

的关系如下式^[24]:

$$E_{\text{TOA}} = \alpha E_0 \left(\frac{\bar{R}_{\text{sc}}}{S_{\text{sm}}} \right)^2 \left(\frac{r_m}{R_{\text{me}} - r_e} \right)^2 f(\theta_p) \quad (2)$$

其中, α 为月表反照率, 在 $0.5\text{-}0.9\mu\text{m}$ 谱段之间的平均月表反照率为 0.137, 远小于地表反照率 $\alpha_E = 0.3$; E_0 为太阳常数, 虽然太阳光谱随着日地距离的不同而不同, 但是考虑到太阳周期对大气层顶太阳辐射的影响不大, 可取 E_0 为平均太阳常数; \bar{R}_{sc} 为平均日地距离, R_{sm} 为太阳月亮距离, R_{me} 为月亮地球距离; r_m, r_e 为月亮、地球半径. 针对不同月相、不同日地距离与不同月地距离, Miller 和 Turner^[24] 提出了一种较为实用的月亮辐射计算模型. 该模型通过预测不同时刻的月相、日地距离以及月地距离, 近似求解大气层顶月亮辐射.

为了易于对比, 统一将辐射率转化为反照率. 若大气层顶月亮辐射率为 L_{LTOA} , 可通过式 (3) 得到:

$$L_{\text{LTOA}} = \frac{E_L}{\pi} \cos(\theta_l) \quad (3)$$

其中, θ_l 为月亮天顶角, E_L 为大气层顶下行月亮辐照度:

$$E_L = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_L(\lambda) \text{RSR}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \text{RSR}(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

$I_L(\lambda)$ 为通过 Miller 模型计算得到的大气层顶月亮辐射光谱, $\text{RSR}(\lambda)$ 为 DNB/HGS 的光谱响应函数. 从而由 DNB 观测得到的反照率为:

$$\rho_{\text{DNB}} = L_{\text{DNB}} / L_{\text{LTOA}} \quad (5)$$

2.2 辐射传输模式

为了在夜间月光条件下对 DNB/HGS 进行直接定标, 需采用较为精确的并且可在夜间实现辐射传输模拟的辐射传输模型. 近年来, SCIATRAN 的广泛应用使其不断完善, 该辐射传输模型在白天条件下, 可在平行平面、伪球型及球型大气下实现辐射传输模拟^[25]. 基于该模型较为稳定且精确的模拟能力, 我们对该辐射传输模式进行改进, 将 Miller 月亮辐射模型引入, 实现全天候的辐射传输模拟.

以 DCC 为目标对夜间 HGS 进行定标, 本文采用 SCIATRAN 中的 DISORT 辐射传输模型, 该模型充分考虑大气粒子的多项散射, 且计算时间及准确率取决于所采用的流数. 由于云粒子有效半径远大于波长, 所以需利用数千勒让德 (legendre) 系数对云粒子群的散射相函数进行精确描述. 为了在确保计算精度的情况下保证计算效率, 研究采用 D-M 方法^[26] 对散射相函数进行截断. 针对云目标的散射特性, 在辐射传输模式中采用 Baum 散射模型^[27] 描述

云粒子群的散射属性. Baum 散射模型包含波段范围为 $0.2 \sim 99 \mu\text{m}$, 云粒子群 ($\text{Re} = 10 \sim 120 \mu\text{m}$) 的不对称因子 g 、衰减系数 Q_{ext} 、单次散射反照率 SSA、散射相函数 $P(\Theta)$ 等散射特性. 由于本文以 DCC 为目标, 它们的云顶常常发展到对流层顶之上且云的上部以非球形粒子为主, 所以在此只考虑冰粒子的散射属性.

2.3 大气层顶 DCC 反照率的敏感性分析

该部分利用辐射传输模式对模拟的大气层顶 DCC 反照率进行敏感性分析, 由于大多数 DCC 发展到对流层顶且厚度超过 10 km , 所以为了较好描述 DCC 的高度及厚度, 选取统计平均值 15 km 、 1 km ^[28] 分别作为云顶高、云底高的参考值. 大气廓线采用 MPI Mainz 开发的 2 维动态化学模型生成的气候学数据库, 该数据库包含 $0\text{--}60 \text{ km}$ 范围内的温压廓线及气体混合比的垂直分布, 模拟采用纬度 05°S 平均大气廓线作为参考. 另外, 针对于 DCC 的光学属性 COT 及 Re , 采用统计平均值 200 及 $20 \mu\text{m}$ ^[22] 作为参考.

表一通过敏感性实验, 分析在不同地表、大气廓线、气溶胶及云参数等敏感性因子的影响下, DCC 目标在 $0.5 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 波段大气层顶反照率的不确定度. 在确定敏感性因子的不确定范围时, 其他因子采用参考值. 根据月亮变化周期, 实验采用 6 个月亮天顶角 ($\text{LZA} = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$), 以保证足够的月光条件; 根据 NPP/VIIIRS DNB 的降交点时间、观测角度, 每 10° 间隔选取 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围内的 19 个相对方位角及 $0^\circ \sim 50^\circ$ 范围内的 6 个观测天顶角. 针对每个敏感因子的不同取值和不同的 LZA, 共需计算 $6 * 19$ 个观测几何下的反照率确定最终的不确定度范围.

就地表反射而言, 首先假设其为朗伯表面. 取地

表平均反照率 0.02 为参考, 在地表反照率 $0\text{--}0.4$ 范围内, 大气层顶反照率不确定度为 $0.06 \sim 0.07\%$. 相对 DCC 来说, 该影响可被忽略. 这主要是因为大气层顶辐射主要受 DCC 强烈反照的影响, 从而使地表反照率贡献较小. 通过输入不同纬度下 ($\text{Lat}35^\circ\text{S}$ – $\text{Lat}35^\circ\text{N}$) 的平均大气廓线, 在 $\text{Lat}05^\circ\text{S}$ 大气廓线的参考下, 不确定度为 $0.60 \sim 0.65\%$. 就不同气溶胶而言, 不确定度在 $0.34 \sim 0.39\%$ 之间. 因此, 不同大气廓线和气溶胶条件对大气层顶辐射影响也可被忽略. 这主要是由于 DCC 经常发展到对流层顶, 使大气廓线和气溶胶对大气层顶辐射贡献较小.

