

基于海浪模型的海洋反射率计算

麻金继^{1,2}, 杨世植²

(1. 安徽师范大学 物理与电子信息学院, 安徽芜湖 241000; 2. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所 合肥 230031)

摘要: 实验证明海洋反射率比较小, 但用卫星遥感海洋特性时, 一个重要参量就是海洋反射率, 因而对它的精确计算具有十分重要的意义. 我们提出了一种新的计算海洋反射率的模型——海浪模型, 实验已经证明在一类水情况下, 海浪模型是完全正确的. 本文在理论上研究了影响海洋反射率的因素, 得到了海洋反射率与其相关的曲线, 这些结论对计算海洋——大气系统的辐射传输方程有实际作用.

关键词: 海洋; 辐射传输; 反射率

中图分类号: P407.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2443(2005)01-0031-04

在海色遥感中, 海洋表面作为大气系统的一个下垫面有着重要的作用. 它的散射与吸收特性直接影响星上成像光谱仪接收的有关海洋特性信号的强弱, 也是影响海洋——大气系统辐射传输精确计算的一个重要因子. 反映海洋特性的一个重要量就是海洋反射率, 实验已证明海洋反射率较小^[1], 因而对它的精确计算具有重要的意义.

1 原理

1.1 辐射传输方程

如果把海洋上空的大气看作水平均一的, 以平行平面来分, 则大气的辐射传输方程^[2]:

$$\mu \frac{\partial I(\tau, \mu, \phi)}{\partial \tau} = I(\tau, \mu, \phi) - J(\tau, \mu, \phi), \quad (1)$$

其中源函数为:

$$J(\tau, \mu, \phi) = \frac{\omega_0}{4\pi} \left[\int_{\omega'} P(\tau, \mu, \phi; \mu', \phi') I(\tau, \mu', \phi') d\omega' + P(\tau, \mu, \phi; -\mu_0, \phi_0) \pi F_0 e^{-\tau/\mu_0} \right], \quad (2)$$

边界条件为:

$$I(0, -\mu, \phi) = 0, \quad (3)$$

$$I(\tau_b, +\mu, \phi) = \int_{\omega'} R(+\mu, \phi; -\mu', \phi'; \chi) I(\tau_b, -\mu', \phi') d\omega' + R(+\mu, \phi; -\mu', \phi'; \chi) \pi F_0 e^{-\tau_b/\mu_0}. \quad (4)$$

在(1)和(2)式中, I 是光强, τ 是大气光学厚度, πF_0 为太阳在 $(-\mu_0, \phi_0)$ 内的辐射通量, ω_0 为单次散射反照率, μ 是出射天顶角的余弦值, ϕ 是出射方位角, μ' 是入射天顶角的余弦值, ϕ' 是入射方位角, P 是散射相函数; 在(3)和(4)中 τ_b 是从大气顶到海洋平面的总的大气光学厚度, R 是海洋表面反射率.

1.2 海洋表面的反射率

若在矢量(VRT)辐射传输方程中, R 是一个反射矩阵, P 是散射相矩阵. 为简单起见, 本文只讨论标量(SRT)的辐射传输方程, 此时 R 是反射率, 它主要有白帽反射率, 海水的镜面反射率, 以及离水辐射反射率三部分组成. 即

$$R(+\mu, \phi; -\mu', \phi'; \chi) = R_{wc}(W, \lambda) + (1-W)R_{g1}(+\mu, \phi; -\mu', \phi'; \lambda) + (1-R_{wc}(W, \lambda))R_{sw}(+\mu, \phi; -\mu', \phi'; \lambda) \quad (5)$$

收稿日期: 2004-09-06

基金项目: 国家 863 计划重点项目资助(8633081903).

作者简介: 麻金继(1975-), 男, 安徽当涂人, 讲师, 中国科学院硕士研究生; 杨世植(1964-), 男, 安徽肥东县人, 研究员, 硕士生导师.

