

基于大气校正提升亚米级卫星影像质量

王涛^{1,2}, 周川杰³, 易维宁¹, 洪津¹, 周楠^{1,2}, 方薇¹, 张冬英¹, 杜丽丽¹, 李凯涛⁴, 崔文煜^{1*}¹中国科学院合肥物质科学研究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, 安徽 合肥 230031;²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;³北京市遥感信息研究所, 北京 100085;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

摘要 大气对太阳辐射的吸收和散射会导致卫星影像的亮度和对比度降低, 大气能见度越低、卫星空间分辨率越高, 这种现象越明显, 以至于低能见度条件下的亚米级空间分辨率光学卫星影像看起来非常模糊。基于辐射传输方程开发的自适应大气校正算法充分考虑了大气和目标物周围环境对卫星入瞳处目标辐亮度的影响, 量化描述了目标物周围像元的反射率与目标像元的反射率差异对邻近效应的影响。利用自适应大气校正算法对低大气能见度条件下的亚米级空间分辨率卫星影像进行大气校正, 并且将其与常规图像处理结果进行对比。结果表明, 利用自适应大气校正算法校正后的卫星影像质量得到了明显改善(清晰度提高了 4.5275 倍, 对比度提高了 44.61%, 信息熵值提高了 64.22%)。相对于常规图像处理方法在提升卫星图像质量时会带来噪声和过度增强的问题, 自适应大气校正算法在提升卫星图像质量时不会带来噪声和过度增强问题。

关键词 大气光学; 大气校正; 亚米级卫星影像; 图像模糊; 图像增强; 灰度直方图分布偏移; 灰度直方图分布动态范围

中图分类号 O432

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1101002

Improving Quality of Sub-Meter Satellite Image Based on Atmospheric Correction

Wang Tao^{1,2}, Zhou Chuanjie³, Yi Weining¹, Hong jin¹, Zhou Nan^{1,2}, Fang wei¹, Zhang dongying¹, Du lili¹, Li Kaitao⁴, Cui Wenyu^{1*}¹Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;³Beijing Institute of Remote Sensing Information, Beijing 100085, China;⁴State Environmental Protection Key Laboratory of Satellite Remote Sensing, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract The absorption and scattering of solar radiation by the atmosphere will reduce the brightness and contrast of satellite images. The lower the atmospheric visibility and the higher the satellite spatial resolution, the more obvious this phenomenon, so that the sub-meter spatial resolution optical satellite image under low visibility conditions looks very blurry. The adaptive atmospheric correction algorithm developed based on the radiative transfer equation fully considers the influence of the atmosphere and the surrounding environment of the target on the target radiance at the entrance pupil of the satellite, and quantitatively describes the influence of the reflectance difference between the background pixels and the target pixel on the adjacency effect. The adaptive atmospheric

收稿日期: 2020-11-30; 修回日期: 2021-01-04; 录用日期: 2021-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(41601379)

* E-mail: cuiwenyu@aiofm.ac.cn

correction algorithm is utilized to perform atmospheric correction on sub-meter spatial resolution satellite images under low atmospheric visibility conditions, and the results are compared with processing results of conventional images. The results show that the quality of the satellite image corrected by the adaptive atmospheric correction algorithm has been significantly improved (the image sharpness increases by 4.5275 times, the image contrast increases by 44.61%, and the image information entropy value increases by 64.22%). Compared to conventional image processing methods that will bring noise and excessive enhancement when improving the quality of satellite images, the adaptive atmospheric correction algorithm will not bring noise and excessive enhancement when improving the quality of satellite images.

Key words atmospheric optics; atmospheric correction; sub-meter satellite image; image blur; image enhancement; gray histogram distribution shift; gray histogram distribution dynamic range

OCIS codes 010.1285; 100.2000; 100.2980

1 引言

亚米级空间分辨率光学卫星影像可提供足够的像元来表征地表体积较小的物体的外观特征。卫星对地成像过程中,大气分子和气溶胶粒子对太阳辐射的吸收和散射效应会导致卫星影像灰度分布直方图偏移和动态范围压缩^[1],使得图像视觉效果较模糊。大气能见度越低、卫星载荷空间分辨率越高,则大气散射效应对卫星影像的模糊效应越明显^[2-3]。因此在对亚米级全色卫星影像进行目视解译^[4-5]和定量遥感研究^[6]之前,有必要改善由大气吸收和散射效应导致的图像质量下降问题。

