物理学报 Acta Physica Sinica
Chinese Physical Society
Institute of Physics, CAS

亚米级光学卫星影像邻近效应校正

王涛 周楠 易维宁 洪津 刘晓 李新 张权 刘诗雨 李照洲 李凯涛 崔文煜

Adjacency effect correction of optical satellite image with sub-meter spatial resolution

Wang Tao Zhou Nan Yi Wei-Ning Hong Jin Liu Xiao Li Xin Zhang Quan Liu Shi-Yu Li Zhao-Zhou Li Kai-Tao Cui Wen-Yu

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 70, 139101 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20202187
在线阅读 View online: https://doi.org/10.7498/aps.70.20202187
当期内容 View table of contents: http://wulixb.iphy.ac.cn

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

SMILE卫星的表面充电效应
Surface charging effect of the satellite SMILE
物理学报. 2020, 69(16): 165203 https://doi.org/10.7498/aps.69.20200044

气溶胶对大气CO2短波红外遥感探测影响的模拟分析
Simulation analysis of aerosol effect on shortwave infrared remote sensing detection of atmospheric CO2
物理学报. 2018, 67(3): 039202 https://doi.org/10.7498/aps.67.20171993

电磁监测试验卫星离子漂移计探测技术
Ion drift meter aboard China seismo-electromagnetic satellite
物理学报. 2017, 66(20): 209401 https://doi.org/10.7498/aps.66.209401

一种结合图像复原技术的自适应光学系统控制方法
A method of controlling adaptive optical system combined with image restoration technology
物理学报. 2020, 69(6): 068701 https://doi.org/10.7498/aps.69.20191536

基于图像信息熵的ptychography轴向距离误差校正
Correction of axial distance error in ptychography based on image information entropy
物理学报. 2017, 66(16): 164203 https://doi.org/10.7498/aps.66.164203

基于Zernike模型系数优化的椭球型窗口光学系统像差校正
Aberration correction for ellipsoidal window optical system based on Zernike mode coefficient optimization
物理学报. 2020, 69(24): 244203 https://doi.org/10.7498/aps.69.20200933

亚米级光学卫星影像邻近效应校正*

王涛[1)2)] 周楠[1)2)] 易维宁[1)] 洪津[1)] 刘晓[1)] 李新[1)]
张权[1)] 刘诗雨[5)] 李照洲[3)] 李凯涛[4)] 崔文煜[1)†]

1) (中国科学院合肥物质科学研究院, 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 通用光学定标与表征技术重点实验室, 合肥 230031)

2) (中国科学技术大学, 合肥 230026)

3) (中国资源卫星应用中心, 北京 100094)

4) (中国科学院空天信息创新研究院, 遥感卫星应用国家工程实验室, 北京 100101)

5) (安徽省国防科技情报研究所, 合肥 230001)

(2020 年 12 月 22 日收到; 2021 年 2 月 18 日收到修改稿)

邻近效应是指卫星成像过程中目标物周围自然环境反射的太阳辐射对卫星入瞳处目标像元辐亮度的贡献. 它会导致卫星图像清晰度、对比度和信息熵值降低, 并且导致表观反射率卫星影像中目标像元反射率介于其真实反射率和背景像元平均反射率之间, 严重影响定量遥感精度. 背景各像元对邻近效应的贡献权重值主要取决于大气分子光学厚度和气溶胶光学厚度, 以及目标像元与背景像元之间的空间距离、反射率差值. 目前计算该权重值的权重函数仅考虑了光学厚度和空间距离对该权重值的影响. 亚米级空间分辨率卫星影像中地物组合复杂, 相邻地物反射率差值对该权重值的影响要考虑. 本文提出的自适应大气校正算法可根据光学厚度、空间距离和反射率差值来调整背景各像元对邻近效应的贡献权重值. 利用自适应大气校正算法对 GF-2 全色波段卫星影像进行邻近效应校正, 结果表明自适应大气校正算法可有效去除亚米级空间分辨率光学卫星影像中的邻近效应, 提高定量遥感精度, 改善卫星影像质量.

关键词: 邻近效应, 亚米级卫星影像, 自适应大气校正, 定量遥感

PACS: 91.40.Dr, 96.25.Vt **DOI**: 10.7498/aps.70.20202187

1 引 言

邻近效应是指卫星成像过程中目标物周围自然环境反射的太阳辐射对卫星入瞳处目标像元辐亮度的贡献. 大气分子和气溶胶粒子的散射效应导致地面目标反射的太阳辐射有一部分会被散射出瞬时视场角 (记为 L_1), 目标物周围自然环境反射的太阳辐射有一部分会被散射进瞬时视场角 (记为 L_2). 相邻地物反射率差异较小时, L_1 近似等于 L_2, 卫星影像中邻近效应的表观效果不明显. 相邻地物反射率差异较大时, L_1 与 L_2 相差较大, 卫星影像中邻近效应的表观效果较明显, 即卫星影像的视觉效果较模糊[1,2], 表观反射率卫星影像中目标像元反射率介于其真实反射率和背景平均反射率之间[3]. 所以有必要对卫星影像进行邻近效应校正, 以提高定量遥感精度和卫星影像质量. 光学卫星影像空间分辨率越高, 大气能见度越低, 地表反射率组合越复杂, 邻近效应越强[4–10].

