

高分一号 WFV 相机的大气校正与图像质量评估

李妍敏, 舒双宝, 李志文, 陈志强, 陈晶晶*

合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009

摘要 基于 6S 大气辐射传输模型和中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 上午星 Terra 的气溶胶光学厚度数据以及 MODIS 双向反射分布函数 (BRDF) 模型参数产品 (MCD43A1), 对高分一号 (GF-1) 卫星宽视场相机 (WFV) 四个波段的大气层顶辐亮度图像进行大气校正, 得到校正后的地表反射率图像。而后基于 Brenner 梯度算子和中频离散余弦变换两种方法统计校正前后图像的清晰度值, 分析计算结果可得大气校正后图像清晰度值高于校正前图像的清晰度值, 因此校正后图像的边缘纹理比较校正前更清晰; 基于阈值分割法原理进行信噪比评价, 结果表明校正前后每一波段的信噪比随辐亮度呈递增关系, 大气对短波波段的影响较大, 而对长波波带的影响较小。

关键词 大气光学; 大气辐射传输模型; 大气校正; 图像清晰度; 信噪比

中图分类号 TP751.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2001004

Atmospheric Correction and Image Quality Assessment of WFV Camera in GaoFen-1 Satellite

Li Yanmin, Shu Shuangbao, Li Zhiwen, Chen Zhiqiang, Chen Jingjing*

School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

Abstract For radiance images on the top of atmosphere obtained by wide field of view (WFV) camera in GaoFen-1 (GF-1) satellite, atmospheric corrections at four bands are made to obtain surface reflectance images based on 6S atmospheric radiation transmission model, aerosol optical depth from Terra in Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and the parameter products (MCD43A1) of MODIS bi-directional reflection distribution function model. Then the calculation methods of the image definition values are based on Brenner gradient operator and medium frequency discrete cosine transform. The calculation results show that the image definition values after correction are higher than those before correction, so the edge texture information of the image after correction is clearer than that before correction. The signal-to-noise ratio (SNR) is evaluated based on the principle of threshold segmentation. The results show that the SNR of each band before and after correction has an increasing relationship with the radiance. The atmosphere has more influence on the short-wave band than the long-wave band.

Key words atmospheric optics; atmospheric radiation transmission model; atmospheric correction; image definition; signal to noise ratio

OCIS codes 010.1320; 010.1285; 100.2960

1 引 言

高分一号卫星是中国高分辨率对地观测系统的首发星, 高分一号卫星搭载了两台 2 m 分辨率全色/8 m 分辨率多光谱复合相机, 四台 16 m 分辨率多光谱相机, 卫星突破了高空间分辨率、多光谱与宽覆盖相结合的光学遥感技术。其中的宽视场相机 (WFV) 涵盖可见光-近红外 4 个波段, 空间分辨率

为 16 m, 空间观测精度高, 范围宽, 在地理测绘、气候检测、水利和林业资源监测、疫情评估与公共卫生应急等领域发挥重要作用。

光学遥感卫星的观测信号会受到地球稠密大气层的严重影响, 因而大气校正是定量遥感的关键环节^[1]。针对高分一号 (GF-1) 回传图像数据的大气校正有很多研究: 胡新凯等^[2]利用光谱匹配法确定大气校正参数, 为植被稀疏地区的大气校正提供了

收稿日期: 2020-06-05; 修回日期: 2020-06-28; 录用日期: 2020-07-06

* E-mail: jingjingchen@hfut.edu.cn

新思路;王中挺等^[3]利用高分一号卫星 WFV 相机的快速大气校正模型,完成了高精度大气校正。胡勇等^[4]利用准同步中分辨率成像光谱仪(MODIS)数据和 WFV 数据对地表反射率结果进行校正,通过交叉对比实现了自动化和业务化处理。