目前主要通过大气校正或常规图像处理来提升卫星图像质量。常规提升图像质量的图像处理法可分为单像素点图像增强法和单像素及其邻域增强法。单像素点图像增强法^[7](常见的有线性拉伸、直方图均衡化拉伸、高斯拉伸、平方根拉伸和对数拉伸)是通过利用直方图拉伸对数字图像中单个像元的灰度值进行变换来增强图像。单像素及其邻域增强法^[8]是通过卷积滤波、数学形态学滤波或纹理分析改变数字图像中单个像元及其相邻像元的灰度值来增强图像。这些方法不考虑大气对卫星成像的影响机理,在提升图像质量的同时降低了卫星影像数据的真实性。大气校正是指去除大气和地球表面目标物周围自然环境对卫星入瞳处目标辐亮度的贡献,以获得成像区域目标真实反射率的过程。可见光、近红外波段的卫星成像过程中的大气校正包含大气吸收校正、大气程辐射校正和邻近效应校正。其中大气吸收校正主要是补偿在传输路径上被大气分子吸收的太阳辐射;大气程辐射校正是指从卫星入瞳处目标像元辐亮度中扣除在大气传输路径上经大气分子和气溶胶粒子后向散射而进入卫星瞬时视场角的太阳辐射(这部分太阳辐射不包含地物信息);邻近效应校正是指从卫星入瞳处目标像元辐亮

度中扣除目标物周围自然环境反射的太阳辐射经大气分子和气溶胶粒子前向散射而进入卫星瞬时视场角的太阳辐射(这部分太阳辐射不包含地物信息)。目前常用的大气校正软件包(如 FLASSH^[9]、ATCOR^[10]、QUAC^[9])均无法对全色波段卫星影像进行大气校正处理,这主要是因为大气校正一般用于卫星或航空多光谱/高光谱遥感影像的定量遥感研究,而全色波段卫星影像的光谱分辨率极低,很少有人用全色波段卫星影像分析地物光谱反射特性,所以上述大气校正软件包均要求输入数据为多光谱/高光谱图像。理论上,大气校正正在改善由大气吸收和散射效应造成的图像模糊现象的同时,保证了卫星影像数据的真实性。所以有必要开发适用于亚米级全色卫星图像的大气校正算法。

本文基于 6S 模型中的辐射传输方程^[11]开发了适用于亚米级全色卫星影像的自适应大气校正算法(简称 adaptive-AC)。该算法充分考虑了大气和周围环境对卫星入瞳处目标物辐亮度的影响,在确保卫星成像真实性的前提下提高图像质量。该算法的自适应特点体现在:它根据气溶胶光学厚度、大气分子光学厚度、背景像元与目标像元的空间距离、目标像元与背景像元反射率差值来调整背景像元对卫星入瞳处目标像元辐亮度的影响权重。WorldView-3(WV-3)全色波段卫星影像是目前可公开获取的空间分辨率最高的卫星影像,本文以 WV-3 全色波段卫星为例介绍 adaptive-AC 对亚米级全色卫星影像质量提升的效果,并且将其与传统图像处理的结果进行比较。

2 基本原理

2.1 自适应大气校正算法

卫星影像的空间分辨率越高、大气能见度越低,相邻地物反射率差值越大,则邻近效应越强^[2]。亚米级空间分辨率光学卫星影像中地物组合复杂(即

地物反射差异较大),故在校正亚米级空间分辨率光学卫星影像中邻近效应时要考虑相邻地物反射率差值对邻近效应的影响。6S模型中的大气校正算法可有效移除大气吸收和大气程辐射对卫星入瞳处目标像元辐亮度的影响,但其无法有效移除亚米级空间分辨率光学卫星影像中的邻近效应,这主要是因为其在计算背景各像元对邻近效应的贡献权重时仅考虑了气溶胶光学厚度、大气分子光学厚度、背景像元与目标像元的空间距离对该权重值的影响,而没有考虑背景像元反射率与目标像元反射率差值对该权重值的影响。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,对于不同的目标反射率与背景反射率组合,该比值不同,并且该比值随背景反射率的增大而增大,随目标反射率的增大而减小。故可利用卫星入瞳处背景像元辐亮度与卫星入瞳处目标像元辐亮度的比值来表示背景像元反射率与目标像元反射率的差值对该背景像元对邻近效应贡献权重值的相对大小。通过将卫星入瞳处背景像元辐亮度和卫星入瞳处目标像元辐亮度的比值($L_{\text{background}}/L_{\text{target}}$)和6S辐射传输模型中辐射传输方程^[11]结合,整理得到自适应大气校正算法为