邻近效应校正的难点在于很难确定邻近效应范围及该范围内各像元对邻近效应的贡献权重. 邻近效应范围主要取决于卫星载荷空间分辨率、气溶

* 国家重点研发计划 (批准号: 2018YFB0504600) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: cuiwenyu@aiofm.ac.cn

© 2021 中国物理学会 Chinese Physical Society

胶垂直分布和卫星几何观测条件[11], 结合相关参数获取的便捷性以及算法的实用性, 在实际大气校正算法中均采用卫星载荷空间分辨率、550 nm 处的气溶胶光学厚度和几何观测条件来粗略判断邻近效应的范围. 卫星载荷空间分辨率越高、观测天顶角越小、气溶胶光学厚度越大, 邻近效应范围越小. 背景各像元对邻近效应的贡献权重值主要取决于目标像元与背景像元之间的空间距离、反射率差值、大气分子光学厚度和气溶胶光学厚度. 目前计算该权重值的权重函数可分成三类: 第一类是仅考虑空间距离对该贡献权重值的影响, 比如 MODTRAN (moderate resolution atmospheric transmission), FLAASH (fast line-of-sight atmospheric analysis of spectral hypercubes), ATCOR (atmospheric and topographic correction for satellite imagery) 中权重函数表示成径向指数函数[12] 或高斯函数[13]; 第二类是仅考虑光学厚度和空间距离对该权重值的影响, 比如 6 S 中权重函数表示成环境函数[14]; 第三类是采用 Monte-Carlo 模拟光线从卫星入瞳处传输至地表的过程, 并统计距离目标像元一定空间距离内的光子数, 计算该空间范围内各像元对邻近效应的贡献权重[15,16], 上述三类权重函数均没有考虑背景像元与目标像元反射率的差值对邻近效应的影响. 相比于中/低空间分辨率光学卫星影像, 亚米级空间分辨率光学卫星影像地物组合复杂, 相邻像元反射率差值较大. 理论上讲, MODTRAN, FLAASH, ATCOR 和 6S(second simulation of a satellite signal in the solar spectrum) 模型中的邻近效应校正算法均无法对亚米级空间分辨率卫星影像中邻近效应进行有效校正. 基于此现状, 我们开发了自适应大气校正算法来校正亚米级空间分辨率可见光-近红外波段卫星影像中的邻近效应, 其自适应特点是可根据大气分子光学厚度、气溶胶光学厚度、目标像元与背景像元之间的空间距离和反射率差值来调整背景各像元对邻近效应的贡献权重值.

目前只有全色波段卫星影像的空间分辨率为亚米级, 并且 FLAASH 和 ATCOR 只能对多光谱/高光谱卫星影像进行大气校正 (包括大气程辐射校正和邻近效应校正), 无法对全色波段卫星影像进行大气校正. 所以本文以嵩山辐射定标场 GF-2 全色波段 (空间分辨率为 0.81 m) 卫星影像为例, 分别利用自适应大气校正算法、6S 辐射传输模型中的大气校正算法和 MODTRAN 辐射传输模型中的大气校正算法对其进行邻近效应校正, 并利用地面同步实测地物反射率与上述三个大气校正算法校正后的卫星影像中相应区域的平均反射率比较, 以验证自适应大气校正算法对亚米级空间分辨率卫星影像定量遥感精度和图像质量提升效果.

2 方 法

2.1 大气校正算法介绍

2.1.1 自适应大气校正算法

卫星入瞳处背景像元辐亮度 ($L_{\text{background}}$) 和卫星入瞳处目标像元辐亮度 (L_{target}) 的比值 ($L_{\text{background}}/L_{\text{target}}$) 可表示邻近效应的相对大小[17]. 图 1 给出了模拟不同目标像元反射率与背景像元反射率组合情况下的 $L_{\text{background}}/L_{\text{target}}$ (输入的大气参数和几何观测参数如表 1 所示). 图 1 中的数据表明, 目标像元反射率与背景像元反射率组合不同时, 比值 $L_{\text{background}}/L_{\text{target}}$ 不同, 并且该比值随背景

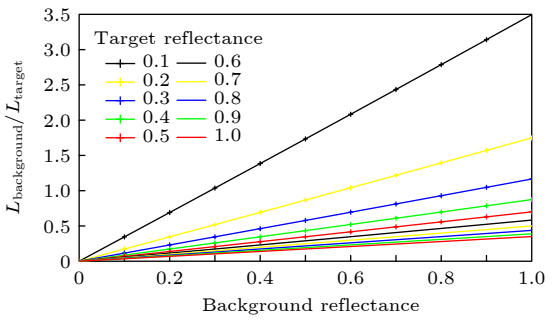

图 1 不同目标像元反射率与背景像元反射率组合情况下的 $L_{\text{background}}/L_{\text{target}}$

Fig. 1. The value of $L_{\text{background}}/L_{\text{target}}$ for different combinations of target reflectance and background reflectance.