从表 1 中可知, 不同云顶高 (Z_T)、云底高 (Z_B) 输入使反照率变化较小, 不确定度小于 0.5% . 但是云光学厚度 COT 和粒子有效半径 Re 对大气层顶辐射影响较大. 以 $\text{COT} = 200$ 作为参考时, 不同的 COT ($100 \sim 400$) 输入使不确定度达到 $3.34 \sim 3.86\%$. 另外, 相对于 $\text{Re} = 20 \mu\text{m}$, 不同的 Re ($10 \sim 30 \mu\text{m}$) 输入使大气层顶反照率不确定度为 $0.84 \sim 4.52\%$.

通过上述分析可知, 不同地表反照率、大气廓线、气溶胶的模拟误差较小, 且通过时间、空间平均可进一步减少此类误差, 所以这些误差可忽略不计. 从而, COT 与 Re 是模拟 DCC 大气层顶反照率的主要敏感性因子.

为了检测基于 DCC 目标进行 DNB/HGS 定标的可行性, 我们首先分析在 $\text{Re} = 20 \mu\text{m}$ 条件下, 大气层顶反射辐射随 COT 的变化情况. 取观测几何为 $\text{LZA} = 30^\circ$ 、 $\text{VZA} = 20^\circ$ 、 $\text{RAA} = 30^\circ$ 时, 通过上述辐射传输模式模拟, 双向反射函数与 COT 的关系如下图 1 所示, 其中双向反射函数以月亮入射方向作为参考. 模拟利用 Baum 散射模型中 $\text{Re} = 20 \mu\text{m}$ 的冰云散射模型. 如图 1 所示, 随着 COT 的增大双向反射函数迅速增加, 当 $\text{COT} = 50$ 时, 双向反射达到 0.9 .

表 1 受不同地表、大气廓线、气溶胶及云参数变化时, 模拟 $0.5\text{--}0.9 \mu\text{m}$ 波段的大气层顶反照率的不确定度

Table 1 Uncertainty ranges(%) in simulations of $0.5\text{--}0.9 \mu\text{m}$ DNB channel reflectance, caused by changes in surface reflectance, atmospheric profile, aerosol, and cloud parameters

输入参数	地表反照率	大气廓线	气溶胶	云			
				COT	$\text{Re}(\mu\text{m})$	$Z_T(\text{km})$	$Z_B(\text{km})$
参考值	0.02	$\text{Lat}05^\circ\text{S}$	No	200	20	15	1
输入范围	$0 \sim 0.4$	$\text{Lat}35^\circ\text{S}$ – $\text{Lat}35^\circ\text{N}$	Urban Marine	$100 \sim 400$	$10 \sim 30$	$12 \sim 18$	$0.5 \sim 2$
$\text{LZA} = 0^\circ$	0.07%	0.62%	0.39%	3.86%	0.84%	0.44%	0.23%
$\text{LZA} = 10^\circ$	0.07%	0.61%	0.39%	3.86%	1.73%	0.44%	0.23%
$\text{LZA} = 20^\circ$	0.07%	0.62%	0.39%	3.76%	2.67%	0.40%	0.23%
$\text{LZA} = 30^\circ$	0.06%	0.60%	0.37%	3.67%	4.52%	0.34%	0.22%
$\text{LZA} = 40^\circ$	0.06%	0.60%	0.36%	3.53%	2.76%	0.26%	0.22%
$\text{LZA} = 50^\circ$	0.06%	0.65%	0.34%	3.34%	2.67%	0.14%	0.20%

随着 COT 的进一步增大,双向反射函数增大速率降低,且当 COT 大于 200 时,值趋向于 1 且基本保持不变.因此,当 DCC 的光学属性取特定值时,以 DCC 为目标模拟大气层顶反射辐射误差在较小的范围之内.

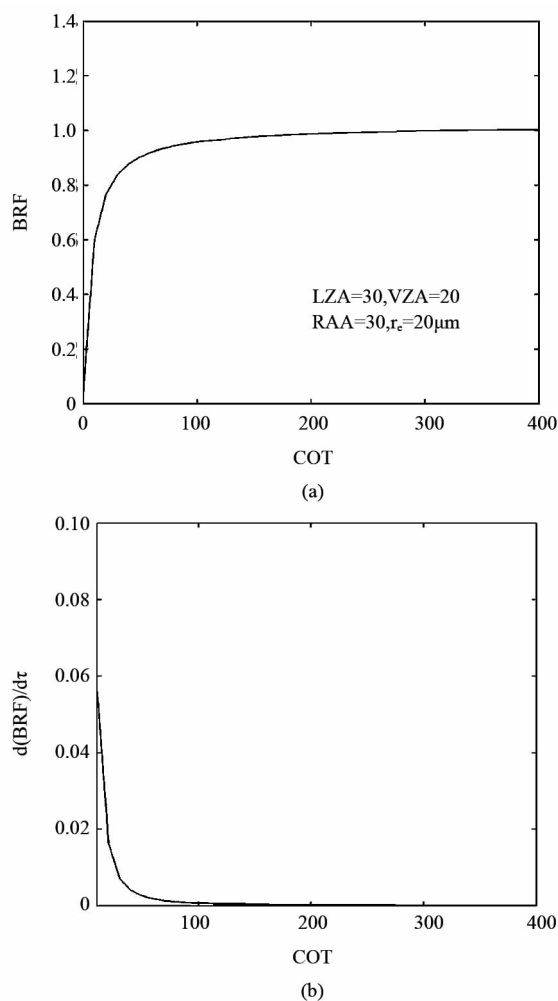


图 1 (a) 当 $LZA = 30^\circ$ 、 $VZA = 20^\circ$ 、 $RAA = 30^\circ$ 时, $0.5\text{--}0.9\ \mu\text{m}$ 波段双向反射函数随冰云光学厚度的变化; (b) 相对变化率随冰云光学厚度的变化

Fig. 1 With $SZA = 30^\circ$, $VZA = 20^\circ$ and $RAA = 30^\circ$, (a) Distributions of BRF for different ice clouds COTs. (b) Distributions of relatively BRF changes for different ice clouds COTs

为了确定以 $COT = 200$ 、 $Re = 20\ \mu\text{m}$ 作为 DCC 典型的光学属性模拟大气层顶反射辐射的不确定度,首先针对不同的观测几何 ($LZA = 30^\circ$, $0^\circ \leq VZA \leq 60^\circ$, $0^\circ \leq RAA \leq 360^\circ$), 利用三个不同的 COT 值 ($COT = 100, 200, 400$) 及 $Re = 20\ \mu\text{m}$, 模拟大气层顶的双向分布函数. 图 2 中的上部分所示为 COT 取不同值时模拟得到的大气层顶双向反射分布函数图. 其中, VZA、RAA 分别沿径向、切线方向. 模式中

$RAA = 0^\circ$ 代表辐射的后向散射, $RAA = 180^\circ$ 代表辐射的前向散射.