$$\rho(\gamma_0, \eta_0) = \frac{\rho_1(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) - \rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v)}{t_g(\theta_s, \theta_v)} - \frac{T(\theta_s) \exp(-\tau/\mu_v)}{T(\theta_s) \exp(-\tau/\mu_v)} - \frac{\left[\frac{\rho_1(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v)}{t_g(\theta_s, \theta_v)} - \rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) \right] \cdot s + T(\theta_s) t_d(\theta_v)}{T(\theta_s) \exp(-\tau/\mu_v)} \cdot \langle \rho(\gamma_0, \eta_0) \rangle, \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \langle \rho(\gamma_0, \eta_0) \rangle &= \sum_{\gamma=\gamma_0-\delta}^{\gamma_0+\delta} \sum_{\eta=\eta_0-\delta}^{\eta_0+\delta} \left\{ \rho_{\text{estimate_real}}(\gamma, \eta) \cdot q[\rho(\gamma, \eta) - \rho(\gamma_0, \eta_0)] \cdot G_{\text{GSD}} \times \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{2\pi \sqrt{(\gamma - \gamma_0)^2 + (\eta - \eta_0)^2}} \cdot \frac{f_R(r) \cdot t_{d_R}(\theta_v, \lambda) + f_A(r) \cdot t_{d_A}(\theta_v, \lambda)}{t_{d_R}(\theta_v, \lambda) + t_{d_A}(\theta_v, \lambda)} \right\} \\ f_R(r) &= 0.0744 \exp(-0.08r) + 0.077 \exp(-1.1r) \\ f_A(r) &= 0.12096 \exp(-0.27r) + 1.56216 \exp(-2.83r) \\ t_{d_A}(\theta_v, \lambda) &= T_{\text{up}_A}(\theta_v, \lambda) - \exp(-\tau_A/\cos \theta_v) \\ t_{d_R}(\theta_v, \lambda) &= T_{\text{up}_R}(\theta_v, \lambda) - \exp(-\tau_R/\cos \theta_v) \\ q[\rho(\gamma, \eta) - \rho(\gamma_0, \eta_0)] &= \frac{L_{\text{background}}}{L_{\text{target}}} \end{aligned} \right. , \quad (2)$$

式中: μ_v 为观测天顶角余弦值; γ 和 η 分别为图像中各像元对应的行、列数; $f_R(r)$ 为大气分子对太阳辐射的散射贡献函数; $f_A(r)$ 为气溶胶粒子对太阳辐射的散射贡献函数; $t_{d_R}(\theta_v, \lambda)$ 为大气分子对太阳辐射的上行漫散射透过率; $t_{d_A}(\theta_v, \lambda)$ 为气溶胶粒子对太阳辐射的上行漫散射透过率; λ 为观测波长; $\theta_s, \theta_v, \phi_s, \phi_v$ 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 为正整数,表示邻近效应范围; $T(\theta_s)$ 为下行大气总散射透过率; $t_d(\theta_v), T_{\text{up}_A}(\theta_v, \lambda), T_{\text{up}_R}(\theta_v, \lambda)$ 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; $\rho(\gamma_0, \eta_0), \langle \rho(\gamma_0, \eta_0) \rangle,$

$\rho_1(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v), \rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v), \rho_{\text{estimate_real}}(\gamma, \eta)$ 分别为目标像元(γ_0, η_0)的真实反射率、目标像元(γ_0, η_0)的平均背景反射率、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; G_{GSD} 为卫星空间分辨率。其中 $\tau, \tau_A, \tau_R, s, \rho_a, t_g, T_{\text{up}_A}, T_{\text{up}_R}$ 可通过辐射传输工具计算得到,预估地表真实反射率 $\rho_{\text{estimate_real}}(\gamma, \eta)$ 可在假设地表均一的情况下通过迭代方法得到。该算法具有以下特点:

1) 适用于各种大气能见度下无云或薄云的高空间分辨率全色/多光谱/高光谱卫星影像;

2) 用全路径(太阳-地表-卫星)大气分子总吸收透过率 t_g 表征大气分子对太阳辐射的吸收。大气吸收会减小卫星入瞳处接收到的辐亮度,进而降低

图像整体的亮度。

3) 用大气本征反射率 ρ_a 表征未到达地表且被大气分子和气溶胶散射进瞬时视场角的太阳辐射 (即大气程辐射) 对目标像元反射的太阳辐射的干扰。大气程辐射对低反射率像元的贡献大于对高反射率像元的贡献, 进而降低图像对比度。

4) 用大气半球反照率 s 表征地气耦合过程中背景像元反射的太阳辐射对地面目标接收到的总太阳辐照度的贡献。地气耦合带来的太阳辐射会降低地面邻近物体接收的总太阳辐照度的差值, 进而降低卫星影像对比度。

