

水色遥感卫星姿态对瑞利散射计算的影响

何贤强, 潘德炉, 尹中林, 王迪峰

(国家海洋局 海洋动力过程与卫星海洋学重点实验室, 国家海洋局 第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012)

摘要: 瑞利散射计算精度在海洋水色遥感大气校正中起关键作用, 该文研究卫星姿态对瑞利散射计算精度的影响。卫星姿态直接影响太阳、卫星几何角度的计算精度, 进而影响瑞利散射计算精度。计算结果表明, 卫星滚动角对瑞利散射计算影响最大, 当滚动角为 2.5° 时, 瑞利散射计算误差达 10%, 且冬季比夏季误差略大。俯仰角和偏航角的影响很小, 当俯仰角和偏航角小于 2.5° , 瑞利散射计算误差小于 1%。对宽视场水色遥感卫星, 若在资料预处理过程中不进行卫星姿态的修正, 则要求卫星滚动角小于 0.3° , 才能满足瑞利散射计算精度 1% 的目标。

关键词: 瑞利散射; 水色遥感; 卫星姿态

中图分类号: TP701 **文献标识码:** A

1 引言

海洋水色遥感器接收总辐射绝大部分来自大气程辐射和海表反射辐射, 通常从遥感器接收总辐射中扣除大气程辐射及海表反射辐射的过程称为大气校正。Gordon 等^[1]根据水色卫星遥感器接收的各辐射量权重及其因子影响大小, 将它们分为 3 个等级, 见表 1。由此可见, 瑞利散射计算精度对大气校正

表 1 水色遥感辐射量影响分级

Table 1 The effects classification of the ocean color remote sensing radiances

级 别	因 子
0	瑞利散射
1	离水辐射, 气溶胶散射辐射
2	多次散射、偏振、海面粗糙度及白帽反射、离水辐射的二向性影响、气压及臭氧浓度的时空变化

的精度起着关键作用。一般, 要达到 5% 的离水辐射反演精度, 要求瑞利散射计算精度达到 1%。Gordon 等^[2]利用逐次散射法解大气中的矢量辐射传输

方程(VRTE), 得到了包含多次散射和偏振的瑞利散射精确值, 并生成精确瑞利散射查找表, 其精度达到 0.1%。因此, 影响瑞利散射计算精度主要是太阳、卫星几何角度的计算精度。而卫星在轨扫描成像过程中受到各种摄动力的作用, 卫星姿态偏离设计状态, 导致遥感数据元计算得到的太阳、卫星几何角度存在一定的误差, 最终会影响瑞利散射计算精度。不失一般性, 本文假设卫星的轨道参数与 FY-1D 相同, 遥感器的波段设置及波段响应函数与海洋一号(HY-1)卫星上的水色水温扫描器 COCTS 相同。

2 瑞利散射计算

瑞利散射计算通常采用单次散射近似计算法^[3,4]或多次散射精确算法^[2]。Gordon 等^[2]指出单次散射近似法在中、低太阳天顶角的情况下误差达到 5%, 而在高太阳天顶角情况下, 误差将超过 10%。为了提高瑞利散射的计算精度, Gordon 等^[2]利用逐次散射项计算法解矢量辐射传输方程(VRTE), 得到了包含多次散射和偏振的瑞利散射精确值, 其计算精度达到 0.1%, 并针对 SeaWiFS (Sea-

收稿日期: 2004-03-12; 修订日期: 2004-05-12

基金项目: 本文研究得到国家 863 计划青年基金项目(2002AA639490)资助。

作者简介: 何贤强(1978—), 男, 助理研究员, 1999 年毕业于华中理工大学船舶与海洋工程专业, 获学士学位。2002 年毕业于国家海洋局第二海洋研究所物理海洋学专业, 获硕士学位。现为中国科学院上海技术物理研究所博士研究生, 从事海洋水色遥感应用和数值同化技术研究。Email: hexianqiang@sina.com.cn

viewing Wide Field-of-view Sensor)、MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer)等卫星遥感器,生成了对应的精确瑞利散射查找表。

2.1 单次瑞利散射近似计算

利用平行分层大气辐射传输方程,可以得到单次瑞利散射近似计算模式为^[2]:

$$L_r = \frac{\omega_r \tau_r F'_0 [P_r(\alpha_-) + (\rho(\theta_0) + (\rho(\theta_s))) P_r(\alpha_+)]}{4\pi \cos \theta_s} \quad (1)$$

