

海洋水色卫星的辐射模拟图像研究*

潘 德 炉

R Doerffer

(国家海洋局第二海洋研究所, 杭州)

(Physics Institute GKSS Research Center,
D-2504 Geestchat, Germany)

毛 天 明 李 淑 菁

(国家海洋局第二海洋研究所, 杭州)

摘 要 海洋水色卫星主要用于海洋水色因子, 即叶绿素、悬浮泥沙和黄色物质的定量探测. 卫星上水色扫描仪所接收到的辐射能量绝大部分来自大气的干扰, 而来自海面的甚低, 约为3%~15%, 在卫星水色遥感系统中如轨道参数等稍有不当地, 就可能导致整个卫星工程的失败, 因此在卫星发射前必须仿真卫星入轨后的辐射模拟图像研究, 以便预测卫星图像质量、评价卫星水色资料的利用率和覆盖率.

在一定的卫星轨道参数、水色扫描仪参数、大气和海洋水体的环境参数下, 利用大气、水汽和水体的辐射传递方程, 可以模拟出瑞利散射、气溶胶散射、太阳耀光和水的出射等四大辐射成分的图像和水色扫描仪接收到的总辐射图像. 本文详细地论述了海洋水色卫星辐射模拟仿真的机理和模式, 然后讨论产生模拟图像的方法和过程, 并应用于我国FY-1B卫星、美国的SeaStar卫星和台湾省的ROCSAT-1号卫星的辐射模拟图像研究. 通过这三颗卫星的全轨道模拟图像的辐射特征分析, 发现太阳耀斑是影响水色卫星图像质量的关键因素, 因而本文进一步研究了与太阳耀斑相关的轨道和环境参数, 最后提出了提高水色卫星图像质量和利用率的建议.

关键词 海洋水色 卫星遥感 辐射模拟图像

前 言

自空间技术发展以来, 国际上任何一个成功的卫星空间遥感系统, 如气象卫星、海洋水色卫星、陆地卫星等在其发展的过程中均十分重视模拟传感器入轨后的辐射图像研究. 在预先设计的轨道和传感器的参数下, 仿真大气以及地面目标条件所得到的卫星模拟图像, 在卫

本文于1996-04-15收到, 修改稿于1996-06-12收到.

* 国家自然科学基金(编号: 49493400、49376275)和国家航天办及德国BMFT的资助项目.

星发射前可用于预测和评价遥感系统的图像质量和可能的整体应用水平, 用于验证轨道和传感器的技术指标满足应用需求的合理性, 以便发现问题及时解决. 另外, 使用户对新遥感系统的图像状况有先验的认识, 以便尽早准备图像处理的算法和模式, 以满足应用需求.

海洋水色卫星主要用于海洋水色要素(叶绿素浓度、悬浮泥沙浓度和黄色物质浓度)的探测. 由于水体辐射量甚低, 卫星水色扫描仪所接收的能量85%以上来自大气和太阳反射光的干扰, 因此海洋水色卫星遥感的关键是水色图像资料的利用率. 水色卫星图像的利用率主要受太阳反射光的影响, 使图像饱和. 在图像中太阳反射光耀斑的范围、中心和强度不仅与卫星轨道和扫描仪的视场角等参数相关, 而且与大气和海面水体等环境条件以及卫星过境日期、时间等有关. 合理的轨道参数选择和适当的倾斜扫描可以大大减小太阳反射光耀斑的影响. 我国风云1号 FY-1A 和 FY-1B 的成功经验和深刻教训告诉我们, 卫星轨道和扫描仪技术参数选择合理与否, 涉及到整个卫星项目的成败, 为此有必要开展模拟图像的研究.

在仿真不同的海洋和大气环境下, 根据卫星轨道参数和传感器的技术参数, 运用图像像元点的地理定位和几何参数计算模式、大气和水体次表面辐射传输模式可以模拟出各水色通道的一系列仿真全轨道辐射图像.