5) 用等效平均背景反射率 $\langle \rho(\gamma_0, \eta_0) \rangle$ 表征背景像元反射的太阳辐射经大气分子和气溶胶散射进瞬时视场角后对目标像元反射的太阳辐射的贡献 (即邻近效应)。邻近效应会使得目标像元表观反射率介于该像元地表真实反射率和其背景反射率之间, 进而降低图像对比度, 使图像看起来较模糊。

6) 自适应大气校正算法的自适应特点体现在它可根据大气分子光学厚度、气溶胶光学厚度、背景像元与目标像元之间的空间距离以及背景像元反射率与目标像元反射率的差值调整各背景像元对邻近效应的贡献权重值。

2.2 卫星图像质量评价方法

从空间域分析可知, 大气对太阳辐射的吸收和散射会导致卫星影像的灰度分布直方图出现偏移和动态范围压缩, 使得卫星影像变得模糊、对比度较低且信息熵值较低。故可通过分析卫星图像的灰度分布直方图、图像清晰度 (C_{CLAR})、对比度 (C_{CONT})、熵值 (E_{ENTR}) 来评价卫星影像经处理前后的图像质量。将 4 个相邻像元的灰度值沿对角线方向相减得到的值的平方和作为该像元的梯度值, 并累加所有像元的梯度值以得到 Robert 清晰度^[12], 即

$$C_{\text{CLAR}} = \sum_{\gamma} \sum_{\eta} \{ [f(\gamma + 1, \eta + 1) - f(\gamma, \eta)]^2 + [f(\gamma + 1, \eta) - f(\gamma, \eta + 1)]^2 \}, \quad (3)$$

式中: C_{CLAR} 为图像清晰度; $f(\gamma, \eta)$ 为图像中各像元的灰度值。

图像对比度^[13]的计算公式为

$$C_{\text{CONT}} = \frac{f_{\text{max}}(\gamma, \eta) - f_{\text{min}}(\gamma, \eta)}{f_{\text{max}}(\gamma, \eta) + f_{\text{min}}(\gamma, \eta)}, \quad (4)$$

式中: C_{CONT} 为图像对比度; $f_{\text{max}}(\gamma, \eta)$ 为图像中各像元的灰度值的最大值; $f_{\text{min}}(\gamma, \eta)$ 为图像中各像元的灰度值的最小值。

图像熵值是指图像中信息的混乱度, 其计算公式^[12]为

$$E_{\text{ENTR}} = - \sum_i P(i) \cdot \lg[P(i)], \quad (5)$$

式中: E_{ENTR} 为图像熵值; i 为图像中各像元灰度值的灰度等级; $P(i)$ 为图像中不同灰度等级的概率。实验结果如图 1 所示。

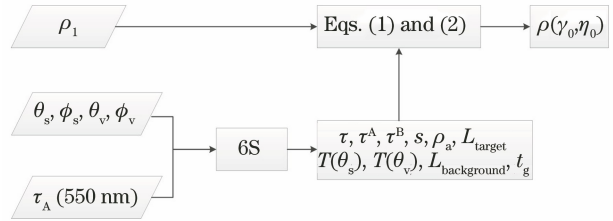


图 1 自适应大气校正算法 (adaptive-AC) 流程图

Fig. 1 Flowchart of adaptive-AC

在频率域中, 图像可以表示成低频和高频两个分量。低频信息位于空间域图像中强度变化较小的区域, 它构成了图像的大部分信息。高频信息位于空间域图像中强度变化较大的区域, 它构成了图像的边缘和精细的细节。大气的吸收和散射效应会导致卫星影像中反射率相差比较大的两个邻近区域中亮的物体变暗, 暗的物体变亮, 以至于表观反射率图像看起来较模糊且对比度较低 (高频信息损失)。故可以通过分析卫星图像的频谱分布来评价图像质量。

3 数据介绍

WV-3 可提供目前能公开获取的空间分辨率最高的全色波段卫星影像 (0.31 m) 和多光谱卫星影像 (1.2 m), 其相对光谱辐亮度响应曲线如图 2 所示。本文以 2018 年 4 月 1 日北京万泉河桥附近区域的 WV-3 全色波段卫星影像为例, 其相应的表观反射率图像如图 3(a) 所示。表 1 列举了图像对应的大气及几何观测参数, 其中依据纬度和日期选择