信噪比(SNR, R_{SN} , 单位为 dB)和图像清晰度是衡量光学遥感器质量的重要指标,而大气影响对这两个指标有怎样的影响是亟待研究的课题。针对这一课题,本文首先通过程序设计,实现了导入实际大气气溶胶光学厚度参数(选择 MODIS 上午星 Terra 的 1° 网格 AOD550 数据)MODIS 双向反射分布函数(BRDF)模型参数产品、传感器定标数据和光谱响应函数的功能,利用 6S(Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum)辐射传输模型对 WFV 回传的数据实现了可系统化运行的大气校正功能。此外,详细研究了遥感图像的清晰度评价方法,包括梯度法、频谱函数法、图像熵函数法等^[5],而后根据遥感图像噪声以高斯噪声为主这一特点,利用 Brenner 梯度函数和离散余弦函数评价

清晰度,这两种方法具有较好的稳定性。基于类间方差(Qtsu)阈值分割法^[6]和 Canny 算子提取边缘,筛选出不含边缘块的小图像块,运用局部标准差法对信噪比进行评估,该方法适用于含均匀区域较少的图像。

为验证大气校正对图像质量的影响,从校正前后图像清晰度和信噪比两个方面进行分析,定量地将大气辐射传输与在轨影像成像质量评价联系在一起。比较分析了图像的细节信息与对比度,图像细节越丰富,对比度越高,清晰度值越高;同时分析图像辐亮度与信噪比之间的关系,在大气校正前后,各波段信噪比均随着辐亮度的增加而增大。对于长波波段,大气对信噪比的影响要小于短波波段的影响。

2 大气辐射传输模型及数据处理

为研究大气校正对高分一号卫星的影响,对校正前后图像清晰度和信噪比进行分析。算法流程如图 1 所示。

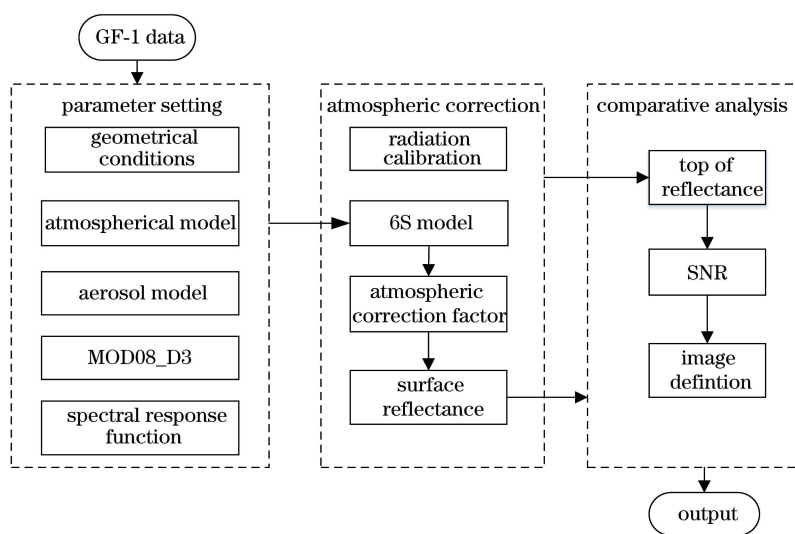


图 1 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of algorithm

6S 辐射传输模型是在 5S(Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum)基础上发展而来的,该模型采用了最新近似和逐次散射算法来计算大气的散射和吸收,与之前的模型相比改进了模型的输入参数,太阳光谱波段的散射计算精度有所提高。理想情况下,电磁波辐射不受大气吸收、散射等的影响,卫星传感器接收到的辐射亮度,只与太阳辐射到地面的辐照度和地面反射率有关。实际情况中,由于云和大气的影响,电磁波在太阳-地面-传感器的传输过程中会受到大气分子、水汽、气溶胶等

吸收和散射的影响,衰减了原始能量;同时,由于程辐射的影响,太阳辐射没经过地表直接被大气散射进入传感器,这部分能量没有携带地表信息,降低了图像对比度,太阳辐射与大气相互作用如图 2 所示。