1 模拟模式

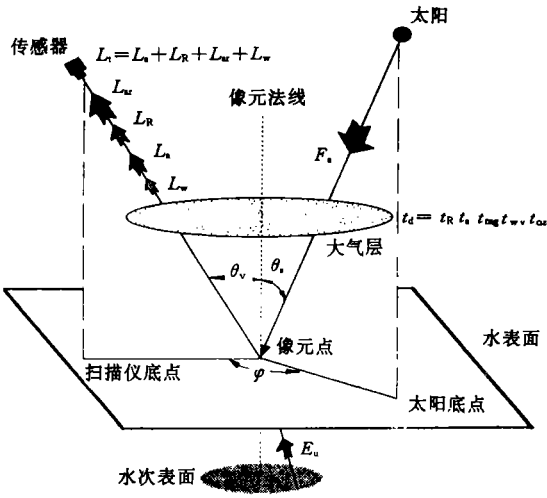


图1 卫星水色遥感原理

来自大气外层的太阳光通过大气的瑞利散射和气溶胶散射, 其中一部分返回到卫星水色扫描仪, 一部分朝前直射和漫散射到达海面. 到达海面的直射光, 其中一部分由于镜面反射有可能穿过大气到达卫星水色扫描仪, 另一部分经水面折射穿过水面, 又受到水色因子如叶绿素、悬浮泥沙和黄色物质等颗粒的散射, 后向散射部分经水面折射离开水面, 穿过大气到达卫星水色扫描仪, 水次表面的另一部分继续向下到达真光层深度, 或到达海底又部分反射, 经折射回到扫描仪. 综上所述, 可能到达卫星水色扫描仪的总辐射量可由下式描述^[1] (图1):

$$L_t(\lambda) = L_r(\lambda) + L_a(\lambda) + L_{sr}(\lambda) + L_w(\lambda) + L_b(\lambda), \quad (1)$$

式中, $L_t(\lambda)$ 为水色扫描仪接收到的总辐射量; $L_r(\lambda)$ 为来自大气瑞利散射; $L_a(\lambda)$ 为来自大气的气溶胶散射; $L_{sr}(\lambda)$ 为来自海面太阳反射; $L_w(\lambda)$ 为来自水面的辐射; $L_b(\lambda)$ 为来自水体底部的反射.

通常可见光不可能到达海洋的底部, 所以式(1)中的最后一项 $L_b(\lambda)$ 可以忽略. 因此, 只要分别求得 $L_r(\lambda)$ 、 $L_a(\lambda)$ 、 $L_{sr}(\lambda)$ 和 $L_w(\lambda)$, 就可以通过模拟计算得到水色扫描仪的总辐射量 $L_t(\lambda)$.

1.1 地理定位和扫描仪-太阳的几何参数计算模式^[2]

在式(1)中所有的项不仅是波长的函数,而且也是扫描仪视场角和太阳高度角及方位角的函数,同时高度角和方位角又都是图像像元点经纬度的函数,于是必须首先对全轨道图像的像元点进行地理定位,即计算出像元点所在的经纬度.

卫星相对于自转的地球运动,星载扫描仪通过反射镜的旋转扫描获取地面信息形成遥感图像.图像中的像元坐标所对应的地理坐标取决于以下二维运动:卫星沿轨道方向前进运动和扫描仪旋转镜垂直于轨道切线方向的扫描运动.因此,如果在一个全轨道卫星图像中已知一个像元的地理坐标,并利用卫星的轨道参数(卫星高度、轨道倾斜角、扫描倾斜角、过赤道时和轨道的周期等)和扫描仪的视场角等参数(视场角、每行扫描点数和行扫描速度等),从原理上讲可以推算出另一个像元点的地理坐标.把卫星升交点或降交点作为图像中心点的地理坐标(GB_m, GL_m),可以推算图像坐标为(X_i, Y_i)像元点的地理坐标(GB, GL),需要作以下坐标变换演算(图2):

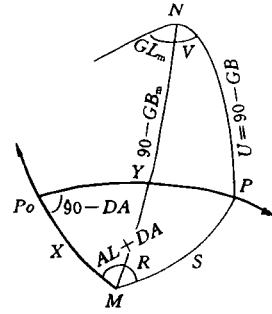


图2 像元地理定位所需的坐标变换示意图

- (1) 从图像平面坐标(X_i, Y_i)变换为以星下点为球心的球面坐标(X, Y);
- (2) 从球面坐标(X, Y)变换为以星下点为极点的极坐标(R, S);
- (3) 从极坐标(R, S)变换为以地球北极为极点的极坐标(U, V);
- (4) 从极坐标(U, V)变换为图像坐标为(X_i, Y_i)像元点的地理坐标(GB, GL).

卫星飞行的轨道有两种,即升轨和降轨.扫描仪的扫描状态有三种,即前、后向倾斜和垂直扫描.在地理定位的算法研究中将考虑到以上六种情况.