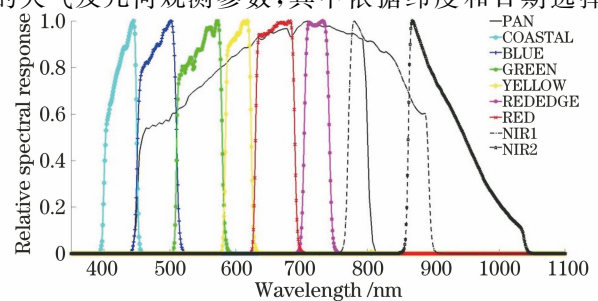


图 2 WV-3 可见光、近红外 (VNIR) 波段相对光谱辐亮度响应曲线

Fig. 2 Relative spectral radiance response curves for WV-3 VNIR band

相应的大气模式为亚北极夏季模式^[9]。通过分析 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)^[14] 和 Synchronous Optical Networking (SONET)^[15] 的数据,得到的结果如表 2 所示。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) 如表 1 所示,卫星影像对应的气溶胶光学厚度为 1.02。

表 1 大气参数和观测几何条件

Table 1 Atmospheric parameters and geometric conditions for observation

Parameter	Condition
Imaging time	2018-04-01T03:45:22
$\theta_s / (^\circ)$	36.1
$\phi_s / (^\circ)$	165.8
$\theta_v / (^\circ)$	25.1
$\phi_v / (^\circ)$	297.2
Aerosol model	Urban
$\tau_A (550 \text{ nm})$	1.02
Atmospheric model	Subarctic summer
Band range / μm	0.45-0.8

表 2 Terra MODIS 产品和 SONET 北京观测站点获得的气溶胶光学厚度和 WV-3 卫星影像时空信息

Table 2 Spatial-temporal information of WV-3 satellite image, AOD of Terra MODIS product, and AOD measured at SONET Beijing site

Data source	Time (UTC)	Site		AOD
		Longitude	Latitude	
SONET Beijing site	2018-04-01T03:49	116.4008°E	40.0003°N	1.0205
	2018-04-01T03:50	116.2628°E	40.2367°N	1.0829
WV-3 image	2018-04-01T03:45	116.2939°E (center)	39.9838°N (center)	—

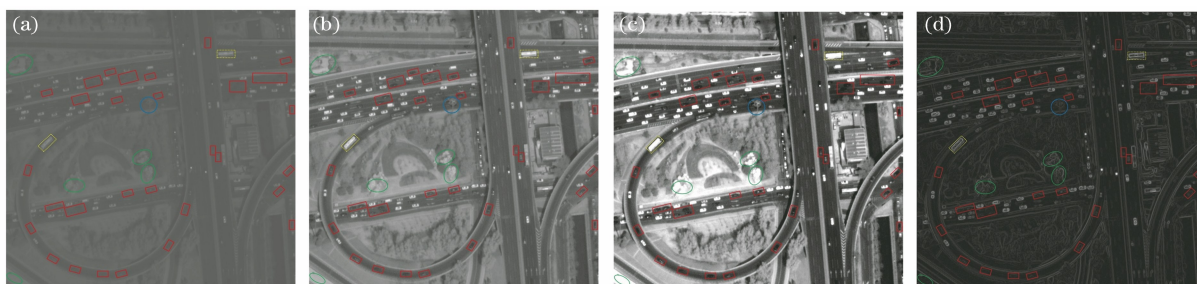


图 3 WV-3 全色波段卫星图像。(a) 表观反射率图; (b) 大气校正后的卫星影像 (记为“adaptive-AC 地表真实反射率图”); (c) 对表观反射率图进行 2% 线性拉伸的结果 (记为“2% 线性拉伸图”); (d) 利用 prewitt 算子对表观反射率图进行滤波的结果 (记为“Prewitt 算子滤波图”)

Fig. 3 WV-3 panchromatic band satellite image. (a) Apparent reflectance image; (b) satellite image after atmospheric correction (denoted as “adaptive-AC real surface reflectance image”); (c) result of 2% linear stretching of apparent reflectance image (denoted as “2% linear stretching image”); (d) result of filtering for apparent reflectance image using Prewitt operator (denoted as “Prewitt operator filtering image”)

4 分析与讨论

利用自适应大气校正算法对成像区域表观反射率卫星影像[图 3(a)]进行大气校正,得到地表真实反射率卫星影像[图 3(b)]。基于单像素点图像增强法对图 3(a)进行处理,结果表明 2% 线性拉伸(图像中最低的 2% 像元灰度值被赋值为 0,最高的 2% 像元灰度值被赋值为 255,而中间 96% 的像元灰度值被线性拉伸到 0~255)的结果最佳[图 3(c)]。基于单像素及其邻域增强法对图 3(a)进行处理,结果表明基于 prewitt 算子^[16]的锐化滤波的结果最佳[图 3(d)]。表 3 给出了图 3 中各图的清晰度、对比度和熵值。