表 1 大气参数和观测几何条件

Table 1. Atmospheric parameters and observed geometric conditions.

成像时间	2020-03-20 11:28:33
太阳天顶角/(°)	37.8709
太阳方位角/(°)	152.372
观测天顶角/(°)	12.503
观测方位角/(°)	97.6684
气溶胶类型	大陆型气溶胶
气溶胶光学厚度 (550 nm)	0.4018
大气模式	中纬度夏季
波段	0.4—0.9 μm

反射率增大而增大, 随目标反射率增大而减小. 故可利用该比值表示背景像元反射率与目标像元反射率差异对计算背景各像元对邻近效应贡献权重值的相对大小. 将该比值和 6S 辐射传输模型中的辐射传输方程结合, 整理成适用于亚米级空间分辨率可见光-近红外波段卫星影像的大气校正算法. 基于上述原理, 开发的自适应大气校正算法可整理成如下形式:

$$\rho(\gamma_0,\eta_0)=\frac{\dfrac{\rho^*(\theta_s,\ \theta_v,\ \phi_s-\phi_v)}{t_g(\theta_s,\ \theta_v)}-\rho_a(\theta_s,\ \theta_v,\ \phi_s-\phi_v)}{T(\theta_s)\exp(-\tau/\mu_v)}$$
$$-\frac{\left[\dfrac{\rho^*(\theta_s,\ \theta_v,\ \phi_s-\phi_v)}{t_g(\theta_s,\ \theta_v)}-\rho_a(\theta_s,\ \theta_v,\ \phi_s-\phi_v)\right]\cdot s+T(\theta_s)\,t_d(\theta_v)}{T(\theta_s)\exp(-\tau/\mu_v)}\cdot\langle\rho(\gamma_0,\eta_0)\rangle, \tag{1}$$

$$\begin{cases}\langle\rho(\gamma_0,\eta_0)\rangle=\displaystyle\sum_{\gamma=\gamma_0-\delta}^{\gamma_0+\delta}\sum_{\eta=\eta_0-\delta}^{\eta_0+\delta}\left\{\rho_{\text{estimate_real}}(\gamma,\eta)\cdot q(\rho(\gamma,\eta)-\rho(\gamma_0,\eta_0))\cdot\text{GSD}\right.\\ \qquad\left.\times\dfrac{1}{2\pi\sqrt{(\gamma-\gamma_0)^2+(\eta-\eta_0)^2}}\cdot\dfrac{f_R(r)\cdot t_d^R(\theta_v,\lambda)+f_A(r)\cdot t_d^A(\theta_v,\lambda)}{t_d^R(\theta_v,\lambda)+t_d^A(\theta_v,\lambda)}\right\},\\ f_R(r)=0.0744\exp(-0.08r)+0.077(-1.1r),\\ f_A(r)=0.12096\exp(-0.27r)+1.56216(-2.83r),\\ t_d^A(\theta_v,\lambda)=T_{\text{upwards}}^A(\theta_v,\lambda)-\exp(-\tau^A/\cos\theta_v),\\ t_d^R(\theta_v,\lambda)=T_{\text{upwards}}^R(\theta_v,\lambda)-\exp(-\tau^R/\cos\theta_v),\\ q(\rho(\gamma,\eta)-\rho(\gamma_0,\eta_0))=L_{\text{background}}/L_{\text{target}},\end{cases} \tag{2}$$