式中, θ_0 , θ_s 分别为太阳和卫星的天顶角; φ_0 , φ 分别为太阳和卫星的方位角, α_+ , α_- 为散射角, 由下式得到:

$$\cos \alpha_{\pm} = \pm \cos \theta_0 \cos \theta_s - \sin \theta_0 \sin \theta_s \cos(\varphi - \varphi_0) \quad (2)$$

$P_r(\alpha)$ 为瑞利散射相函数, 为:

$$P_r(\alpha) = \frac{3}{4} (1 + \cos^2 \alpha) \quad (3)$$

ρ 为非涅耳反射系数, ω_r 为单次散射率, τ_r 为光学厚度。 F'_0 为大气顶太阳辐照度 F_0 经过双程臭氧吸收修正后的辐照度, 为:

$$F'_0 = F_0 \exp \left[-\tau_{oz} \left(\frac{1}{\cos \theta_0} + \frac{1}{\cos \theta_s} \right) \right] \quad (4)$$

τ_{oz} 为臭氧吸收光学厚度。单次散射近似在光学厚度和信号偏震度很小时精度较高, 否则应采用下面的带偏震的多次散射精确计算方法。

2.2 瑞利散射精确计算

瑞利散射精确计算需要求解矢量辐射传输方程, 进而生成查找表, 以适用于海量遥感数据的实时处理。目前, 求解辐射传输方程的方法有多种, 主要有加倍法、离散纵标法、蒙特卡罗法、逐次散射法、球谐函数法、有限元法等。这些方法各有优缺点, 本文采用加倍法^[5], 相对于其它方法, 它具有物理含义清晰、只需对角度积分、用相同方法处理各种散射相函数等优点。加倍法首先由 Van de Hulst^[6] 用于计算厚片状层中的辐射传输, 后来扩展到适用于解多层介质辐射传输, 其基本原理为: 如果有两介质层的反射率和透射率已知, 则由该两层叠合的合成层的反射率和透射率就可以通过计算两层之间的来回反