1.2 大气透过率模式^[3~5]

大气的透过率可以分解为五部分,由下式表示:

$$t_d = t_r t_a t_{oz} t_{mg} t_{wv}, \quad (2)$$

式中, t_d 为大气总的透过率; t_r 为瑞利散射的透过率; t_a 为气溶胶散射的透过率; t_{oz} 为臭氧的透过率; t_{mg} 为混合气体(如 CO_2, O_2 等)的透过率; t_{wv} 为水汽的透过率. t_r, t_a, t_{oz}, t_{mg} 和 t_{wv} 分别由以下式(3)、(5)、(7)、(9)和(10)求得:

$$t_r = \exp(-0.008735\beta\lambda^{-4.08} \cdot m_a), \quad (3)$$

式中, λ 为波长; β 为体积散射函数; m_a 为大气光学质量, m_a 由下式计算:

$$m_a = [\cos\theta_z + 0.15(93.885 - \theta_z)^{-1.253}]^{-1} \frac{p}{1013.25}, \quad (4)$$

式中, p 为大气压(hPa); θ_z 为观察高度角.

$$t_a = \exp(-\beta\lambda^{-2} \cdot m_a). \quad (5)$$

当水平能见度大于5km时, β 由下式计算:

$$\beta = (0.55)^{\left(\frac{3.912}{Vis} - 0.01162\right)} [0.02422(Vis - 5) + 1.132], \quad (6)$$

式中, α 在 0.5~2.5 范围内, 通常取 $\alpha=1.3$ 适合于大部分大气; Vis 为大气能见度 (km).

$$t_{oz} = \exp(-K_{o\lambda} L m_o), \quad (7)$$

式中, $K_{o\lambda}$ 为臭氧吸收的衰减系数; L 为臭氧的总量 [cm^3 (NTP)]; m_o 为臭氧的光学质量, m_o 由下式计算:

$$m_o = \frac{1.0035}{\cos^2 \theta_z + 0.007^{-0.5}}, \quad (8)$$

$$t_{mg} = \exp\left[\frac{-1.41K_{g\lambda}m_a}{1 + 118.93K_{g\lambda}m_a^{0.45}}\right], \quad (9)$$

式中, $K_{g\lambda}$ 为混合气体吸收的衰减系数.

$$t_{wv} = \exp[-0.2385K_{w\lambda} \cdot W \cdot m_w / (1 + 20.07K_{w\lambda} \cdot W \cdot m_w)], \quad (10)$$

式中, $K_{w\lambda}$ 为水汽吸收的衰减系数; W 为可降水量 (cm); m_w 为水汽的光学质量, 由下式计算:

$$m_w = [\cos \theta_z + 0.0548(92.650 - \theta_z)^{-1.452}]^{-1}. \quad (11)$$

以上讨论了直射光的透过率, 另外经大气瑞利散射和气溶胶的漫散射光也有部分继续朝前传输, 于是就要考虑漫散射光的透过率. 此时大气总的透过率由下式表示:

$$t = t_d + t_s. \quad (12)$$

其中的 t_s 由下式计算:

$$t_s = t_{aa}t_{oz}t_{mg}t_{wv}\left[\frac{1 - t_r^{0.95}}{2} + t_r^{1.5}F_a(1 - t_{as})\right], \quad (13)$$

式中, F_a 为气溶胶的前向散射系数; t_{aa} 为吸收后气溶胶的透过率, 由下式计算:

$$t_{aa} = \exp[-(1 - \omega_a)\tau_a]; \quad (14)$$

t_{as} 为一次散射后的透过率, 由下式计算:

$$t_{as} = \exp(-\omega_a\tau_a m_a), \quad (15)$$

式 (14) 和 (15) 中, ω_a 为气溶胶一次散射比; τ_a 为气溶胶的光学厚度.

在上面所述的透过率计算模式中, 所有成分的透过率都是 θ_z 的函数. 当 $\theta_z = \theta_s$ 时, $t_x(\theta_s)$ 为大气向下的透过率; $\theta_z = \theta_v$ 时, $t_x(\theta_v)$ 为大气向上透过率, 其中 x 为下角码, 表示不同成分的透过率, 如瑞利散射、气溶胶、臭氧、水汽和不同类型的透过率如直射光、漫散射光的透过率.

1.3 大气路程辐射模式^[6]

大气路程辐射包括大气的瑞利散射和气溶胶散射两部分. 无论是瑞利还是气溶胶的贡献, 不仅要考虑一次散射返回到扫描仪的辐射部分, 而且还要考虑一次散射光经海面漫反射到达扫描仪的部分. 由下式计算:

$$L_x = \frac{F_s \tau_x \omega_x p_x}{4\pi \cos \theta_v}, \quad (16)$$

式中, x 为下角码, 如 $x=r$ 表示瑞利散射, $x=a$ 表示气溶胶散射; L_x 为瑞利散射或气溶胶的辐射量; F_s 为太阳的照度 (不同日期则 F_s 有所不同), 由下式计算:

$$F_s = F_0(\lambda) \left[1 + 0.0167 \cos \frac{2\pi(D-3)}{365}\right]^2, \quad (17)$$