对于上述三个不同 COT 值, 我们发现最大的反照率值发生在 $VZA = 30^\circ$ 且 $RAA = 0^\circ$ 时, 表明 DCC 云层的后向散射比较显著. 除此之外, 在接近于星下点观测方向即 $VZA = 0^\circ$ 时, 有彩虹较大值区域出现. 而且, 随着 VZA 的不断增大, 反照率值总体上逐渐变小. 从图 2 中可以看出, 针对特定 COT 与 Re , 云反照率受观测几何影响较大, 范围大约为 $0.80 \sim 1.04$.

通过对给定三个 COT 值所模拟的双向反射分布函数, 相邻做差 ($BRF(COT = 400) - BRF(COT = 200)$ 、 $BRF(COT = 200) - BRF(COT = 100)$) 得到如图 2 下部所示. 当 COT 从 200 变化到 400 时, 双向反射分布函数变化较小, 最大为 0.016. 当 COT 从 100 变为 200 时, 最大差值出现在星下点处, 大约为 0.034. 且差值随着 VZA 的增大而逐渐增大.

与上述过程类似, 针对于冰云不同粒子有效半径 Re , 模拟的双向分布函数如图 3 上部分所示. 其中, 模拟过程中采用如图 2 中所述的观测几何, COT 取 200, Re 取三个不同值分别为 $10, 20, 30\ \mu\text{m}$. 针对不同的粒子有效半径, 最大反照率同样出现在 $VZA = 30^\circ$ 且 $RAA = 0^\circ$ 处, 即后向散射较为显著.

如图 3 下部分所示为粒子有效半径从 10 变化到 $20\ \mu\text{m}$ 及 20 变化到 $30\ \mu\text{m}$ 时, 双向反射函数的变化情况. 随着粒子有效半径的增大, 前向散射有增加趋势而后向散射有减小趋势. 但是, 在完全后向散射 $VZA = 30^\circ$ 且 $RAA = 0^\circ$ 处, 粒子半径较大的反照率较大. 但总体来说, 去除后向散射方向, 双向反射分布函数差值最大处大约为 0.03.

针对表一中所得结果可知, 地表反射、大气廓线、气溶胶等对大气层顶辐射贡献较小可以忽略. 但是, 云的光学厚度以及粒子有效半径是影响模拟准确率的敏感性因子. 当固定云特性参数 ($COT = 200$, $Re = 20\ \mu\text{m}$) 时, 在不同光学厚度 ($COT = 100 \sim 400$) 及粒子有效半径 ($Re = 10\text{--}30\ \mu\text{m}$) 输入下, 最大模拟误差小于 5%.

3 基于深对流云的 DNB/HGS 辐射定标

该部分利用夜间 VIIRS 数据, 以 DCC 为替代定标源对 DNB/HGS 进行定标研究. 一般情况下, 将当前观测几何及不同参数的合理参考值, 输入到第 2 部分所述的改进的辐射传输模式, 可模拟 DNB/HGS 的大气层顶反射辐射率, 利用模拟辐射率与 DN 值

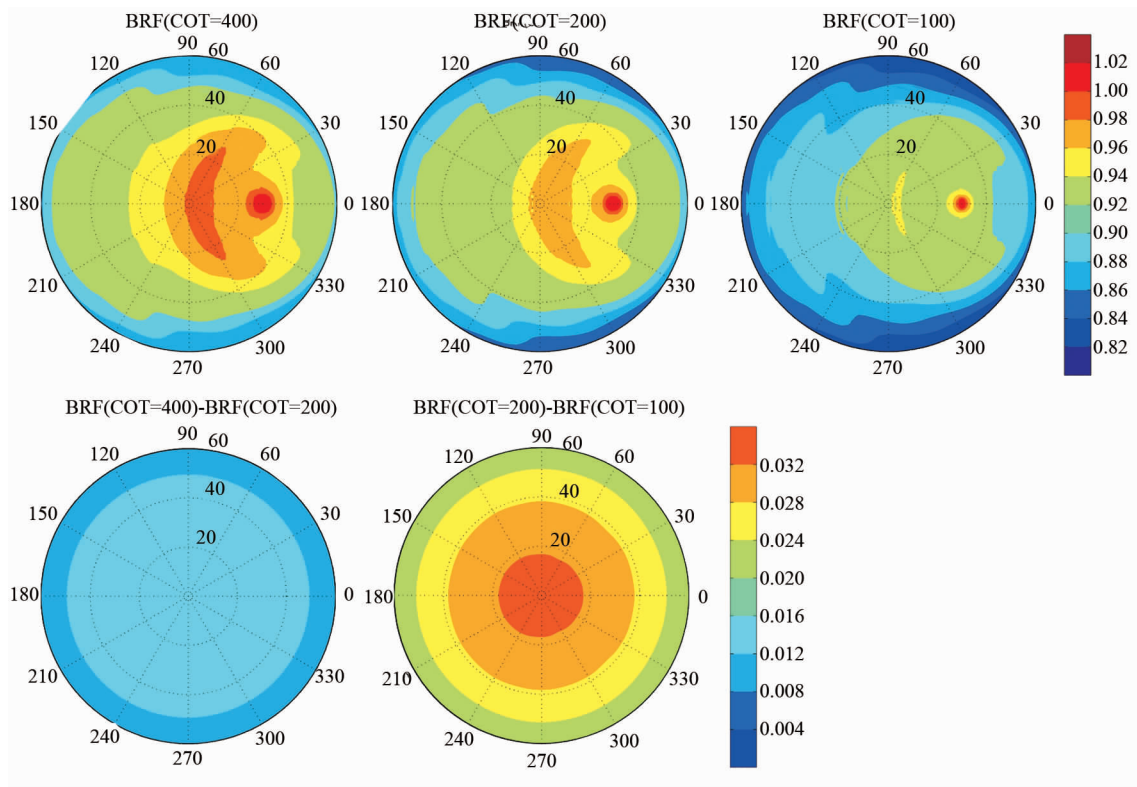


图2 针对三个不同 COT 值,模拟冰云大气层顶双向反射分布函数及变化
Fig.2 Simulation TOA BRFs of ice cloud for three different COTs(100,200,400) and BRF changes made by changing COT from 100 to 200, and from 200 to 400