假设研究区域为均一的朗伯体,传感器接收到的表现反射率定义为^[7]

$$\rho^* = \pi L / (F_0 \mu_0), \quad (1)$$

式中: ρ^* 为表现反射率; L 为大气上界观测到的辐射,它是整层大气光学厚度、太阳和卫星几何参数的函数,单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$; F_0 是大气上界

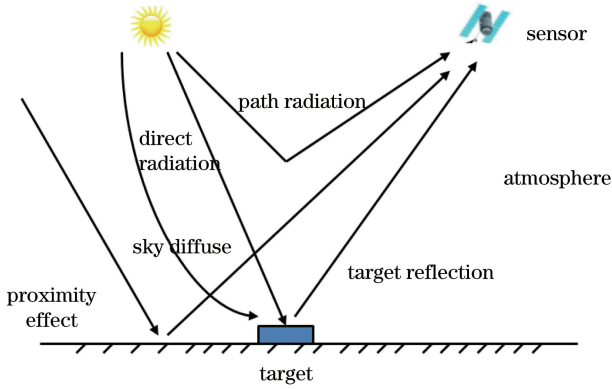


图 2 太阳辐射与大气相互作用

Fig. 2 Interaction between solar radiation and atmosphere
 太阳辐射的通量密度,单位为 $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$; μ_0 为太阳天顶角的余弦。大气表观反射率与大气分子反射、散射及吸收的关系表达式为

$$\rho^*(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) = T_g(\theta_s, \theta_v) \left[\rho_{r+a} + T(\theta_s)T(\theta_v) \frac{\rho_s}{1 - S\rho_s} \right], \quad (2)$$

式中: θ_s 为太阳天顶角; θ_v 为观测天顶角; ϕ_s 为太阳方位角; ϕ_v 为观测方位角; ρ_{r+a} 为由分子散射加气溶胶散射所构成的路径辐射反射率; $T_g(\theta_s, \theta_v)$ 为大气吸收所构成的反射率; $T(\theta_s)$ 代表太阳到地面的散射透过率; $T(\theta_v)$ 为地面到传感器的散射透过率; S 为大气球面反照率; ρ_s 为地表反射率^[8]。

本文所用的原始数据即高分卫星 1 级数据、辐射定标系数以及光谱响应函数,均通过中国资源卫星应用中心公开资料获取而来^[9]。图 3 为 GF-1 WFV3 相机光谱响应函数。采用 6S 模型校正时需先对原始数据进行辐射定标,将遥感影像像元亮度值(DN, X_{DN})转换为表观辐亮度,计算公式为

$$L_\lambda = G \cdot X_{DN} + \Delta, \quad (3)$$

式中: G 和 Δ 分别为定标系数增益、偏移量,单位均为 $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ 。

假定地表为朗伯体,表观反射率是太阳卫星传感器接收的光谱辐亮度与大气顶层太阳辐亮度的比值,也叫大气顶层反射率^[10],包括地表反射率和大气反射率,计算公式为

$$\rho^* = \frac{\pi \cdot L_\lambda \cdot d^2}{E_{SUN,\lambda} \cdot \cos \theta_s}, \quad (4)$$

式中: d 为日地相对距离,其值随日期波动,本研究取平均距离为 1 个天文单位; λ 表示波段; L_λ 为表观辐亮度; $\cos \theta_s$ 为太阳天顶角余弦值; $E_{SUN,\lambda}$ 为波段平均太阳辐射值,单位为 $W \cdot m^{-2}$,表示大气顶层卫星传感器某一波段获得的平均太阳辐射值,可从