式 (16) 和 (17) 中, $F_0(\lambda)$ 为太阳年平均照度; D 为儒历历日; ω_x 是一次散射比; p_x 为向着扫

扫描仪的散射因子, ρ_x 由下式计算:

$$\rho_x(\theta_v, \theta_s) = P_x(\theta^-) + [\rho(\theta_v) + \rho(\theta_s)]P_x(\theta^+), \quad (18)$$

式中, -和+为上角标, -表示从大气直接到扫描仪的方向, +表示从大气到海面, 再向扫描仪方向传输; ρ 为海面漫反射率; $P(\theta^-)$ 为大气的后向散射函数; $P(\theta^+)$ 为大气的前向散射函数; $[\rho(\theta_v) + \rho(\theta_s)]P(\theta^+)$ 表示大气向前散射到达海面, 经反射再向扫描仪散射的贡献. 气溶胶的相函数 $P_a(\theta^\pm)$ 由 Henyey-Greenstein 函数来计算:

$$P_a(\theta^\pm) = \frac{a(1 - g_1^2)}{(1 + g_1^2 - 2g_1\cos\theta^\pm)^{1.5}} + \frac{(1 - a)(1 - g_2^2)}{(1 + g_2^2 - 2g_2\cos\theta^\pm)^{1.5}}, \quad (19)$$

式中, $a=0.983$; $g_1=0.82$; $g_2=-0.55$; $\cos\theta^\pm$ 为

$$\cos\theta^\pm = \pm \cos\theta_v \cos\theta_s - \sin\theta_v \sin\theta_s \cos\varphi. \quad (20)$$

海面漫反射率由下式计算:

$$\rho(i) = 0.5 \left[\frac{\sin^2(i - j)}{\sin^2(i + j)} + \frac{\tan^2(i - j)}{\tan^2(i + j)} \right], \quad (21)$$

式中, i 表示入射角 (θ_s 或 θ_v); j 表示在水下的折射角, 根据 Snell 折射定理得到

$$j = \sin^{-1} \frac{\sin i}{n}, \quad (22)$$

其中, n 为水的折射系数, 海水通常取 4/3.

1.4 太阳光的菲涅耳反射(太阳耀光)模式^[7,8]

太阳光的菲涅耳反射主要受风速所引起的海面波斜度的影响. 用以下一组方程式计算太阳直射光的反射系数 g :

$$g = \frac{\frac{\rho(\omega)\cos\omega}{\cos\theta_v \cos\theta_s}}{\exp\left[\frac{-\tan^2\beta/\sigma^2}{4\pi\sigma^2\cos^4\beta}\right]}, \quad (23)$$

式中, $\sigma=0.003+0.00512V_w$; (24)

$$\omega=0.5\cos^{-1}(\cos\theta_v \cos\theta_s - \sin\theta_v \sin\theta_s \cos\varphi); \quad (25)$$

$$\beta=\cos^{-1}\left(\frac{\cos\theta_v + \cos\theta_s}{2\cos\omega}\right); \quad (26)$$

其中, V_w 为风速. 到达卫星扫描仪的太阳耀光为

$$L_{sr} = F_s t_d(\theta_s) t_u(\theta_v) g \cos\theta_s. \quad (27)$$

1.5 水面出射的模式^[9]

离开水面向上出射包括两部分: 一部分太阳直射光经折射穿过水面, 在水次表面向下传输中受到水色因子如叶绿素、悬浮泥沙和黄色物质粒子的散射, 其中后向散射部分向上经折射离开水面出射; 另一部分在日光的激励下, 海水中的叶绿素会发出一种荧光, 离开水面出射. 离开水面的总辐射为

$$L_w = L_{ws} + L_{wf}, \quad (28)$$

式中, L_{ws} 为可见光离水面出射; L_{wf} 为荧光离水面的出射. 太阳光经水面折射到水次表面向下

传输的照度为

$$E_{wd} = F_s t_d(\theta_s) T_d, \quad (29)$$

式中, E_{wd} 为水次表面向下传输的照度; $t_d(\theta_s)$ 为大气向下总透过率; $T_d(\theta_s)$ 为气水的透过率, 由下式计算:

$$T_d(\theta_s) = (1 - \rho_a) \cos \theta_s, \quad (30)$$

式中, ρ_a 为水面各方向太阳反射率的平均, 通常取 0.06. 经水面折射返回扫描仪的辐射量为

$$E_{wu} = \frac{E_{wd} R T_u(\theta_v) t_u(\theta_v)}{Q}, \quad (31)$$

式中, R 为可见光向上的反照率; Q 为直射光照度向漫散射辐射量的转换因子, 在郎巴面下为 π , 在海面通常取 4.5; $t_u(\theta_v)$ 为大气向上的总透过率; $T_u(\theta_v)$ 为水汽的向上透过率, 由下式计算:

$$T_u(\theta_v) = \frac{1 - \rho(\theta_v)}{n^2}, \quad (32)$$

式中, n 为水体的折射因子, 通常取 $n=1.33$. 可见光向上的反照率 R 可以通过双向传输模式得到:

$$R = \frac{k - a}{k + a}, \quad (33)$$

式中, k 和 a 为次表面水体总的散射系数和吸收系数, 可以把它分为四个不同部分组成, 即纯水、叶绿素、悬浮泥沙和黄色物质, 由下式表示:

$$a_t = a_w + C_c a_c + C_s a_s + C_g a_g, \quad (34)$$

$$K_t = K_w + C_c K_c + C_s K_s + C_g K_g, \quad (35)$$

式中, a_w 和 K_w 为纯水时的吸收和散射系数; (a_c, a_s, a_g) 和 (K_c, K_s, K_g) 分别为叶绿素、悬浮泥沙和黄色物质在单位浓度下的吸收系数和散射系数, 单位为 $\text{mg}^{-1} \cdot \text{m}^3$; (C_c, C_s, C_g) 为水体中叶绿素浓度、悬浮泥沙浓度和黄色物质的浓度, 单位为 mg/m^3 .

在可见光 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 范围内, 水体中叶绿素等色素所吸收的总辐射由下式计算:

$$E_{af} = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} E_d [1 - R(\lambda)] \frac{C_c a_c(\lambda)}{a_t(\lambda)} d\lambda, \quad (36)$$

式中, $\lambda_1 = 0.4 \mu\text{m}$; $\lambda_2 = 0.675 \mu\text{m}$. 水体色素所吸收的辐射经光合作用、生化反应后激励所产生的能量为

$$E_{af} = 0.5 E_{af} F_{ef}, \quad (37)$$

式中, F_{ef} 为荧光效应系数, 取平均值为 0.003.

激励出射的荧光量相对光谱带的分布呈正态高斯分布, 标准偏差为 $\lambda = 10.6 \text{nm}$, 相当于半功率点宽度 25nm, 分布中心 $\lambda_0 = 0.685 \mu\text{m}$. 在某一波长 λ_f 下荧光和分布系数为

$$g(\lambda_f) = (2\pi\lambda^2)^{-1/2} \exp\left[-\frac{(\lambda_f - \lambda_0)^2}{2\lambda^2}\right]. \quad (38)$$

由于太阳的光谱平均穿透深度与荧光光谱的平均水下出射深度不同, 于是有必要建立不同波带范围下的深度加权因子, 即平均消光深度 Z_{ex} 在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 范围用色素吸收进行加权:

$$Z_{\text{ex}} = \frac{\sum_{\lambda=1}^n C_c a_c(\lambda)}{\sum_{\lambda=1}^n K_t(\lambda) C_c a_c(\lambda)}. \quad (39)$$

用以上公式计算的平均出射深度，计算到达水面的荧光量为

$$F_u(\lambda) = \frac{E_{\text{of}} g(\lambda)}{Z_{\text{ex}} K_t(\lambda)}. \quad (40)$$

经水汽界面出射水面到达扫描仪的荧光辐射量为

$$L_{\text{wf}} = F_u(\lambda) T_u(\theta_v) \frac{t_u(\theta_v)}{Q}, \quad (41)$$

式中， $T_u(\theta_v)$ 为水汽透过率。

2 卫星图像模拟过程

辐射模拟图像生成的过程如下（图3）：

(1) 输入以下轨道和扫描仪性能参数计算卫星全轨道图像的像元点地理定位和几何参数^[2]：卫星高度（km）、飞行方向（降轨或升轨）、卫星轨道倾角（°）、卫星轨道周期（min）、卫星过赤道时 ECT （时：分：秒）、过境日期（儒历日）、扫描仪视场角（°）、扫描速率（行/s）、每行的像元数、扫描倾斜角（°）。

由轨道报计算模拟轨道卫星的升交点和降交点，并通过坐标变换计算得到卫星全轨道图像每一像元点的参数：经纬度、太阳的高度角 θ_s 、扫描仪的高度角 θ_v 、太阳与扫描仪之间的方位角 φ （太阳像底点至像元点的连线与扫描仪像底点至像元点连线之间的夹角）。

(2) 运用以上计算的地理和几何参数（ $GB, GL, \theta_s, \theta_v, \varphi$ ），再输入大气参数：大气压（hPa）、臭氧、混合气体及水蒸气的含量 [cm (NTP)]、可降水量（cm）、海面风速（m/s）、垂直能见度（km）。在卫星覆盖的可见光波段范围，计算不同成分和不同方向的大气透过率 $t_r(\theta_s)$ ， $t_r(\theta_v)$ 和光学厚度 τ_x 等大气光学参数。