式中 θ_s, θ_v, ϕ_s, ϕ_v 分别为太阳天顶角、观测天顶角、太阳方位角、观测方位角; τ, τ^A, τ^R 分别为大气光学厚度、气溶胶光学厚度、大气分子光学厚度; δ 是正整数, 表示邻近效应范围; $T(\theta_s)$ 为下行大气总散射透过率; $t_d(\theta_v)$, $T_{\text{upwards}}^A(\theta_v,\lambda)$, $T_{\text{upwards}}^R(\theta_v,\lambda)$ 分别为上行大气总漫散射透过率、上行气溶胶总散射透过率、上行大气分子总散射透过率; t_g 为全路径 (太阳-地表-卫星) 大气总吸收透过率; $\rho(\gamma_0,\eta_0)$, $\langle\rho(\gamma_0,\eta_0)\rangle$, $\rho^*(\theta_s,\theta_v,\phi_s-\phi_v)$, $\rho_a(\theta_s,\theta_v,\phi_s-\phi_v)$, $\rho_{\text{estimate_real}}(\gamma,\eta)$ 分别为目标像元 (γ_0,η_0) 真实反射率、目标像元 (γ_0,η_0) 平均背景反射率、表观反射率、大气本征反射率、预估地表真实反射率; r 为目标像元与背景像元的空间距离; s 为大气半球反照率; GSD 为卫星图像的空间分辨率. 其中 τ, τ^A, τ^R, s, ρ_a, t_g, t_d^A, t_d^R 可通过辐射传输工具计算而得, 预估地表真实反射率 $\rho_{\text{estimate_real}}(\gamma,\eta)$ 可通过假设地表均一的情况下进行迭代方法得到. 该算法的自适应特点是可根据背景像元反射率与目标像元反射率的差值、背景像元与目标像元的空间距离、大气分子光学厚度和气溶胶光学厚度调整背景各像元对邻近效应的贡献权重. 该算法适用于各种大气能见度下且无云或薄云的高空间分辨率全色/多光谱/高光谱卫星影像. 自适应大气校正算法的流程图如图 2 所示.

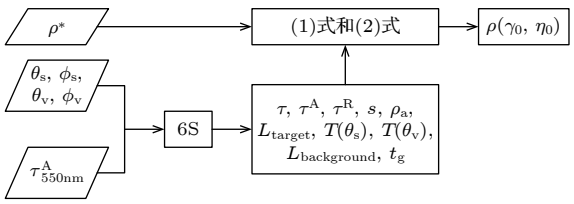

图 2 自适应大气校正算法 (adaptive-AC) 流程图

Fig. 2. Flowchart of the adaptive-AC.

2.1.2 6S 模型中的大气校正算法

6S 模型中的大气校正算法[14] 与自适应大气校正算法的区别在于校正邻近效应时, 自适应大气校正算法同时考虑了目标像元与背景像元空间距离, 以及目标像元与背景像元反射率差值对邻近效应的影响. 而 6 S 模型中大气校正算法没考虑目标像元与背景像元反射率差值对邻近效应的影响, 其校正原理可用 (1) 式和 (3) 式表示.

$$\langle\rho(\gamma_0,\eta_0)\rangle=\sum_{\gamma=1}^{M}\sum_{\eta=1}^{N}\{\rho_{\text{estimate_real}}(\gamma,\eta)\times \text{GSD}\cdot\frac{1}{2\pi\sqrt{(\gamma-\gamma_0)^2+(\eta-\eta_0)^2}}\times\frac{f_{\text{R}}(\text{r})\cdot t_{\text{d}}^{\text{R}}(\theta_{\text{v}},\lambda)+f_{\text{A}}(\text{r})\cdot t_{\text{d}}^{\text{A}}(\theta_{\text{v}},\lambda)}{t_{\text{d}}^{\text{R}}(\theta_{\text{v}},\lambda)+t_{\text{d}}^{\text{A}}(\theta_{\text{v}},\lambda)}. \quad (3)$$

2.1.3 MODTRAN 模型中的大气校正算法

MODTRAN 模型中大气校正算法原理[12]可用 (4) 式和 (5) 式表示:

$$\rho(\gamma_0,\eta_0)=\frac{L^*(\gamma_0,\eta_0)-L_{\text{a}}}{A}-\frac{(L^*(\gamma_0,\eta_0)-L_{\text{a}})s+B}{A}\times\langle\rho(\gamma_0,\eta_0)\rangle, \quad (4)$$

$$\langle\rho(\gamma_0,\eta_0)\rangle=\frac{\langle L^*(\gamma_0,\eta_0)\rangle-L_{\text{a}}}{(A+B)+(L^*(\gamma_0,\eta_0)-L_{\text{a}})s}, \quad (5)$$

上式中 A 是与目标像元相关的参数, B 是与背景像元相关的参数, A 和 B 的取值均取决于大气和几何观测条件, 可通过运行 MODTRAN 辐射传输代码获得[18]; $L^*(\gamma_0,\eta_0)$ 为目标像元 (γ_0,η_0) 表观辐亮度; L_{a} 为大气程辐射; $\langle L^*(\gamma_0,\eta_0)\rangle$ 为目标像元 (γ_0,η_0) 平均背景辐亮度, 即卫星入瞳处目标像元 (γ_0,η_0) 对应的周围像元辐亮度的空间平均值. 空间平均通常用大气点扩散函数表示. 在 MODTRAN 模型中大气点扩散函数一般用高斯函数或指数函数来表示, 它们仅考虑了目标像元与背景像元之间的空间距离对邻近效应的影响, 并未考虑目标像元反射率与背景像元反射率差值对邻近效应的影响.