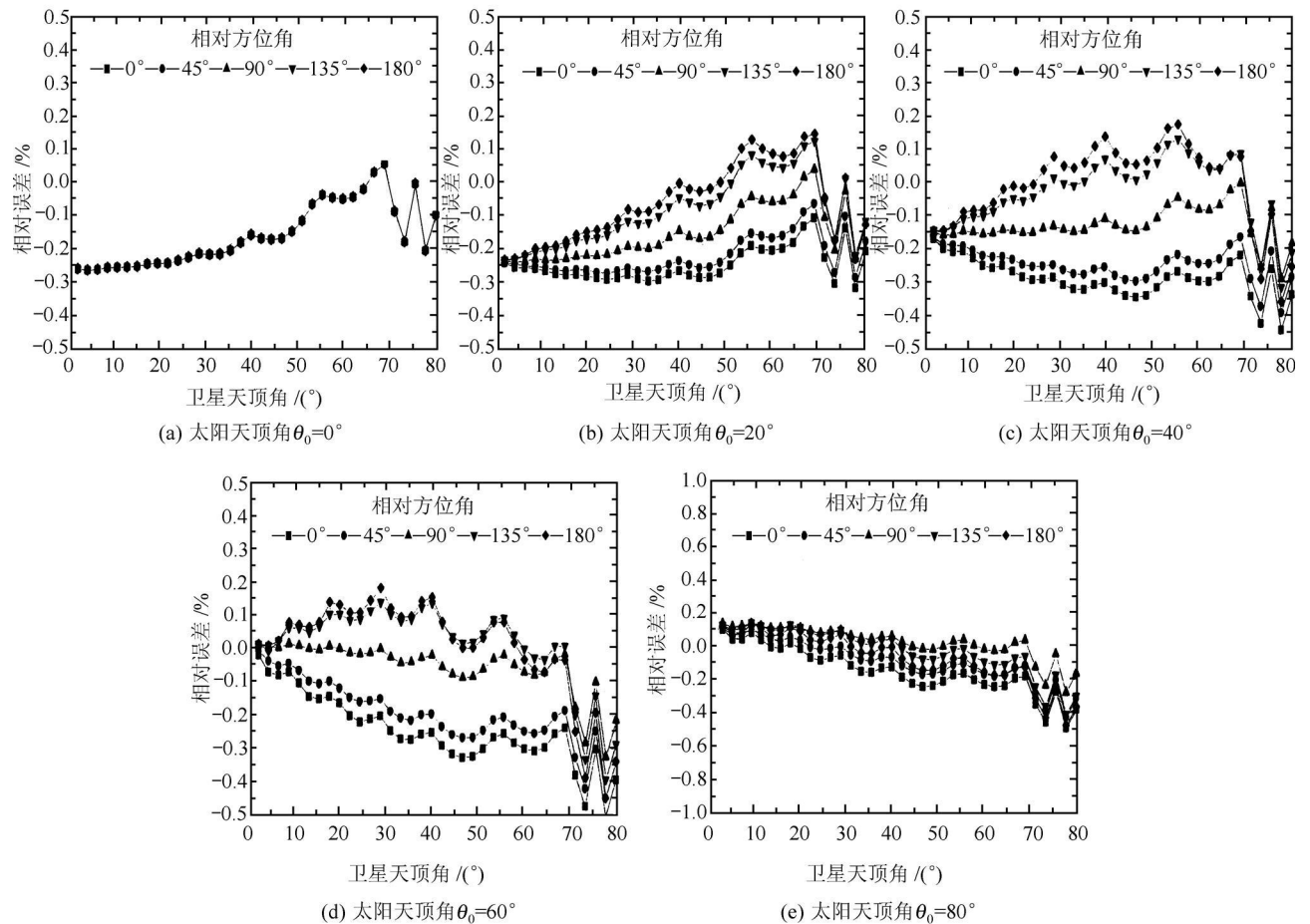


图1 412nm 波段加倍法瑞利散射计算相对误差

Fig 1 The relative error of the rayleigh scattering calculation at 412nm band by using add-doubling method

射而得到,任意厚度介质层的反射和透射只要经过适当次数的加倍即可求出,同时也可以求出各介质层界面的辐射分布。

利用加倍法解以水面为下垫面的平行分层大气矢量辐射传输方程,得到不同太阳、卫星几何角度条件下包含多次散射和偏振的瑞利散射辐射。通过与 Gordon 等生成的瑞利散射查找表计算得到的精确瑞利散射辐射结果进行比较,验证其精度。图 1 给出 412nm 波段的误差曲线,其它波段与 412nm 波段误差基本相当。从图 1 可以看出,计算误差均小于 0.5%,说明利用加倍法计算瑞利散射辐射是精确的,能够满足海洋水色遥感大气校正对瑞利散射计算的精度要求,可以直接用来生成 COCTS 的精确瑞利散射查找表,且其精度优于 0.5%。

3 卫星姿态对几何角度计算的影响

卫星在轨道坐标系中的姿态由滚动角(roll angle)、俯仰角(pitch angle)和偏航角(yaw angle)来表示,其中偏航角指卫星滚动轴在当地水平面上的投影与轨道方向的夹角。我们分别计算了 2003-01-13 和 2003-07-01 轨道在 1331 种卫星姿态下的太阳、卫星几何角度,这 1331 种卫星姿态由表 2 中的滚动角、俯仰角和偏航角各自取值组合而成。其中滚动角、俯仰角和偏航角均为 0°是正常卫星姿态,在此姿

表 2 卫星滚动角、俯仰角和偏航角取值区间

Table 2 The ranges of satellite roll, pitch and yaw angles

卫星姿态角	取值
滚动角/(°)	-2.5, -2.0, -1.5, -1.0, -0.5, 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5
俯仰角/(°)	-2.5, -2.0, -1.5, -1.0, -0.5, 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5
偏航角/(°)	-2.5, -2.0, -1.5, -1.0, -0.5, 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5

态下计算得到的太阳、卫星几何角度为正确值,而在其它姿态下计算的几何角度为偏移值,误差即为偏移值与正确值之差。为了清楚地显示滚动角、俯仰角和偏航角对瑞利散射计算的影响,下文在研究其中某一姿态角影响时,假定其它两个姿态角为 0°。不同姿态下,太阳、卫星几何角度计算误差见图 2、图 3 和图 4,限于篇幅,只给出 2003-07-01 轨道。从图 2、图 3 和图 4 可以看出,卫星姿态角对太阳天顶角的影响很小,当卫星 3 个姿态角小于 2.5°时,太阳天顶角误差小于 1°。滚动角对卫星天顶角影响最大,当滚动角为 2.5°时,卫星天顶角影响达 3°以上。俯仰角对太阳、卫星相对方位角影响最大,当偏航角为 2.5°时,方位角影响近 30°。从下文分析可以知道,尽管方位角影响很大,但其对瑞利散射计算影响很小。偏航角对太阳、卫星几何角度影响都不大。