通过对比图 3(b)和图 3(a),可以清晰地看出校正后的卫星影像视觉效果远优于校正前的卫星影像。校正后的卫星影像较校正前的卫星影像的清晰度提高了 4.5275 倍,对比度提高了 44.61%,熵值提高了 64.22%。从图 3(b)中可清晰地看出实线矩形区域内的车辆、圆圈区域内灯塔以及地面标线、地面行驶指示线,这些图像元素在表观反射率图中是无法直接通过目视被解译出来的。

通过对比图 3(c)和图 3(a)可知,2% 线性拉伸图清晰度提高了 3840.8104 倍,对比度提高了 49.14%,熵值降低了 98.6%。从图 3(c)中可清晰地看出实线矩形区域内的车辆、地面标线,以及地面行驶指示线,这些车辆在表观反射率图中是无法直接通过目视被解译出来的。但是通过对比图 3(a)和图 3(c)中虚线矩形区域内的车辆顶部天窗以及椭圆区域内地物可知,2% 线性拉伸图存在过度增强的问题,这不但会影响卫星影像的真实性,更会影响

表 3 图 3 中各图像的清晰度、对比度、熵值

Table 3 Values of C_{CLAR} , C_{CONT} , and E_{ENTR} for each image in Fig. 3

Evaluation parameter	C_{CLAR}	C_{CONT}	E_{ENTR}
Apparent reflectance image	2630.7925	0.6705	3.7323
Adaptive-AC real surface reflectance image	14541.5936	0.9696	6.1292
2% linear stretching image	10107006	1	0.0522
Prewitt operator filtering image	7640	1	3.4112

对卫星影像目视解译的准确度。通过对比图 3(b)和图 3(c)可知大气校正正在提升卫星影像质量的同时也保证了图像信息的真实性。

通过对比图 3(d)和图 3(a)可知,采用 Prewitt 算子得到的滤波图清晰度提高了 1.904 倍,对比度提高了 49.14%,熵值降低了 8.6%。从图 3(d)中可清晰地看出图像中一些自然地物[地面标线、地面行驶指示线]和车辆的边缘得到了增强。但是通过对比图 3(d)和图 3(b)中实线矩形区域内的车辆可知,采用 Prewitt 算子进行滤波会丢失图像中一些典型地物非边缘细节信息,这会减少卫星影像中的信息量,限制其进一步的应用。而地表真实反射率图像中典型地物边缘得到增强,且保留了这些地物的非边缘细节信息。

在空间域中,灰度直方图分布是重要的图像统计特征。大气分子和气溶胶对太阳辐射的吸收和散射会导致卫星影像的灰度分布直方图偏移和动态范围压缩。图 4 为图 3 中各图像的灰度分布直方图。通过对比图 4(a)和图 4(b)可知自适应大气校正算法可有效恢复由于大气吸收和散射造成的图像灰度分布直方图偏移及动态范围压缩问题,这主要是因为基于大气辐射传输原理的自适应大气校正算法充分考虑了大气和周围环境对卫星入瞳处目标物辐亮度的影响,从而充分还原卫星成像过程的真实性。自适应大气校正算法在提高卫星图像质量的同时,既保证了卫星成像过程的真实性,也不会出现常规图像处理所带来的噪声和过度增强的问题。

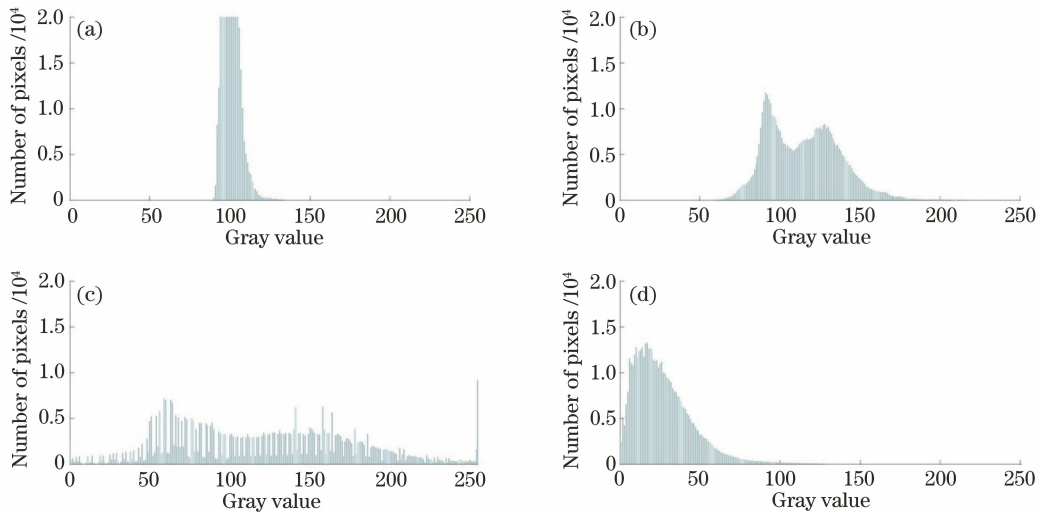


图 4 卫星图像灰度分布。(a)表观反射率图灰度分布;(b) adaptive-AC 地表真实反射率图灰度分布;(c) 2%线性拉伸图灰度分布;(d) Prewitt 算子滤波图灰度分布