在(5)式中, W 是一个与风速有关的量, 表示白帽覆盖海洋表面的比例; $W = 2.956 \times 10^{-6} \times u_{10}^{3.52}$, u_{10} 是风速; R_{wr} 是白帽的反射率, R_{g1} 是海水的镜面反射率, R_{sw} 是离水辐射反射率. 根据文献[3], 白帽反射率可表示为:

$$R_{wr} = W \times R_{ef}(\lambda), \quad (6)$$

$$R_{g1}(\mu, \phi; -\mu', \phi'; \lambda) = \frac{\pi P(Z_x', Z_y') R_{fn}(n, \mu, \phi; -\mu', \phi')}{4\mu\mu' \cos^4 \theta_0}. \quad (7)$$

(7) 式中 θ_0 如图 2 中所示, R_{fn} 是非涅耳反射系数, n 是海水的折射率, $P(Z_x', Z_y')$ 的分解如图 2 所示^[4]. 离水辐射反射率可表示成下式:

$$R_{sw}(\mu, \phi; -\mu', \phi'; \lambda) = \frac{R_w(\lambda) t_d(\mu) t_u(\mu')}{n^2(1 - a^* R_w(\lambda))}. \quad (8)$$

其中 n 是海水的折射率, a 可看作常数^[5], $t_d(\mu)$ 向下辐射透过率, $t_u(\mu')$ 向上辐射透过率.

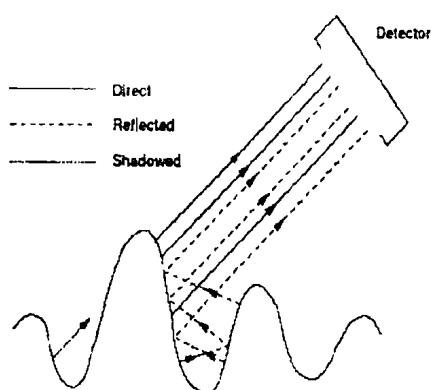


图1 探测器接收海水表面能量示意图

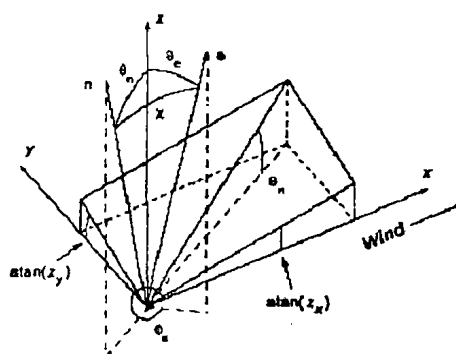


图2 海洋粗糙表面浪面分解示意图

由文献[4], 离水辐射反射率 $R_w(\lambda)$ 可以表示成下式:

$$R_w(\lambda) = 0.33 \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda)}, \quad (9)$$

其中

$$b_b(\lambda) = \frac{1}{2} b_w(\lambda) + (0.002 + 0.02(0.5 - 0.25 \lg C)) \frac{0.550}{\lambda} \times 0.3 \times C^{0.62}. \quad (10)$$

在文献[5]中, 已经给出了一类水的总吸收系数 $a(\lambda)$ 和水分子的散射系数 $b_w(\lambda)$ 的相关值, (10) 式中的 C 表示海水的叶绿素含量. 由(5) - (10) 式可知海洋的反射率除了与太阳的天顶角、方位角以及观察天顶角、方位角有关外, 还与风速、风的方位角和海水的叶绿素含量、盐份和波长有关.

2 验证

已有实验^[6]和 COVE 模型^[7]验证了海浪模型的正确性. 图 3 是 COVE 模型、实验实测数据和海浪模型的结果对比, 在 COVE 模型计算中, 我们选用太阳天顶角为 30° , 气溶胶光学厚度 0.3, 叶绿素含量为 0.2 mg/m^3 , 风的速度为 6 m/s ; 在海浪模型计算中, 参数用 COVE 模型相同的值, 其它参量是, 风的相对方位角为 60° , 测量相对方位角为 800167 , 盐份为 60ppt.

为了减小实测值的误差, 在图 3 中的实测值采用多次测量的平均值. 从图中的曲线我们发现, 在 $400 \text{ nm} - 750 \text{ nm}$ 时, 海浪模型的计算结果与实测结果非常相似, 以后我们将专文比较两种模型的优缺点. 简单地说, 在计算一类水时 COVE 模型不如海浪模型, 但从一类水向二类水过渡时, COVE 模型比海浪模型好得多.