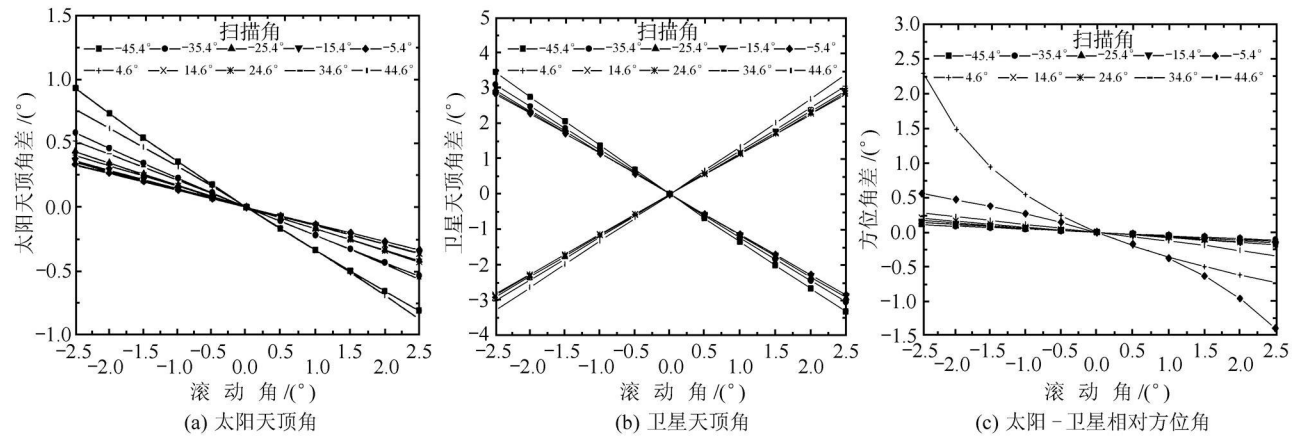


图 2 卫星滚动角对太阳、卫星几何角度计算的影响

Fig.2 The calculation error of the relative geometry of sun and sensor with the effect of the satellite roll angle

4 卫星姿态对瑞利散射计算精度的影响

从单次近似计算式可以知道,卫星天顶角对瑞

利散射计算影响较大,主要体现在 $\cos \theta_0$ 因子上,而太阳天顶角、相对方位角对瑞利散射计算的影响主要体现在散射相位函数上。为精确起见,我们采用生成的 COCTS 精确瑞利散射查找表进行分析。图 5

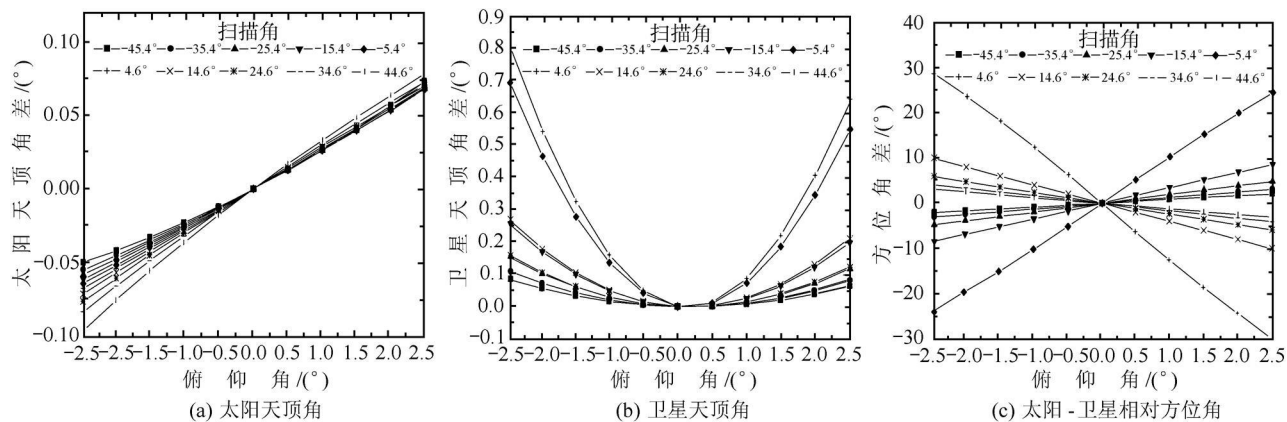


图3 卫星俯仰角对太阳、卫星几何角度计算的影响

Fig 3 The calculation error of the relative geometry of sun and sensor with the effect of the satellite pitch angle