2.2 大气校正结果评价方法

2.2.1 地表反射率定量分析

大气校正的目的是去除卫星成像过程中大气和目标物周围自然环境散射的太阳辐射对卫星入瞳处目标物辐亮度的影响, 以从卫星影像中获得地表真实反射率. 所以可通过地面同步实测的地表反射率光谱, 结合卫星传感器的相对光谱辐亮度响应函数, 利用 (6) 式得到波段平均反射率[19], 并与校正前后卫星影像中相应区域的平均反射率作比较. (6) 式中的 $\rho_{\text{band_averge}}$ 为波段平均反射率; RSRR 为波段 $(\lambda_1-\lambda_2)$ 对应的相对光谱辐亮度响应函数; ρ_{field} 为地面实测或光谱库里的地物反射率光谱, 本文采用布设在嵩山定标场的地物反射率光谱自动化测量仪器所测的与卫星影像时空同步的地物反射率光谱曲线.

$$\rho_{\text{band_averge}}=\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\text{RSRR}(\lambda)\,\rho_{\text{field}}(\lambda)\,\text{d}\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\text{RSRR}(\lambda)\,\text{d}\lambda}. \quad (6)$$

2.2.2 卫星图像质量评价

大气对太阳辐射的吸收和散射会导致卫星影像变得模糊、低对比度且信息熵值较低. 故可通过分析卫星图像的图像清晰度、对比度、熵值来评价卫星影像大气校正前后的图像质量. 利用 (7) 式将 4 个相邻像素的灰度值沿对角线方向相减得到的平方和作为每个像素的梯度值, 并累加所有像素的梯度值以找到 Robert 清晰度[17]. 利用 (8) 式计算图像平均对比度[20]. 图像平均熵值是指图像的信息混乱度, 可由 (9) 式计算得出, 其中 $P(i)$ 为图像中不同灰度等级的概率[17].

$$\text{CLAR}=\sum_{\gamma}\sum_{\eta}\left\{[f(\gamma{+}1,\eta{+}1)-f(\gamma,\eta)]^2+[f(\gamma{+}1,\eta)-f(\gamma,\eta{+}1)]^2\right\}, \quad (7)$$

$$\text{CONT}=\frac{f_{\max}(\gamma,\eta)-f_{\min}(\gamma,\eta)}{f_{\max}(\gamma,\eta)+f_{\min}(\gamma,\eta)}, \quad (8)$$

$$\text{ENTR}=-\sum\nolimits_i P(i)\cdot\log[P(i)]. \quad (9)$$

3 数据介绍

本文以 2020 年 3 月 20 日嵩山定标场的 GF-2 全色波段卫星影像为例, 其相对光谱辐亮度响应曲线如图 3 所示, 相应的表观反射率图像如图 4(a) 所示, 选取图中编号分别为 1, 2, 3 的矩形区域的平均反射率与地面同步实测反射率作对比, 以验证各大气校正算法对定量遥感精度的提升效果. 表 1 列出了卫星图像对应的大气及几何观测参数, 根据 MODTRAN 中大气模式的定义, 根据卫星影像对应的纬度和日期选择相应的大气模式为中纬度夏季模式[21]. 通过分析 SONET(synchronous optical networking)[22] 的数据, 获得与卫星影像接近时空同步的大气气溶胶光学厚度 (550 nm), 结果如表 1所列, 卫星影像对应的气溶胶光学厚度为 0.4018.

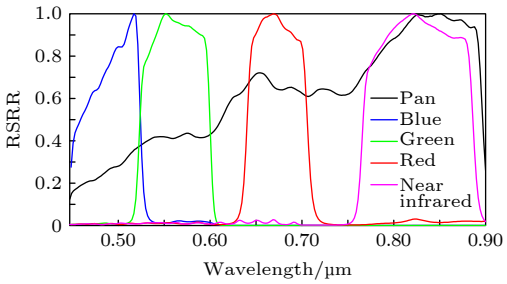

图 3 GF-2 全色及可见近红外波段相对光谱辐亮度响应

Fig. 3. Relative spectral radiance response (RSRR) for GF-2 VNIR bands.