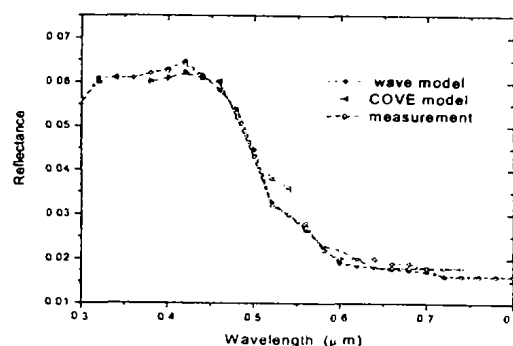


图3 海浪、COVE 模型计算值和实测结果对比曲线

3 分析与结论

3.1 参数的选择

根据原理式(5)编写一简单的程序计算了选择不同参数改变时, 海洋反射率相应的值. 为了叙述不重复, 凡在下面计算中没有定义的参量, 我们选择它们的基本值为: 风速为 6m/s ; 风的相对方位角为 80° ; 太阳天顶角 30° , 方位角为 0° ; 观察天顶角为 0° , 方位角为 60° ; 叶绿素含量为 0.2mg/m^3 ; 盐份为 80ppt .

3.2 分析

从图 4 中, 我们可以发现(1)、在 $300\text{nm} - 760\text{nm}$ 之间海洋反射率的变化较大, 760nm 到红外处海洋反射率几乎是常数;(2)、在 300nm 到 490nm 之间, 海洋反射率随着叶绿素浓度的增大而减小, 而在 490nm 到 760nm 之间海洋反射率随着叶绿素浓度的增大而增大;(3)、一般情况下(一类水, 同参量), 海洋反射率在 410nm 处达到最大值.

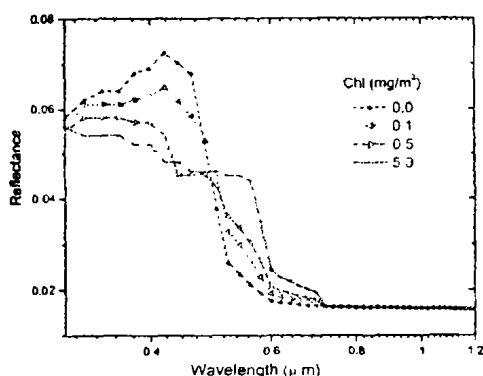


图 4 海洋反射率随波长、叶绿素的变化曲线

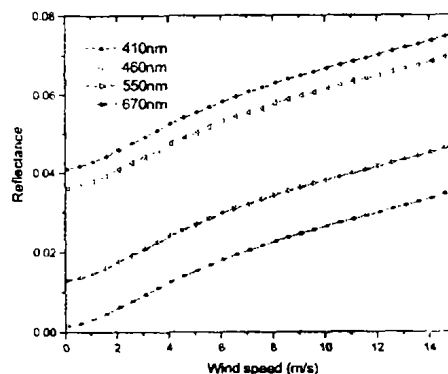


图 5 海洋反射率随风速的变化曲线

从图 5 中, 我们可以得到, 海洋反射率随着风速的增加而增大; 而在相同风速的情况下, 叶绿素浓度为 0.2mg/m^3 时, 海洋反射率随着波长的增加而增大.

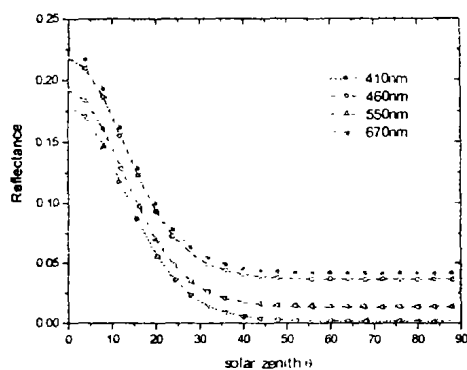


图 6 海洋反射率随太阳天顶角的变化曲线

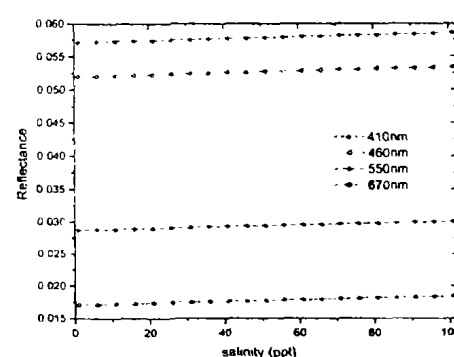


图 7 海洋反射率随海水盐份的变化曲线

图 6、7 分别表示了海洋反射率与太阳天顶角和海水含盐量的变化曲线. 从图 6、7 中我们可以得到, 海洋反射率随太阳天顶角的增大而减小; 随海水盐份的增加而略有增大. 图 6 中我们还可发现, 太阳天顶角在 0° 到 40° 角内变化时, 海洋反射率变化较大; 而它在 40° 到 90° 角内变化时, 海洋反射率几乎没有改变.