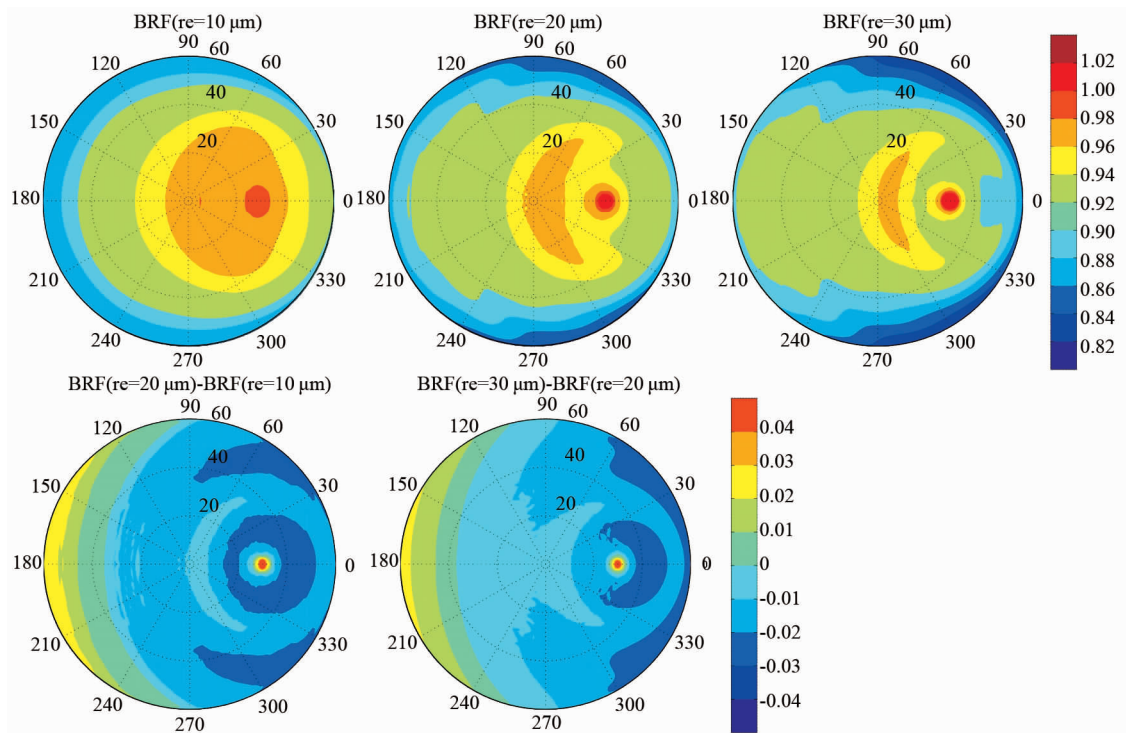


图3 针对三个不同 Re 值,模拟冰云大气层顶双向反射分布函数及变化
Fig.3 Simulation TOA BRFs of ice cloud for three different Re values (10, 20, 30) and BRF changes made for Re values from 10 to 20, and from 20 to 30

进行拟合,即可获取 HGS 的定标系数. 由于 VIIRS 提供产品只包含在轨定标后的辐射率,所以本文通过对比模拟的辐射率与 DNB 观测的辐射率,分析以深对流云为目标进行替代定标的可行性.

我们利用 2012 年 8 月~2013 年 1 月共 6 个月的数据,分析基于 DCC 的替代定标方法. 通过 1.2 中确定的判定标准选取 DCC 替代目标像素,将选取所得 DCC 替代目标像素的观测几何及不同输入参

数的合理参考值输入改进的辐射传输模式,模拟反射到传感器处的辐射率. 为了消除不同月相及月亮天顶角对辐射带来的影响,结果统一将辐射率转化为反照率. 图 4 所示为 2012 年 8 月~2013 年 1 月之间,不同月份 DCC 目标像素的模拟反照率与观测反照率的散点对比图. 从图 4 中可以看出:在不同月份中,只有较少 DCC 目标像素点的模拟反照率与观测反照率之间的相对误差大于 20%,且该情况下的像