(3) 输入海洋水体参数：叶绿素、悬浮泥沙和黄色物质浓度，以及模拟海区的水体光学特征，计算水体次表面向上方向散射的反照比 R 在太阳激励下的荧光出射率以及水汽界面的辐射透过率 $T_d(\theta_s)$ 和 $T_u(\theta_v)$ 。

(4) 分别计算到达扫描仪的四大辐射成分：瑞利散射 L_r 、气溶胶散射 L_a 、太阳耀光 L_{sr} 、水体出射 L_w 以及总辐射量 L_t 。

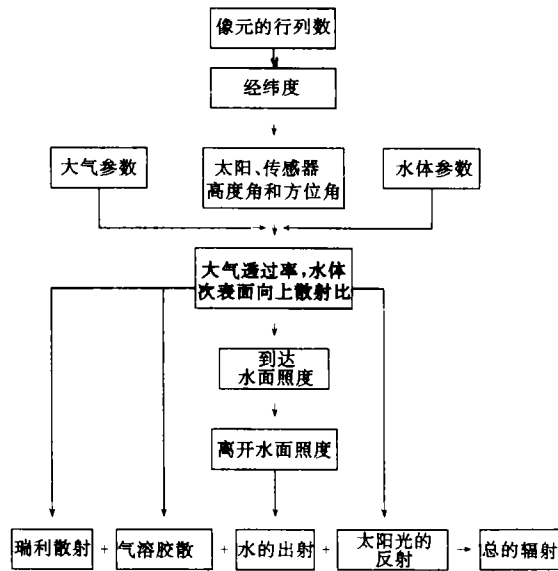


图3 卫星水色遥感辐射模拟过程框图

(5) 最后, 通过以下算法分别把 L_r 、 L_a 、 L_{sr} 、 L_w 和 L_t 的辐射量进行数字化, 产生卫星各波段下的数字模拟图像^[10].

1) 计算各通道的各辐射成分的辐射量:

$$E_x^i = \frac{\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} L_x(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\lambda_1 - \lambda_2}, \quad (42)$$

式中, $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 为通道波长范围; $S(\lambda)$ 为传感器本身的光谱响应; x 为下标, 分别表示 r 、 a 、 sr 、 w 和 t , 即 L_x^i 表示各通道的瑞利散射、气溶胶散射、太阳光反射、水的出射以及传感器接收总辐射量.

2) 计算各波段各辐射成分的照度 F_x^i :

$$F_x^i = L_x^i \delta \pi, \quad (43)$$

式中, δ 为传感器瞬时视场角.

3) 以大气外层照度为标准计算各通道的反照率 A_x^i :

$$A_x^i = \frac{F_x^i}{F_s^i}, \quad (44)$$

式中, F_s^i 为大气外层太阳照度.

4) 通过传感器辐射定标的各通道的增益系数 G_x^i 和截距 I_x^i 以及量化等级, 计算模拟图像的数值 D_x^i 为

$$D_x^i = \frac{A_x^i - I_x^i}{G_x^i}. \quad (45)$$

表1 卫星轨道和扫描仪参数

	卫星			
	FY-1B	SeaStar	ROCSAT-1	
扫描仪	WHRSR	SeaWiFS	OCI	
国家和地区	中国	美国	台湾省	
视场角 (°)	110.86	116.6	60.0	
轨道周期 (min)	102.76	98.88	96.6	
卫星倾斜角 (°)	98.9	98.2	35	
扫描速率 (行/s)	1/6	1/6	1/9	
平均高度 (km)	888.8	705	600	
飞行方向	降轨	降轨	变化	
发射窗口	07:55	12:00	09:00~15:00	
像元数(行)	2048	1285	860	
扫描倾角 (°)	0	0, ±20	0	
量化 (bit)	8	10	10	
通道	1	0.43~0.48	0.402~0.422	0.433~0.453
	2	0.48~0.53	0.433~0.453	0.480~0.500
	3	0.53~0.58	0.480~0.500	0.500~0.520
	4	0.58~0.68	0.500~0.520	0.545~0.565
	5	0.84~0.89	0.545~0.565	0.660~0.680
	6	0.90~0.965	0.660~0.680	0.845~0.088 5
	7	1.58~1.64	0.745~0.785	
	8	3.55~3.93	0.845~0.885	
	9	10.3~11.3		
	10	11.5~12.50		

当扫描仪还未定标时, 由下式确定 G_x^i 和 I_x^i :

$$G_x^i = \frac{2^n F_{\text{sat}}^i}{L_x^{\text{sat}}(i) - L_x^{\text{net}}(i)}, \quad (46)$$

$$I_x^i = g_x^i L_x^{\text{net}}(i), \quad (47)$$

式中, $L_x^{\text{sat}}(i)$ 为扫描仪 i 波带的饱和辐射度指标; $L_x^{\text{net}}(i)$ 为扫描仪 i 波带的等效噪声指标; n 为量化 bit 数.