Fig. 4 Gray distributions of satellite images. (a) Gray distribution of apparent reflectance image; (b) gray distribution of adaptive-AC real surface reflectance image; (c) gray distribution of 2% linear stretching image; (d) gray distribution of Prewitt operator filtering image

图 5 为图 3 中各图对应的二维离散傅里叶变换频谱图,其中小圆区域为图像的低频信息,小圆和大圆围成的圆环区域为图像的高频信息。通过对比图 3 和图 5 可知自适应大气校正算法和一些常规图像处理算法均可增强图像高频信息,从而增强图像边

缘。但是常规图像处理算法会带来高频信息过度增强问题,而自适应大气校正算法可根据成像时大气状况适当恢复由大气吸收和散射而损失的高频信息。

常见的辐射传输工具(6S、MODTRAN)中自带

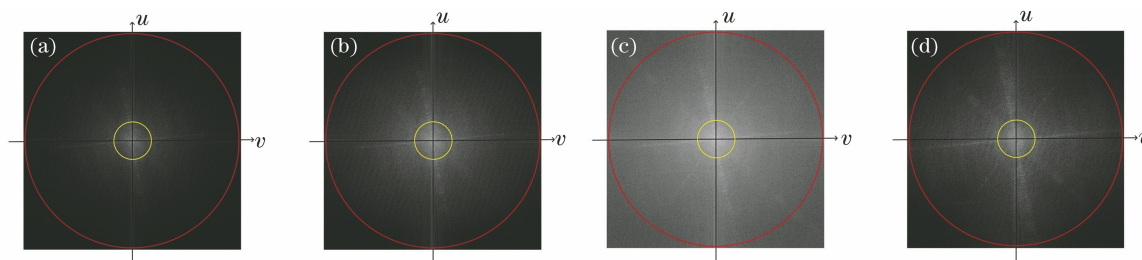


图 5 图像二维离散傅里叶变换的频谱图[小圆区域对应卫星图像的低频信息(该区域内颜色越亮,表明卫星图像中低频信息越多),小圆和大圆围成的圆环区域对应卫星图像的高频信息(该区域内颜色越亮,表明卫星图像中高频信息越多)].(a)表观反射率图的傅里叶频谱图分布;(b) adaptive-AC 地表真实反射率图的傅里叶频谱图分布;(c) 2%线性拉伸图的傅里叶频谱图分布;(d) Prewitt 算子滤波图的傅里叶频谱图分布

Fig. 5 Spectrogram distributions of two-dimensional discrete Fourier transform [small circle area corresponds to low frequency information of satellite image (the brighter the color in this area, the more the low frequency information in satellite image), the area between small and large circles corresponds to high frequency information of satellite image (the brighter the color in this area, the more the high frequency information in satellite image)]. (a) Fourier spectrogram distribution of apparent reflectance image; (b) Fourier spectrogram distribution of adaptive-AC real surface reflectance image; (c) Fourier spectrogram distribution of 2% linear stretching image; (d) Fourier spectrogram distribution of Prewitt operator filtering image

的大气模式均是气候态的结果,可能无法表征卫星成像区域的真实大气状况。因此辐射传输工具中自带的大气模式可能会对大气校正结果带来误差。利用高分辨 ERA5 的再分析资料中的气压廓线和温度廓线替换亚北极大气模式中的气压廓线和温度廓线,水汽廓线和臭氧廓线使用亚北极大气模式中的默认值。结果显示气压廓线和温度廓线替换前后的校正结果基本不变。这主要因为在可见光、近红外波段($0.45\sim 0.8\ \mu\text{m}$),水汽和臭氧对太阳辐射的吸收占大气对太阳辐射吸收的主要部分,而上述对比中水汽廓线和臭氧廓线并未改变。故在卫星影像接近时空同步的水汽廓线和臭氧廓线可获取时,可将其与 ERA5 数据相结合,替换辐射传输工具中自带大气模式中的大气廓线,提高大气校正的精度。