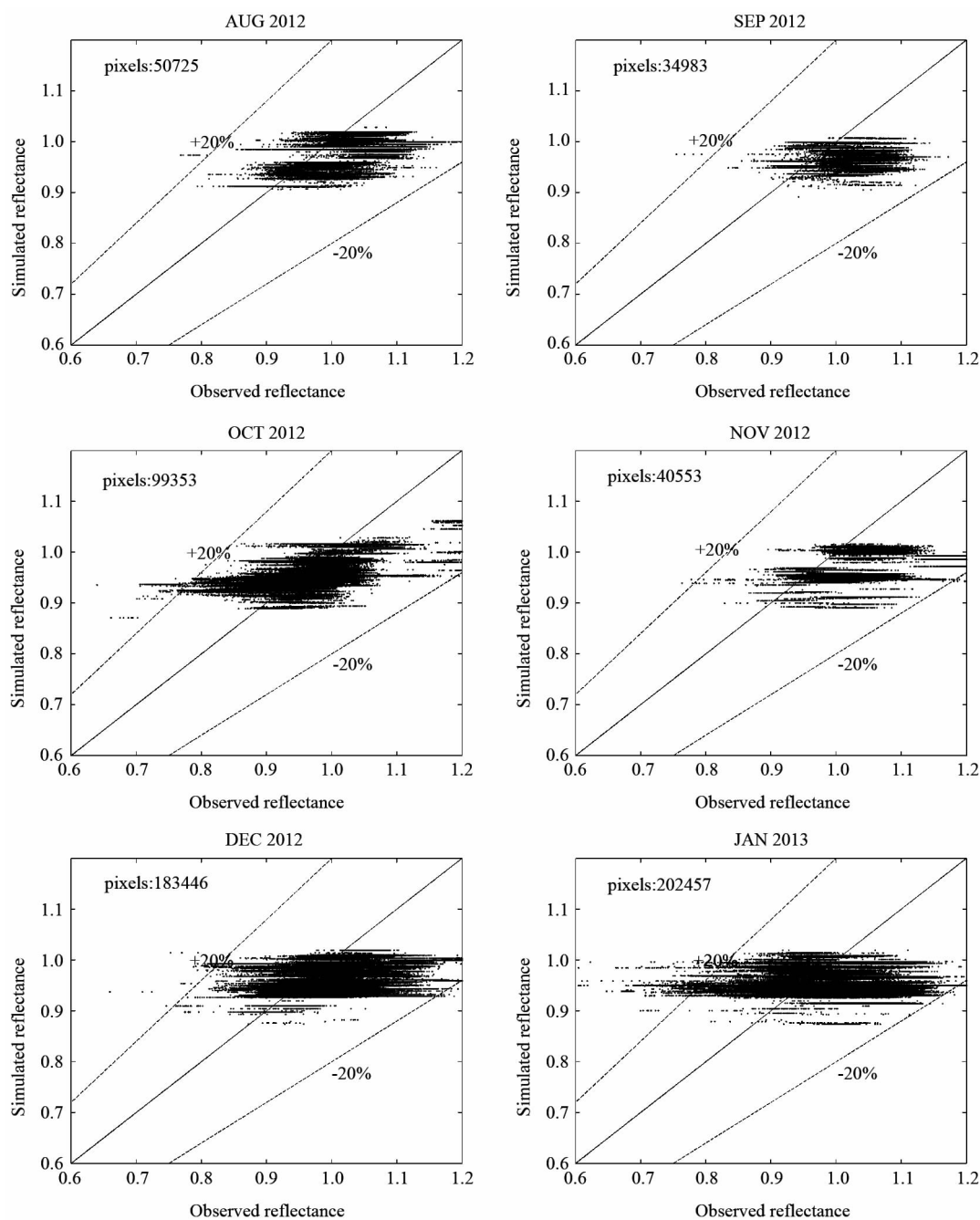


图 4 2012 年 08 月~2013 年 01 月,每月 DCC 替代目标像素的模拟反照率值与 DNB/HGS 观测反照率值对比图
Fig. 4 Comparison between simulated and observed DNB HGS reflectance values for each month from August 2012 to January 2013

素数随着探测像素数的增加而增加. 其中, 相对于其他月份, 2012 年 10 月、2012 年 12 月及 2013 年 1 月探测 DCC 像素数较多分别为 99353、183446、202457 个, 且在这些月份下, 出现相对误差大于 20% 像素数相对较多. 出现该现象的主要原因是选取 DCC 像素时, 没有考虑到云毡及云层边缘像素的影响. 另外由图 4 可以发现不同 DCC 像素的模拟反照率与观测反照率的相对误差处于 $\pm 15\%$ 之内, 说明两者有较好的对应关系, 但是模拟反照率值普遍小于观测反照率值.

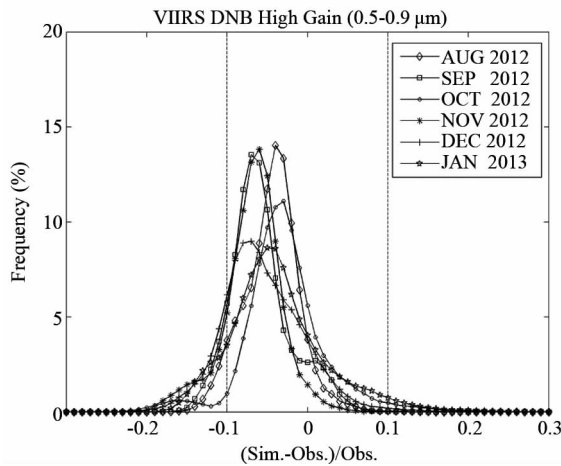


图 5 通过模拟所得 DCC 目标像素反照率与观测反照率之间的相对误差直方图

Fig. 5 Histogram of relative deviation of simulated reflectance values from observed reflectance values for the DCC pixels

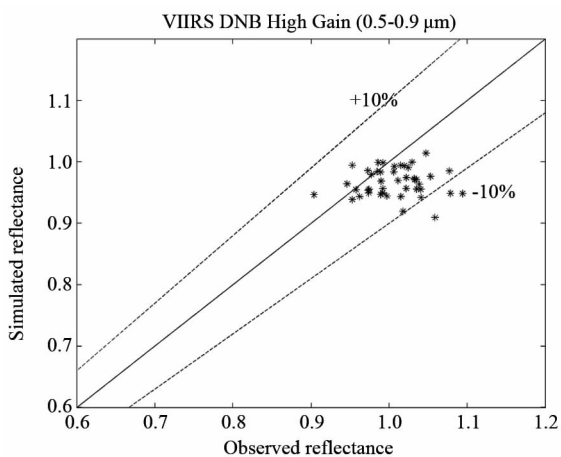


图 6 基于日统计的 DCC 目标像素平均模拟反照率与平均观测反照率散点图

Fig. 6 Scatter plots of simulated vs observed DNB High gain reflectance values on a daily basis

为了进一步分析, 我们获取如图 5 所示的模拟

反照率与观测反照率之间的相对误差直方图统计. 由图 5 可知: 在 2012 年 8 月 ~ 2013 年 1 月范围内, 不同月份的模拟反照率值相对误差中心分别位于 -4% 、 -7% 、 -3% 、 -6% 、 -7% 、 -5% 左右, 相对误差中心并没有明显的季节变化, 并且 90% 像素模拟反照率的相对误差范围在 -15% ~ 5% 之内. 另外, 85% 像素模拟反照率的相对误差小于 0%, 表明虽然模拟反照率与观测反照率有较好的一致性, 但模拟反照率普遍小于观测反照率.

通过图 5、6 对目标像素观测反照率的统计, 我们发现某些目标像素观测反照率值大于 1.5, 甚至更大. 为了更好显示模拟反照率与观测反照率的相关规律, 这些目标像素的统计值没有在图中显示. 通过分析查找影像, 发现上述现象主要是由闪电干扰所引起. 在 DCC 发展旺盛阶段, 经常会伴有雷电发生. 另外与 OLS 探测不同的是, DNB 探测一个扫描行包含 16 个像素. 所以在数据选取过程中, 受闪电干扰的相关 DCC 像素满足 1.2 中的数据选取条件, 也被确定为定标对象, 从而使观测反照率较大.