(6) 把卫星水色扫描仪接收到的总辐射量模拟图像按地理定位结果作麦卡托投影.

3 结果和讨论

运用以上各节所讨论的模式和过程, 对我国1990年9月3日发射的第二颗风云1号气象卫星

FY-1B的甚高分辨率扫描辐射计 VHRSR 的可见光通道,对美国1997年发射的海洋水色卫星 SeaStar 的宽视场水色扫描仪 SeaWiFS,以及对台湾省将于1998年发射 ROCSAT-1号卫星的水色照相机 OCI 进行了模拟,输入的轨道参数和扫描仪参数见表1;输入模拟的大气、海洋水体及其他参数见表2.

表2 输入模拟的大气、模拟日期、海洋水体及其他参数

参数	选择	说明
过境日期	春分、夏至、秋分、冬至	典型太阳高度角日期
大气		
大气压 (hPa)	1013.25	标准气压
臭氧量 cm^3 (NTP)	0.33~0.38	典型大气含量 ^[3]
能见度 (km)	<5, 11, 28, 340	沿海-大洋典型值 ^[3]
可降水量 (cm)	0.4~4.0	沿海-大洋典型值 ^[3]
风速 (m/s)	0~10	沿海-大洋典型值 ^[3]
海洋		
叶绿素浓度 (mg/m^3)	0.05~10.00	中国沿岸-大洋水体典型值
悬浮泥沙浓度 (mg/m^3)	0.5~300.0	中国沿岸-大洋水体典型值
黄色物质浓度 (mg/m^3)	0.0~0.2	沿岸典型值

3.1 模拟图像的辐射分布特征讨论

(1) 在预定卫星轨道和水色扫描仪的视场角等参数下,即使均匀的大气介质和一致的海面,卫星海洋水色图像辐射的空间分布也并不均匀,有的区域因辐射值已饱和而影响图像使用.这是由卫星轨道和扫描仪的参数决定的.卫星图像的利用率及覆盖率与卫星轨道及扫描仪的视场角等参数十分相关.水色资料利用率定义为:可用于水色信息提取的像元数与全轨道图像像元之比.资料的覆盖率可由模拟图像的覆盖范围来定义.比较 FY-1B 卫星、SeaWiFS 卫星和 ROCSAT-1号卫星,由图4可见中国的 FY-1B 和 SeaWiFS 卫星的覆盖率明显优于台湾省的 ROCSAT-1,但只要稍比较一下3颗卫星模拟图像中太阳耀斑的面积,不难看出美国的 SeaWiFS 的资料利用率却明显优于 FY-1B 和 ROCSAT-1.

(2) 在卫星海洋水色遥感中,太阳的耀光是不可避免的,而且它直接以不同程度影响到气溶胶、瑞利散射和水出射的空间分布.以 FY-1B 的 VHRSR 的各辐射成分的模拟图像为例(见图5),太阳耀斑的空间分布呈椭圆形,从椭圆中心向四周扩散,有明显的辐射边界.水体出射的空间分布以太阳耀斑区为中心由强到弱较均匀地向图像边缘扩散.气溶胶的散射分布形状直接受太阳耀光的影响(见图5),在图像的东边缘以赤道为对称,有一像瓜子形的亮斑如扫帚形渐渐向南北双向延伸.瑞利散射受太阳耀光的影响不明显,其原因在于大气中气溶胶散射属米氏散射,它的前向散射系数比瑞利的要大得多,从而使到达海面的漫散射再被反射到水色扫描仪的也大得多.卫星图像总的辐射量是四大辐射成分辐射分量之叠加;四大辐射成分相比较,除太阳耀斑区外,气溶胶辐射量较大,其次为瑞利散射,水体的出射最小,见图5,因此,卫星图像的空间分布从总体上来说与气溶胶的分布十分相似.

(3) 当扫描仪各波段通道的灵敏度和信噪比一致时,归一化后为各波段的辐射值,通常从蓝光到红光波段逐渐减小,这是由于大气中的路程辐射随着波长的增长而变小,如图6所示.