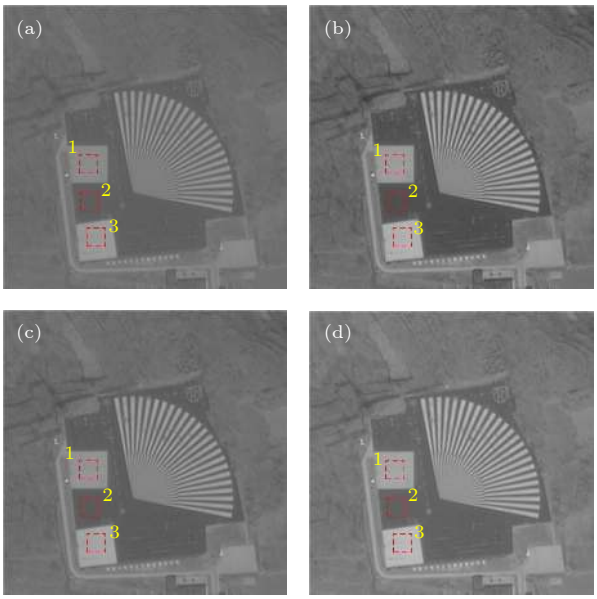

图 4 GF-2 全色波段卫星图像 (a) 表观反射率图; (b) 基于自适应大气校正算法校正后的卫星影像 (记为“adaptive-AC 地表真实反射率图”); (c) 基于 6S 模型中的大气校正算法校正后的卫星影像 (记为“6S-AC 地表真实反射率图”); (d) 基于 MODTRAN 模型中的大气校正算法校正后的卫星影像 (记为“MODTRAN-AC 地表真实反射率图”)

Fig. 4. GF-2 panchromatic band image: (a) Apparent reflectance image; (b) atmospheric correction result based on adaptive-AC (denoted as “adaptive-AC real surface reflectance image”); (c) atmospheric correction result based on the atmospheric algorithm in 6S model (denoted as “6S-AC real surface reflectance image”); (d) atmospheric correction result based on the atmospheric algorithm in MODTRAN model (denoted as “MODTRAN-AC real surface reflectance image”).

4 分析与讨论

利用自适应大气校正算法、6 S 模型中大气校正算法、MODTRAN 模型中大气校正算法对成像区域表观反射率卫星影像 (图 4(a)) 进行大气校正的结果分别如图 4(b)—图 4(d) 所示. 利用 (7) 式—(9) 式计算图 4 中各图的清晰度、对比度和熵值, 结果如表 2 所列. 表 3 给出了图 4 中各图矩形区域内的平均反射率以及对应区域地面同步实测反射率.

表 2 图 4 中各图像的清晰度、对比度、熵值

Table 2. Values of the CLAR, CONT and ENTR for each image in Fig.4.

卫星图像	CLAR	CONT	ENTR
表观反射率图	2184.1856	0.6715	4.9749
adaptive-AC地表真实反射率图	3869.6462	0.8827	5.7793
6S-AC地表真实反射率图	2883.8700	0.7614	5.3759
MODTRAN-AC地表真实反射率图	3925.8358	0.8009	5.8047

表 3 图 4 中各矩形区域的平均反射率

Table 3. Average surface reflectance in the selected area of the four images in Fig. 4.

反射率	矩形区域1	矩形区域2	矩形区域3
地面实测	0.3605	0.0681	0.4756
表观反射率图	0.2589	0.1155	0.3204
adaptive-AC地表真实反射率图	0.3333	0.0805	0.4406
6S-AC地表真实反射率图	0.2953	0.1060	0.3741
MODTRAN-AC地表真实反射率图	0.3788	0.1220	0.4880

对比图 4(b) 和图 4(a), 可以清晰地看出基于自适应大气校正算法校正后的卫星影像视觉效果优于校正前的卫星影像. 从表 2 中的数据可知, adaptive-AC 地表真实反射率图像较表观反射率图像清晰度提高了 0.7717 倍, 对比度提高了 0.3144 倍, 熵值提高了 0.1617 倍. 表 3 中的数据表明, 表观反射率图像中的低反射率地物反射率变高, 高反射率地物反射率变低. 这主要是因为当地物目标反射率大于其周围自然地物平均反射率时, 地面目标物反射的太阳辐射被散射出瞬时视场角的太阳辐射大于地面目标物周围环境反射的太阳辐射被散射进瞬时视场角的太阳辐射, 从而导致表观反射率卫星影像中的高反射地物反射率变低; 当地物目标反射率小于其周围自然地物平均反射率时, 地面目标物周围环境反射的太阳辐射被散射进瞬时视场角的太阳辐射大于地面目标物反射的太阳辐射被散射出瞬时视场角的太阳辐射, 从而导致表观反射率卫星影像中的低反射率地物反射率变低. adaptive-AC 地表真实反射率图像中各红色矩形区域平均反射率与地面实测反射率比较接近, 这说

明自适应大气校正算法可有效移除亚米级空间分辨率卫星成像时大气散射所带来的邻近效应的影响, 恢复卫星影像中地物真实反射率.