我们利用基于日统计平均的方法来检验定标的可行性, 利用日平均可减小随机误差, 并且可使云毡及云边缘像素对整体定标影响较小. 如图 6 所示为基于日统计的 DCC 目标像素平均模拟反照率与平均观测反照率散点图. 其中, 当每天选取的 DCC 像素数大于 50 时, 才被选取为定标对象. 由图 6 可知, 满足一定月相及上述 DCC 像素条件的天数为 46 天, 相对误差为 $4.06\% \pm 9.07\%$ (2σ). 可以看出, DCC 替代目标的观测反照率普遍大于模拟反照率. 下面对出现该情况的原因进行详细分析.

在卫星发射之前, DNB 的相对光谱响应 RSR 在实验室经过严格测量. 但是随着卫星探测器长期暴露于太阳辐射下, 旋转镜上的氧化钨受紫外光线的作用在可见光与红外波段变得易吸收, 且其吸收强度与曝光时间成正比^[29]. 这种情况使增益随着曝光时间的增加而逐渐减小, 而增益的变化进一步导致 RSR 发生变化. 受退化影响的可通过下式计算:

$$RSR_M = \frac{G(\lambda)RSR_0(\lambda)}{\max[G(\lambda)RSR_0(\lambda)]}, \quad (6)$$

其中, $G(\lambda)$ 为增益变化系数, RSR_0 为实验室测量所得原始的相对响应函数. 而在生成 SDR 产品时, VIIRS 项目组在不同阶段对 RSR 进行修正. 上述调整首先通过 lei 等^[30]提出的薄膜沉积模型对增益变化进行预测, 然后通过式(6)对 RSR 进行实质调整. 通过对相对响应函数的分析, 可知利用 2012 年 5 月的

相对响应函数替代实验室测定的相对光谱响应可使辐射增强 3.4%。因此利用实验室测定的光谱响应函数,可使 DNB 的观测辐射率相对预测辐射率偏大。所以使用修正后的在轨光谱响应函数可减小两者误差。

将 2012 年 5 月调整的 RSR 带入替代定标过程,结果如图 7、图 8 所示。由图 7 可知,利用调整后的 RSR 进行计算,相对误差频率最大值处集中在 -5% ~ 0% 之内,且 90% 目标像素相对误差在 $\pm 10\%$ 之内。另外,由图 8 可以看出,基于日统计的平均模拟反照率相对误差为 $-1.71\% \pm 9.3\%$ (2σ),相对误差除少数几天外都处于 $\pm 10\%$ 之内。通过与上述结果对比可知,RSR 的变化对结果有较为明显的影响。

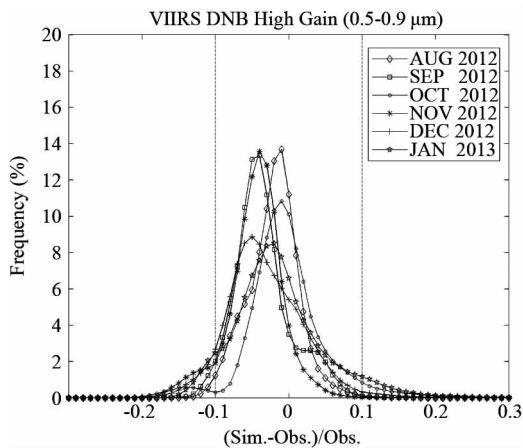


图 7 通过模拟所得 DCC 目标像素反照率与观测反照率之间的相对误差直方图
Fig. 7 Histogram of relative deviation of simulated reflectance values from observed reflectance values for the DCC pixels

虽然受数据选取、闪电干扰、RSR 变化等的影响,但是总体而言,以 DCC 为替代目标的模拟反照率与观测反照率有较好的一致性,基于日平均的模拟反照率的不确定度基本在 $\pm 10\%$ 。在夜间高增益阶段,实验室测定参数与在轨测定参数分别为 11%、15%^[19]。而本文提出的基于 DCC 的替代定标方法确定的不确定度为 $\pm 10\%$,满足 DNB 定标参数。进一步说明基于 DCC 的替代定标方法可较好的应用于夜间微光传感器的辐射定标,为夜间辐射定标增加了一种有效的手段。

4 结语

提出了基于深对流云的夜间微光传感器替代定

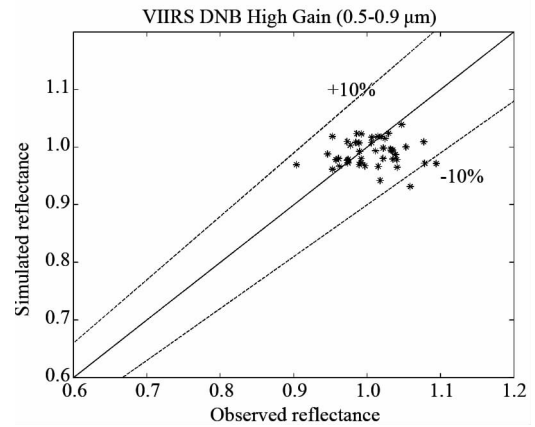


图 8 每天获取的平均模拟反照率值与平均观测反照率值对比图

Fig. 8 Comparison between the average simulated and observed reflectance value of each day

标方法。将月亮辐射模型引入到 SCIATRAN 中,实现了全天候的辐射传输计算。利用改进的辐射传输模式,将确定的 DCC 光学属性、地表特性及大气廓线等的参考值输入,对接收辐射进行敏感性试验,分析得到影响辐射的主要影响因子为云光学厚度 COT 与云有效粒子半径 R_e 。但是影响因子对辐射影响较小,利用固定参考值使得最大模拟误差小于 5%。

为了检验该替代方法的可行性,通过改进的辐射传输模式,对确定的替代目标像素进行辐射传输模拟,得到模拟反照率,并将其与观测反照率进行对比分析。通过对 2012 年 08 月 ~ 2013 年 01 月共 6 个月的 NPP 数据进行对比分析,表明基于日变化的辐射不确定度在 $\pm 10\%$ 之内。考虑到目前测定的在轨定标辐射不确定度为 15%,该替代定标方法效果较好,可实现对 DNB/HGS 的辐射定标。