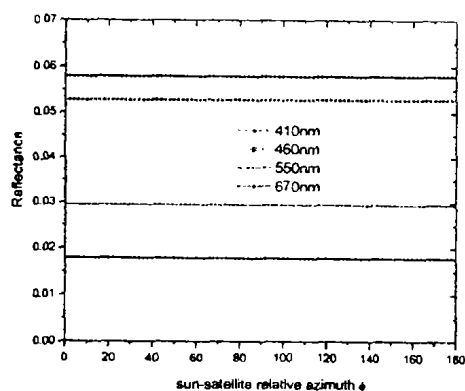


图 8 海洋反射率随观察相对方位角的变化曲线

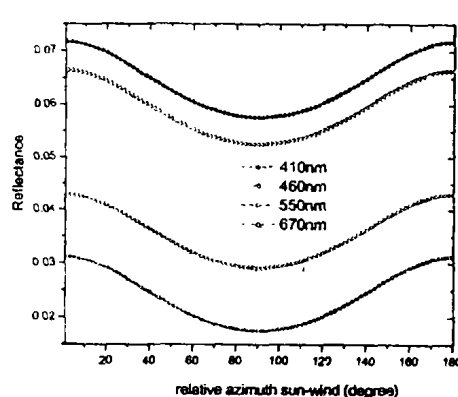


图 9 海洋反射率随风的相对方位角的变化曲线

图 8、9 分别表示了海洋反射率与观察相对方位角和风的相对方位角的变化曲线. 从图中可以得到, 随着观察相对方位角的改变海洋反射率几乎不变; 但风的相对方位角的改变对海洋反射率有较大的影响. 当风的相对方位角从 0° 增加到 90° 时, 海洋反射率从最大值减小到最小值; 当风的相对方位角从 90° 增加到 180° 时, 海洋反射率从最小值增加到最大值, 这种改变以 90° 的轴成轴对称.

3.3 结论

从以上的分析可知: (1)、在可见光波段, 影响海洋反射率的主要因素有: a. 海水叶绿素含量; b. 波长; c. 海水的盐份; d. 风速和风的相对方位角; e. 太阳天顶角; 观察相对方位角对海洋反射率几乎没有影响; (2)、在近红外波段, 影响海洋反射率的主要因素有: a. 海水的盐份; b. 风速和风的相对方位角; c. 太阳天顶角; 其它参量对它几乎没有影响.

参考文献:

- [1] Chandrasekhar S. Radiative Transfer[M]. Oxford University Press, 1950, 393.
- [2] Koepke P. Effective Reflectance of Oceanic whitecaps[J]. Applied Optics, 1984, 23: 1816 - 1842.
- [3] Cox C and Munk W H. The measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun glitter[J]. J Opt Soc Amer, 1954, 44: 838 - 850.
- [4] Jerlov N G and Steeman Nielsen Eds E. The remote sensing of spectral radiance from below the ocean surface[J]. Optical Aspects of Oceanography, 1974, 15: 317 - 344.
- [5] Morel A and Prieur L. Analysis of variations in ocean color[J]. Limnol Oceanogr, 1977, 22: 709 - 722.
- [6] Zhao F, Li Y, Dong C etc. An algorithm for determination of aerosol optical thickness from AVHRR imagery over oceans[J]. Meteorology and Atmospheric physics, 2002, 80: 73 - 88.
- [7] Zhonghai J, Thomas P and Ken R. Analysis of Broadband solar radiation and albedo over the ocean surface at COVE[J]. Journal of atmospheric and oceanic technology, 2002, 19: 1585 - 1601.
- [8] 曹国荣. 平面波倾斜入射时的夫琅和费衍射花样[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2000, 23(1): 22.

SIMULATION OF THE OCEAN SURFACE REFLECTANCE BASED ON THE WAVE MODEL

MA Jin-ji^{1,2}, YANG Shi-zhi²

(1. College of Physics and Electronic Information, Anhui Normal University, Wuhu 24100, China; 2. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The sea reflectance is very small, which has been proved by lots of experiments, but it is an important parameter when we retrieve the characteristics of the ocean surface by the satellite. Accurately calculating its result is important, so we build a kind of new model to calculate the ocean surface reflectance. The wave model is completely right by the experiment in case I water. In the paper, we study lots of factors which affect the ocean surface reflectance in theory and get the ocean surface reflectance with the related curve. These conclusions are very practical to solve the RTE for Ocean-Atmosphere systems.

Key words: ocean surface; radiative transfer; reflectance

(责任编辑 叶松庆)