3.2 影响太阳耀斑的主要因素

在受太阳耀斑影响的中心区域,太阳耀斑的辐射几乎掩盖了水的辐射,根本无法从总的

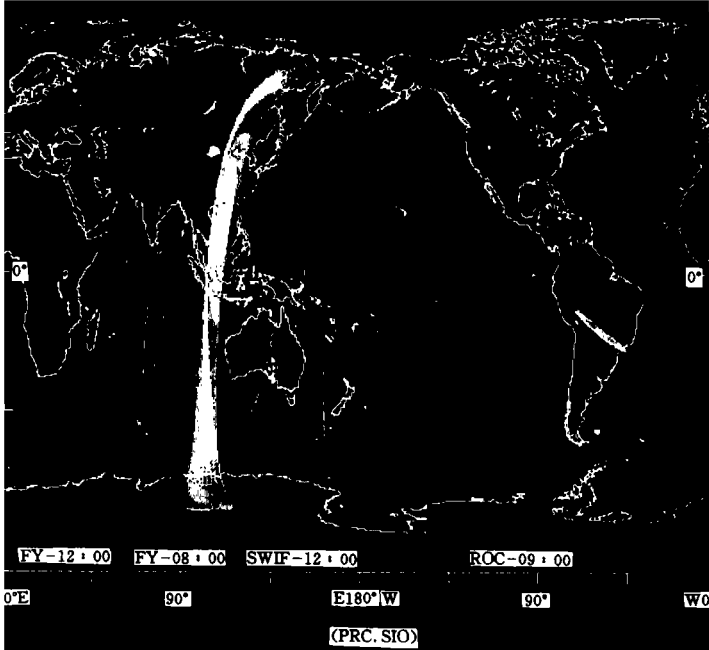


图4 3月21日的典型水色遥感辐射模拟图像

中国 FY-1B VHRSR (3通道)

左1FY-1B ECT=12:00 (中午)

左2FY-1B ECT=08:00 (上午)

左3美国 SeaStar ECT=12:00 (中午)

左4台湾省 ROCSAT-1 ECT=09:00 (上午)

辐射量中提取水色信息. 同时, 该区的大部分像元很可能已处于饱和, 如 VHRSR 的第3通道因太阳耀光饱和的面积分别占整条轨道图像面积的9.5%, 受太阳光影响的边缘区域虽没有饱和, 但由于太阳耀光是水出射的50~100倍以上, 无法用于水色监测的区域又占20%~25%, 所以在海洋卫星水色遥感中有必要研究影响太阳耀光的主要因素.

3.2.1 发射窗口

太阳耀斑的中心位置、范围和辐射度大小受卫星发射窗口的支配. 当卫星发射窗口从上午逐渐向中午12:00变化时, 太阳耀斑的中心位置由图像东边缘渐渐向图像中心偏移, 耀斑覆盖范围由大变小, 分布形状由长的瓜子形逐渐变成椭圆形, 并且椭圆面积逐渐变

小, 到中午12:00变化为一点. 发射窗口在中午12:00时的图像受太阳耀光影响的像元数只是早上08:00的几分之一左右, 于是大大地提高了卫星资料的利用率. 相反, 当发射窗口从中午12:00往后推迟时, 太阳耀斑中心向图像西边缘偏移, 图像受太阳影响渐渐增大, 所以海洋水色卫星发射的最佳窗口应在中午12:00 (图4).

3.2.2 卫星过境日期

经过年内春分、夏至、秋分和冬至典型日期三种卫星的辐射模拟图像分析, 发现太阳耀斑的大小和形状与过境日期无关, 但太阳耀斑的中心位置在纬度方向的移动与卫星过境日期相关. 如图7所示, 太阳耀光中心的纬度与日期大至成正弦函数关系, 春分和秋分时中心落在赤道; 冬至时, 中心落在24°S左右; 夏至时, 落在22°N左右.

3.3.3 海面风速

输入不同海面风速下的模拟图像后发现, 太阳耀光的覆盖范围随风速的增大而增大, 而耀光区域内辐射的强度变化梯度却随风速增大而变小, 如图8所示.

1. The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions and activities related to the business. It emphasizes the need for transparency and accountability in financial reporting.

2. The second part of the document outlines the various methods and techniques used to collect and analyze data. It includes a detailed description of the experimental design and the procedures followed during the study.

3. The third part of the document presents the results of the study, including a comparison of the different methods and techniques used. It discusses the strengths and weaknesses of each approach and provides a summary of the findings.

4. The fourth part of the document discusses the implications of the study and provides recommendations for future research. It highlights the need for further investigation into the effectiveness of the different methods and techniques used.

5. The fifth part of the document provides a conclusion and a summary of the key findings. It reiterates the importance of maintaining accurate records and the need for transparency and accountability in financial reporting.

6. The sixth part of the document provides a list of references and a bibliography. It includes a list of all the sources cited in the document, including books, articles, and other publications.

7. The seventh part of the document provides a list of appendices and a bibliography. It includes a list of all the supplementary materials provided, including data tables, figures, and other documents.

8. The eighth part of the document provides a list of appendices and a bibliography. It includes a list of all the supplementary materials provided, including data tables, figures, and other documents.