在上述定标过程中,主要受到不同因素的影响使得模拟误差存在,可归纳为以下几个因素:(1) 云毡及云层边缘像素的影响。由于云毡及云层边缘像素使得云光学厚度比 DCC 主体的云光学厚度小的多,且辐射率受 COT 变化明显,使得模拟辐射率大于观测辐射率,从而引起辐射误差。(2) 闪电的影响。虽然可利用阈值方法将大部分闪电像素去除,但是有些闪电强度较弱或受污染云层离闪电较远时,可使受污染云层去除较为困难,从而使观测辐射率大于模拟辐射率。(3) RSR 变化的影响。不同时间段的 RSR 不同,会对定标产生一定影响,且精确的测定 RSR 较为困难,尤其针对夜间 HGS 来说,RSR 的稍许变化会对辐射产生较大的影响。(4) 云光学属

性参考值的影响. 本文所用的 DCC 光学属性基于前人对白天条件下的统计结果, 由于不同时间段云的光学属性可能不同, 会对定标产生一定影响. (5) 月亮辐射模型的影响. 本文采用的月亮辐射模型是近似模型, 没有考虑月亮表面反照率的非均匀性等, 通过此模型获取的月亮辐照度不确定度在 7 ~ 12%^[24].

在下一步的研究中, 将着力解决上述问题, 使模拟辐射误差降到最小. 其中, 可利用同步探测数据 Cloudsat/CLIPSO 产品对夜间 DCC 的光学属性进行统计分析, 确定参考值, 减小云光学属性对定标的整体影响. 同时, 利用更加严格的选取规则选取 DCC 像素, 消除云毡、云层边缘像素以及闪电的影响.

致 谢: 本文采用的相关 NPP 数据由美国海洋和大气管理局(NOAA)的综合数据存储与处理系统 (CLASS) 提供, 在此谨表感谢! 同时, 感谢 Steven Miller 教授、Vladimir V. Rozanov 教授在月亮辐射模型及 SCIATRAN 辐射传输方面的指导和帮助!

References

- [1] Hillger D, Kopp T, Lee T, *et al.* First-light imagery from Suomi NPP VIIRS[J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2013, **06**: 1019 - 1029.
- [2] Miller S D, Mills S P, Elvidge C D, *et al.* Suomi satellite brings to light a unique frontier of nighttime environmental sensing capabilities[J]. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 2012, **109**(39): 15706 - 15711.
- [3] Kuciauskas A, Solbrig J, Lee T, *et al.* Next Generation Satellite Meteorology Technology Unveiled [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **94**: 1824 - 1825.
- [4] Jacobson E, Ibara A, Lucas M, *et al.* Operation and Characterization of the Day/Night Band (DNB) for the NPP Visible/Infrared Imager Radiometer Suite (VIIRS) [C]. *6th Annual Symposium on Future National Operational Environmental Satellite Systems-NPOESS and GOES-R*, Am. Met. Soc., 2010: 349.
- [5] Heidinger A K, Cao C, Sullivan J T. Using Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS) to calibrate advanced very high resolution radiometer reflectance channels [J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**: 4702 - 4714.
- [6] Sohn B J, Ham S H, Yang P. Evaluating the calibration of MTSAT-1R infrared channels using collocated Terra MODIS measurements [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 2008, **29**: 3033 - 3042.
- [7] YANG Z D, GU Y S, QIU H, *et al.* Research on the algorithm of cross calibration about IRMSS aboard on CBERS-1 [J]. *J. Infrared Millim. Waves.* (杨忠东, 谷岩松, 邱红, 等. 中巴地球资源一号卫星红外多光谱扫描仪交叉定标方法研究. *红外与毫米波学报*), 2003, **22**(4): 281 - 285.
- [8] PAN D L, HE X Q, ZHU Q K. Cross calibration about COCTS aboard on HY-1A [J]. *Chinese Sci. Bull.* (潘德炉, 何贤强, 朱乾坤. HY-1 卫星遥感器水色水温扫描仪在轨交叉定标. *科学通报*), 2004, **21**: 2239 - 2244.
- [9] Eplee G, Sun J Q, Meister G, *et al.* Cross calibration of SeaWiFS and MODIS using on-orbit observations of the moon[J]. *Appl Opt*, 2011, **50**(2): 120 - 133.
- [10] Govaerts Y M, Clerici M. Evaluation of radiative transfer simulations over bright desert calibration sites [J]. *IEEE T. Geosci. Remote S.*, 2004, **42**: 176 - 187.
- [11] Martiny N, Santer R, Smolskaia I. Vicarious calibration of MERIS over dark waters in the near infrared [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2005, **94**: 475 - 490.
- [12] Vermote E F, Saleous N Z. Calibration of NOAA16 AVHRR over a desert site using MODIS data [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2006, **105**: 214 - 220.
- [13] HU X Q, RONG Z G, QIU K M, *et al.* In-Flight Radiometric Calibration for thermal channels of FY-1C meteorological satellite sensors using Qinghai lake, water surface radiometric calibration site [J]. *J. Remote Sens.* (胡秀清, 戎志国, 邱康睦, 等. 利用青海湖水面辐射校正场对 FY-1C 气象卫星热红外传感器进行绝对辐射定标. *遥感学报*), 2003, **7**(6): 458-464.
- [14] Vermote E F, Kaufman Y J. Absolute calibration of AVHRR visible and near-infrared channels using ocean and cloud views [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 1995, **16**: 2317 - 2340.
- [15] HU Y X, WIELICKI B, YANG P, *et al.* Application of deep convective cloud albedo observation to satellite-based study of the terrestrial atmosphere: monitoring the stability of spaceborne measurements and assessing absorption anomaly [J]. *IEEE T. Geosci. Remote S.*, 2004, **42**: 2594 - 2599.
- [16] CHEN L, HU X Q, XU N, *et al.* The Application of Deep Convective Clouds in the Calibration and Response Monitoring of the Reflective Solar Bands of FY-3A/MERSI (Medium Resolution Spectral Imager) [J]. *Remote Sens.*, 2013, **5**: 6958-6975. doi:10.3390/rs5126958.
- [17] Doelling D R, Nguyen L, Minnis P. NASA-Langley satellite cross-calibration, deep convective cloud calibration, and MTSAT case study [C]. *The 3rd Conference of GSICS Research Working Group (GRWG-III) Camp Springs, Maryland*, February 2008: 19 - 21.
- [18] Daniel R, William L, Woodley W. Deep convective clouds with sustained supercooled liquid water down to -37.5°C [J]. *Nature*, 2000, **405**: 440 - 442.
- [19] Liao L B, Weiss S, Mills S, *et al.* Suomi NPP VIIRS day-night band on-orbit performance [J]. *J. Geophys. Res.*, 2013, **118**: 12705 - 12718.
- [20] SHAO X, CAO C Y, UPRETY S. Vicarious Calibration of S-NPP/VIIRS Day-Night Band [C]. *Proc. SPIE 8866*, Earth Observing Systems XVIII, 2013, 88661S.
- [21] CHUNG E S, SOHN B J, SCHMETZ J. CloudSat shedding new light on high-reaching tropical deep convection observed with Meteosat [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2008, **35**: L02814.
- [22] SOHN B J, HAM S H, YANG P. Possibility of the visible channel calibration using deep convective clouds overshooting the TTL [J]. *J. Appl. Meteorol. Clim.*, 2009, **48**: 2271 - 2283.
- [23] LANE A, IRVINE W. Monochromatic phase curves and albedos for the lunar disk [J]. *Astro. J.*, 1973, **78**(3): 267 - 277.
- [24] Miller S D, Turner R E. A Dynamic Lunar Spectral Irradi-