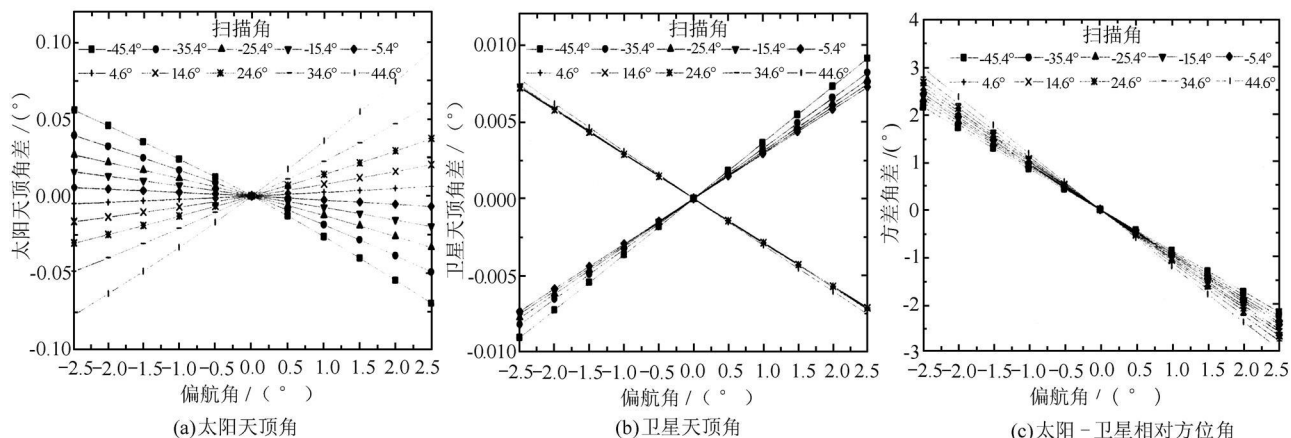


图4 卫星偏航角对太阳、卫星几何角度计算的影响

Fig 4 The calculation error of the relative geometry of sun and sensor with the effect of the satellite yaw angle

为2003-07-01轨道卫星姿态对瑞利散射计算的影响,限于篇幅,只给出瑞利散射影响最大的412nm波段。可以看出,滚动角对瑞利散射计算影响最大,当滚动角为 2.5° 时,瑞利散射计算误差达10%。俯仰角、偏航角对瑞利散射计算的影响很小,一般情况下,当俯仰角、偏航角小于 2° 时,瑞利散射计算误差小于1%。卫星姿态对瑞利散射计算的影响随扫描角递增,因此,对宽视场水色遥感器,卫星姿态的影响更为严重。此外,对具有 $\pm 46^\circ$ 扫描角以上的水色遥感器,要达到瑞利散射计算误差小于1%的目标,卫星滚动角要求小于 0.3° ,这个要求在中国目前已发射的水色遥感器中均未达到,如FY-1D卫星的3轴指向精度设计为俯仰角 0.29° ,滚动角 0.38° 和偏航角 0.42° ,HY-1卫星的3轴指向精度设计为俯仰角 0.4° 、滚动角 0.4° 和偏航角 0.5° 。因此,对中国下一代高精度海洋水色卫星,需要考虑卫星姿态对瑞

利散射计算的影响,否则,很难达到离水辐亮度反演精度5%的目标。

5 结论

卫星姿态直接影响太阳、卫星几何角度的计算精度,进而影响瑞利散射计算精度。研究表明,卫星滚动角对瑞利散射计算影响最大,当滚动角为 2.5° 时,瑞利散射计算误差达10%。俯仰角和偏航角的影响很小,当俯仰角和偏航角小于 2.5° ,瑞利散射计算误差小于1%。若在卫星资料预处理过程中不进行卫星姿态修正,则要求卫星姿态的滚动角小于 0.3° ,才能满足瑞利散射计算精度1%的目标。本文的研究表明,对中国下一代高精度海洋水色卫星,需要考虑卫星姿态对瑞利散射计算的影响,否则,很难达到离水辐亮度反演精度5%的目标。