对比图 4(c) 和图 4(a), 可以清晰地看出基于 6S 模型中的大气校正算法校正后的卫星影像视觉效果较表观反射率图像有一定提高. 从表 2 中的数据可知, 6S-AC 地表真实反射率图像较表观反射率图像, 清晰度提高了 0.3203 倍, 对比度提高了 0.1338 倍, 熵值提高了 0.0806 倍. 表 3 中的数据表明 6S-AC 地表真实反射率图像较表观反射率图像中相应红色矩形区域的平均反射率更接近地面实测反射率, 但仍具有很大误差. 这主要是因为 6S 模型中的大气校正算法仅考虑了大气分子光学厚度、气溶胶光学厚度和目标像元与背景像元的空间距离对邻近效应的影响, 而没有考虑目标像元反射率与背景像元反射率差值对邻近效应的影响, 以至于 6S 模型中大气校正算法仅能一定程度上移除亚米级空间分辨率卫星影像中的邻近效应, 只能在一定程度上提高定量遥感的精度, 会带来邻近效应校正不足的问题.

对比图 4(d) 和图 4(a), 可以清晰地看出基于 MODTRAN 模型中的大气校正算法校正后的卫星影像视觉效果较表观反射率图像提高了很多. 从表 2 中的数据可知, MODTRAN-AC 地表真实反射率图像较表观反射率图像清晰度提高了 0.7974 倍, 对比度提高了 0.1926 倍, 熵值提高了 0.1668 倍. 表 3 中的数据表明 MODTRAN-AC 地表真实反射率图像中各红色矩形区域平均反射率均大于表观反射率图像中相应区域的平均反射率, 而且采样区域 1(低反射率地物) 中的平均反射率远远高于地面实测反射率, 采样区域 2 和 3(高反射率地物) 的平均反射率均稍高于地面实测反射率. 这主要是因为 MODTRAN 模型中的大气校正算法仅考虑了目标像元与背景像元的空间距离对邻近效应的影响, 而没有考虑气溶胶光学厚度和目标像元反射率与背景像元反射率差值对邻近效应的影响. 利用 MODTRAN 模型中的大气校正算法校正亚米级空间分辨率卫星影像会带来类似上面的过校正的问题.

通过对不同目标像元反射率与背景像元反射率组合情况下的 $L_{\text{background}}/L_{\text{target}}$ 仿真结果 (图 1) 及图 4 和表 3 的分析可知, 用比值 ($L_{\text{background}}/L_{\text{target}}$) 来衡量背景像元反射率与目标像元反射率差值对邻近效应贡献权重值的相对大小是合理的. 在大气分子光学厚度、气溶胶光学厚度、背景像元与目标像元空间距离基础上, 结合背景像元反射率与目标像元反射率差值共同调整背景各像元对邻近效应的贡献权重更接近真实的辐射传输原理. 图 4 和表 3 的数据表明, 从自适应大气校正算法校正后的卫星图像中反演地表反射率较其他两种大气校正算法更合理.

5 结 论

通过上面分析对比可知, 在亚米级空间分辨率卫星影像邻近效应校正过程中, 计算背景各像元对邻近效应的贡献权重值时, 仅考虑目标像元与背景像元空间距离会带来邻近效应过校正问题; 仅考虑目标像元与背景像元空间距离、大气分子光学厚度、气溶胶光学厚度会带来邻近效应校正不足的问题; 既考虑目标像元与背景像元空间距离、大气分子光学厚度、气溶胶光学厚度, 又考虑目标像元与背景像元反射率差值可有效去除邻近效应. 本文开发的自适应大气校正算法可有效移除亚米级/米级空间分辨率光学卫星成像过程中的邻近效应, 恢复卫星成像过程的真实性, 提高低大气能见度条件下的亚米级空间分辨率卫星影像的图像质量和定量遥感精度, 将来可用于亚米级空间分辨率多光谱/高光谱卫星影像的大气校正.

参考文献

[1] Sei A 2015 *Appl. Opt.* **54** 3748

[2] Tanre D, Deschamps P Y, Devaux C, Herman M 1988 *J. Geophys. Res.* **93** 15955

[3] Ma J W, Qin D, Chun F 2006 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **44** 729

[4] Quinten V, Kevin R 2018 *Remote Sens. Environ.* **216** 586

[5] Kaufman Y J 1988 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **26** 441

[6] Malik C, Xavier L, Mireille G, Bruno L, Xavier B, Audrey M, Sylvain J, Yannick D, Veribuque S 2009 *Opt. Express* **27** 319

[7] Warren M A, Simis S G H, Martinez V V, Poser K, Bresciani M, Alikas K, Spyrakos E, Giardino C, Ansper A 2019 *Remote Sens. Environ.* **225** 267

[8] Keukelaere D L, Sterckx S, Adriaensen S, Knaeps E, Reusen I, Giardino C, Bresciani M, Hunter P, Neil C, Van D, Vaiciute D 2018 *Eur. J. Remote. Sens.* **51** 525