5 结 论

大气分子和气溶胶粒子对太阳辐射的吸收和散射会导致卫星影像的高频信息损失,而且随着卫星影像空间分辨率的提高、大气能见度的降低,卫星影像的高频信息损失越严重。通过上面的对比分析可知,针对由大气吸收和散射造成的卫星图像质量下降问题,常规图像处理算法仅通过更改大气影响后的卫星影像中像元的灰度值来提升卫星图像质量,不能在保证卫星成像过程真实性的前提下,还原由于大气影响而湮灭的信息,同时还会带来噪声和过度增强的问题。在 6S 辐射传输方程的基础上,考虑了目标物周围像元反射率与目标像元反射率差异对

邻近效应的影响,并且用卫星入瞳处背景像元辐亮度与卫星入瞳处目标像元辐亮度的比值来表征目标物周围像元反射率与目标像元反射率差异对邻近效应贡献的相对大小,基于此开发了自适应大气校正算法。自适应大气校正算法的自适应特点体现在其可根据气溶胶光学厚度、大气分子光学厚度、背景像元与目标像元的空间距离、目标像元与背景像元反射率差值来调整背景像元对邻近效应的贡献权重值。自适应大气校正算法可有效去除卫星成像过程中大气和周围环境对卫星入瞳处目标像元辐亮度的影响,恢复成像区域由于大气吸收和散射的影响而湮灭的信息,在保证卫星成像过程真实性的前提下提升卫星图像质量。总之,自适应大气校正算法更适合用来提升卫星图像质量。

参 考 文 献

- [1] Manikandan S, Ebenezer D. A nonlinear decision-based algorithm for removal of strip lines, drop lines, blotches, band missing and impulses in images and videos[J]. EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2008, 2008(1): 485921.
- [2] Kaufman Y J. Atmospheric effect on spatial resolution of surface imagery[J]. Applied Optics, 1984, 23(19): 3400-3408.
- [3] Borel C C, Gerstl S A W. Adjacency-blurring effect of scenes modeled by the radiosity method [J]. Proceedings of SPIE, 1992, 1688: 620-624.
- [4] Yao Q L, Hu X, Lei H. Object detection in remote sensing images using multiscale convolutional neural

- networks[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1128002.
- 姚群力, 胡显, 雷宏. 基于多尺度卷积神经网络的遥感目标检测研究[J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1128002.
- [5] Chen Y T, Li Y Y, Yao T T. Ship detection from remote sensing image under complex sea conditions [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(18): 181007.
- 陈彦彤, 李雨阳, 姚婷婷. 复杂海况下遥感图像舰船目标检测方法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(18): 181007.
- [6] Hu X K, Gao H L, Cheng T H. Atmospheric correction method based on spectral matching [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(8): 0801003.
- 胡新凯, 高海亮, 程天海. 基于光谱匹配的大气校正方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(8): 0801003.
- [7] Selvam K, Poorna B. Image enhancement through pixel components [J]. *International Journal of Computer Applications*, 2018, 10(2): 149-156.
- [8] Lavania K, Kumar R. Image enhancement using filtering techniques [J]. *International Journal on Computer Science & Engineering*, 2012, 4(1): 14-20.
- [9] Solutions I T. Atmospheric correction module: QUAC and FLAASH user's guide [M]. White Plains: ITT Visual Information Solutions, 2009, 44: 65.
- [10] Richter R. Atmospheric/topographic correction for satellite imagery [EB/OL]. (2011-01-10) [2020-11-30]. https://www.researchgate.net/publication/241137684_Atmospheric_Topographic_Correction_for_Satellite_Imagery.
- [11] Vermote E F, Tanre D, Deuze J L, et al. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(3): 675-686.
- [12] Tang X, Yi W N, Du L L, et al. Adjacency effect correction study of GF-1 satellite multi-spectral remote sensing images[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0228003.
- 汤兴, 易维宁, 杜丽丽, 等. 高分一号卫星多光谱遥感图像邻近效应校正研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(2): 0228003.
- [13] Simone G, Pedersen M, Hardeberg J Y. Measuring perceptual contrast in digital images [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2012, 23(3): 491-506.
- [14] Frey R A, Ackerman S A, Liu Y H, et al. Cloud detection with MODIS. part I: improvements in the MODIS cloud mask for collection 5 [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2008, 25(7): 1057-1072.
- [15] Xie Y S, Li Z Q, Li D H, et al. Aerosol optical and microphysical properties of four typical sites of SONET in China based on remote sensing measurements [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(8): 9928-9953.
- [16] Liu M Y, Zhao J X, Sun N. Edge thinning based on Prewitt operator [J]. *Optoelectronic Technology*, 2006, 26(4): 259-263.
- 刘明艳, 赵景秀, 孙宁. 用 Prewitt 算子细化边缘 [J]. *光电子技术*, 2006, 26(4): 259-263.