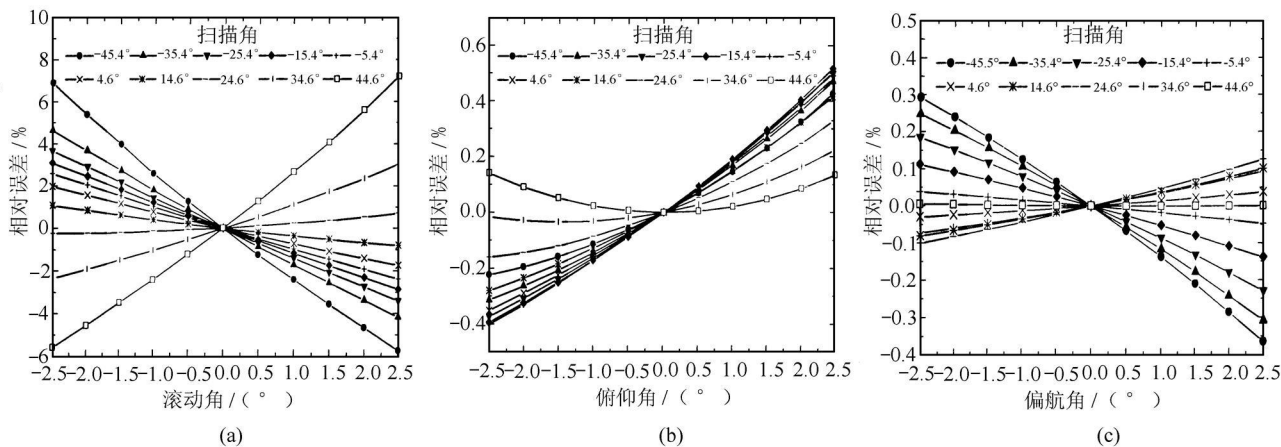


图 5 瑞利散射计算相对误差随卫星姿态角的变化

Fig. 5 The relative error of the rayleigh scattering calculation with the effect of satellite attitude

参考文献 (References)

[1] Howard R Gordon, Wang M H. Surface roughness Considerations for Atmospheric Correction of Ocean Color Sensors. I: The Rayleigh-scattering Component [J]. *Applied Optics*, 1992, **31**, 4247—4259

[2] Howard R Gordon, James W Brown, Robert H Evans. Exact Rayleigh Scattering calculations for Use with the Nimbus-7 Coastal Zone Color Scanner [J]. *Applied Optics*, 1988, **27**:862—871.

[3] Mao Z H, Huang H Q, Zhu Q K, et al. The Atmospheric Correction Algorithm of SeaWiFS Data in China Sea [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, **32**(6): 581—587. [毛志华, 黄海清, 朱乾坤等. 我国海区 SeaWiFS 资料大气校正 [J]. 海洋与湖泊,

2002, **32**(6):581—587.]

[4] Wei J, Chen C Q, Shi P. A Practical Algorithm for Atmospheric Correction of SeaWiFS Data [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2002, **24**(4):118—126. [韦钧, 陈楚群, 施平. 一种实用的二类水体 SeaWiFS 资料大气校正方法 [J]. 海洋学报, 2002, **24**(4):118—126]

[5] Evans K F, Stephens G L. A New Polarized Atmospheric Radiative Transfer Model [J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 1991, **46**(5):413—423

[6] Hulst H C. A New Look at Multiple Scattering [R]. Tech. Rep., NASA Institute for Space Studies, New York, 1962

Effects of Satellite Attitude on the Rayleigh Scattering Calculation

HE Xian-qiang, PAN De-lu, YIN Zhong-lin, WANG Di-feng

(Key Lab. of Ocean Dynamic Processes and Satellite Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, China)

Abstract: The accuracy of rayleigh scattering calculation affects the quality of atmospheric correction of the ocean color remote sensing significantly. This paper studies how satellite attitude affect the accuracy of the rayleigh scattering calculation. Satellite attitude directly affects the calculation of the relative geometries of sun and sensor, which determine the rayleigh scattering radiance. The results show that roll angle affects rayleigh scattering calculation markedly, and the calculation error can reach 10% as the roll angle is 2.5°. However, the effects of the pitch angle and yaw angle are small, and the calculation error is only 1% as the pitch angle or yaw angle is 2.5°. The result also shows that in order to achieve the 1% accuracy goal of the rayleigh scattering calculation, the satellite roll angle should be less than 0.3° if the satellite attitude isn't corrected in the ocean color remote sensing data preprocessing stage.

Key words: rayleigh scattering; ocean color remote sensing; satellite attitude