[9] Bulgarelli B, Giuseppe Z 2018 *Remote Sens. Environ.* **209** 423

[10] Kiselev V, Bulgarelli B, Heege T 2015 *Remote Sens. Environ.* **157** 85

[11] Minomura M, Kuze H, Takeuchi N 2001 *Opt. Rev.* **8** 133

[12] Guanter L, Richter R, Kaufmann H 2009 *Int. J. Remote*

Sens. **30** 1407

[13] Semenov A A, Moshkov A V, Pozhidayev V N, Barducci A, Marcoionni P, Pippi I 2011 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **49** 2623

[14] Svetlana Y K, Eric F V 2007 *Appl. Opt.* **46** 4455

[15] Ma X S, Guo X Y, Meng X, Yang Z, Peng X D, Li L G, Xie W M 2015 *J. Infrared Millim. Waves* **34** 250 (in Chinese) [马晓珊, 郭晓勇, 孟新, 杨震, 彭晓东, 李立钢, 谢文明 2015 红外与毫米波学报 **34** 250]

[16] Phillip N R, Kendall L C 1995 *Appl. Opt.* **34** 4453

[17] Tang X, Yi W N, Du L, Cui W 2016 *Acta Opt. Sin.* **36** 0228003 (in Chinese) [汤兴, 易维宁, 杜丽丽, 崔文煜 2016 光学学报 **36** 0228003]

[18] Benjamin T, Vincent R, Mireille H, Olivier H, Sebastien M, Gilles B 2016 *Remote Sens.* **8** 696

[19] Richter R 1996 *Comput. Geosci.* **22** 785

[20] Simone G, Pedersen M, Hardeberg J Y 2012 *Vis. Commun. Image R.* **23** 491

[21] Jesús A P, Federico V G, Martin M S, Carlos M D, Eduardo S E, Alfredo P A 2018 *Remote Sens.* **10** 219

[22] Xie Y, Li Z, Li D, Xu H, Li K T 2015 *Remote Sens.* **7** 9928

Adjacency effect correction of optical satellite image with sub-meter spatial resolution*

Wang Tao [1)2)] Zhou Nan [1)2)] Yi Wei-Ning [1)] Hong Jin [1)]
Liu Xiao [1)] Li Xin [1)] Zhang Quan [1)] Liu Shi-Yu [5)]
Li Zhao-Zhou [3)] Li Kai-Tao [4)] Cui Wen-Yu [1)†]

1) (*Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei* 230031, *China*)

2) (*University of Science and Technology of China, Hefei* 230026, *China*)

3) (*China Center for Resources Satellite Data and Application, Beijing* 100094, *China*)

4) (*State Environmental Protection Key Laboratory of Satellite Remote Sensing, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*)

5) (*Anhui Institute of National Defense Science and Technology Information, Hefei* 230001, *China*)

(Received 22 December 2020; revised manuscript received 18 February 2021)

Abstract

The adjacency effect, the contribution of the neighboring pixels to the radiance of the line of sight pixel, is caused by the Rayleigh scattering of atmospheric molecules and Mie scattering of aerosol particles. The adjacency effect will cause the reflectance of each pixel in the apparent reflectance satellite image to be between the real reflectance and the average background reflectance, reducing the accuracy of the surface reflectance inversion. Therefore, it is very important to remove the adjacency effect to improve the accuracy of retrieving the surface reflectance from satellite images. The most critical issue of the adjacency effect is to accurately calculate the weight of the contribution of each background pixel to the adjacency effect. The weight value of the contribution of each background pixel to the adjacency effect mainly depends on the spatial distance between the target pixel and the background pixel, the difference in reflectance between the target pixel and the background pixel, and the optical thickness of atmospheric molecules and the optical thickness of aerosol. At present, the commonly used weight function for calculating the weight value considers only the influence of optical thickness and spatial distance on the weight value. These weight functions are applied to a relatively uniform surface. However, when these weight functions are applied to an inhomogeneous surface, they will greatly reduce the accuracy of the adjacency effect correction. The combination of ground features in satellite images with the sub-meter spatial resolution is complex, so the influence of the difference in reflectance between the target pixel and the background pixel on the adjacency effect must be considered. The adaptive atmospheric correction algorithm proposed in this paper can adjust the weight value of the contribution of background pixels to the adjacency effect according to the spatial distance between the target pixel and the background pixel, the difference in reflectance between the target pixel and the background pixel, and the difference between the atmospheric molecules' optical thickness and aerosol optical thickness. The adaptive atmospheric correction algorithm is used to correct the adjacency effect on GF-2 panchromatic satellite images. The results show that the adaptive atmospheric correction algorithm can effectively remove the adjacency effect in sub-meter spatial resolution optical satellite images, improve both the accuracy of quantitative study and the satellite image quality.

Keywords: adjacency effect, sub-meter satellite image, adaptive atmospheric correction, quantitative remote sensing

PACS: 91.40.Dr, 96.25.Vt **DOI:** 10.7498/aps.70.20202187

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2018YFB0504600).

† Corresponding author. E-mail: cuiwenyu@aiofm.ac.cn