- ance Data Set for NPOESS/VIIRS Day/Night Band Night-time Environmental Applications[J]. *IEEE T. Geosci. Remote S.*, 2009, **47**(7): 2316–2328.
- [25] Rozanov V V, Rozanov A V, Kokhanovsky A A, *et al.* Radiative transfer through terrestrial atmosphere and ocean; Software package SCIATRAN[J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 2014, **133**: 13–71.
- [26] Wiscombe W J. The Delta-M Method; Rapid Yet Accurate Radioactive Flux Calculation for Strongly Asymmetric Phase Functions[J]. *J. Atmos. Sci.*, 1977, **34**: 1408–1422.
- [27] Baum B A, Yang P, Heymsfield A J, *et al.* Improvement to shortwave bulk scattering and absorption models for the remote sensing of ice clouds[J]. *J. Appl. Meteor. Clim.*, 2011, **50**:1037–1056.
- [28] LUO Z, LIU G Y, STEPHENS G L. CloudSat adding new insight into tropical penetrating convection[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2008, **35**: L19819.
- [29] LEI N, CHIANG K, OUDRARI H, *et al.* A Maximum Likelihood approach to determine sensor radiometric response coefficients for NPP VIIRS reflective solar bands [C]. *Proc. SPIE 8153*, Earth Observing Systems XVIII, 2013, 81530J.
- [30] LEI N, GUENTHER B, WANG Z P, *et al.* Modeling SNPP VIIRS reflective solar bands optical throughput degradation and its impacts on the relative spectral response [C]. *Proc. SPIE 8866*, Earth Observing Systems XVIII, 2013, 88661H.

《红外与毫米波学报》征稿简则

1. 本刊主要刊登在红外物理、凝聚态光学性质、低能激发过程(包括低维系统和电子结构计算)、飞秒光谱学、非线性光学、红外光电子学、红外与毫米波技术(包括元器件、系统及应用,智能信息技术和人工神经网络、生物医学光学)研究等方面有创新的论文,具有国际、国内先进水平的研究报告和阶段性研究简报以及高水平的述评。

2. 本刊为《SCI》(美国科学引文索引)、《EI》(美国工程索引)、《CA》(美国化学文摘)、《SA/INSPEC》(英国科学文摘)、《JICST》(日本科学技术文献速报)、《AJ》(俄罗斯文摘杂志)、《SCOPUS》(SCOPUS 网络数据库)、《METADEX》(METADEX 光盘数据库)等国际著名检索体系收录。为“中国精品科技期刊”、“中国自然科学核心期刊”、“中国科技核心期刊”、“中国科学引文数据库统计源期刊”、“中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊(CAJCED)”；被包括万方数据——中国数字化期刊群、中国学术期刊网——CNKI,重庆维普中文科技期刊全文数据库等在内的国内所有重要检索系统收录。自 1982 年以来,先后多次获全国、中国科学院、中国科协优秀科技期刊评比一等奖。

3. 本刊采用中、英文混排。来稿字数(包括图表和参考文献):以 8 000 字为限,图表参考文献应规范,并提供 200~300 字的摘要和 3~5 个反映论文主题概念的关键词。其中,中国作者姓名应附汉语拼音(姓全大写,名首字母大写),并且中文稿的作者单位(公开全称)、文章题目、摘要、基金项目、关键词、图表名称均须附英译文。国内作者的英文稿则须附上上述内容的中译文。易混淆的外文大小写、希文以及符号上下角均须用铅笔注明。

4. 来稿标题应鲜明、简明、确切。正文前要有“摘要”、“关键词”、“中图分类号”、“文献标识码”和“PACS”编号,并按次序排列。摘要应明确反映研究对象、文章主题、采用的理论或实验方法、获得的重要数据结果和结论,少用抽象字句,多给具体信息,以利于国内外检索系统收录和引用。中图分类号请根据《中国图书分类法》第四版分类方式选定。

5. 来稿必须是未曾在国内外公开发表过的文章。切勿一稿两投。

6. 来稿不得涉及国家机密。必要时作者应请所在单位出具可公开发表的证明。

7. 为了方便作者投稿、查询稿件,提高编辑部工作效率,本刊专门建立网站并于 2009 年 1 月 1 日开始使用远程稿件处理系统。请作者务必通过网上投稿,网址为: <http://journal.sitp.ac.cn/>。一般情况下不再接收纸稿和 E-mail 投稿。投稿流程如下:

- (1) 作者注册(作者注册信息提交后,系统会自动发送一封激活帐号的电子邮件,请一定要准确填写您的 Email 地址);
- (2) 激活后登陆系统,进入稿件管理菜单,选择投稿,按要求提交即可。

《红外与毫米波学报》编辑部

本刊联系地址:上海玉田路 500 号,邮政编码:200083

电话:(021)25051553,传真:(021)55393960

电子信箱:jimw@mail.sitp.ac.cn 网址:<http://journal.sitp.ac.cn/>