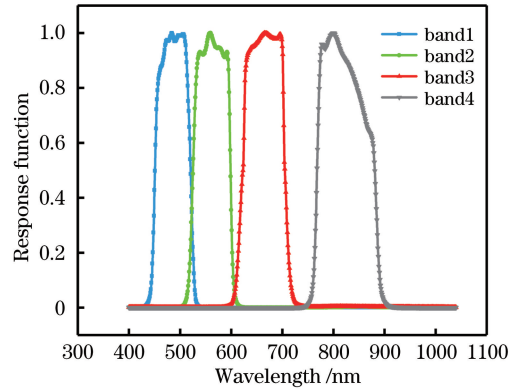


图 3 GF-1 WFV3 相机光谱响应函数

Fig. 3 Spectral response function of GF-1 WFV3

高分数据公开资料中获取,如表 1 所示。

表 1 高分一号卫星大气层外波段太阳辐照度

Table 1 Mean solar radiation values of GF-1 satellite sensors
 unit: $W \cdot m^{-2}$

Satellite sensor	Band1	Band2	Band3	Band4	Panchromatic band
WFV1	1968.66	1849.43	1570.88	1878.97	
WFV2	1955.02	1847.56	1568.89	1087.96	
WFV3	1956.54	1840.78	1540.95	1083.93	
WFV4	1968.12	1841.69	1540.3	1069.53	
PMS1	1944.98	1854.42	1542.63	1080.81	1371.53
PMS2	1945.34	1854.15	1543.62	1081.93	1376.1

根据元数据及辅助数据获取 6S 模型的输入参数,计算大气校正系数。6S 模型需要输入的参数包括几何参数、大气参数、气溶胶类型、气溶胶厚度、目标高度、光谱响应函数和地表特性等。本文选取的数据为 2017 年 7 月 4 日高分一号卫星 WFV3 相机拍摄的巢湖及其周边城市图像,中心经纬度为东经 116.9°,北纬 32.3°,图像大小为 12000 pixel \times 13400 pixel。几何参数所包括的参数有太阳天顶角、太阳方位角、卫星天顶角、卫星方位角、影像获取日期(年、月、日)、经纬度信息等,均可从 GF 数据.xml 文件中获取。其中 GF 数据.xml 文件提供的太阳天顶角实际为太阳高度角,天顶角应该用 90°减去元数据中 SolarZenith 对应的角度所得^[3]。大气模式取决于影像中心经纬度和获取时间,本文所选区域为中纬度夏季。输入时气溶胶类型选择为大陆型气溶胶,当日研究区域的气溶胶光学厚度参照对应时间和地点下 Terra 卫星 MODIS 全球气溶胶光学厚度(AOD)日均标准数据产品(MOD08_D3),以当天该区域平均气溶胶光学厚度作为输入。图 4 为 2017 年 7 月 4 日东经 115°、北纬 30°到东经 118°、北纬

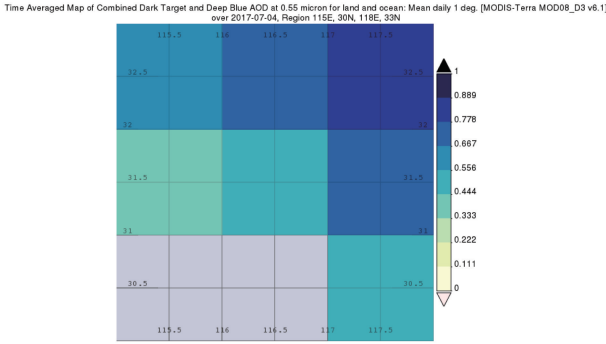


图 4 MODIS 大气气溶胶光学厚度日平均监测数据
Fig. 4 Daily average data of atmospheric AOD from MODIS

33°时 MODIS 大气气溶胶光学厚度日平均监测数据^[11]。由于 6S 模型适合 0.25~4 μm 的光谱波段, 本文算法将官方提供的光谱响应函数根据线性内插法重新插值。地面高程利用全球大陆范围内的高程数据集 GMTED2010 计算^[12], 通过遥感图像处理平台(ENVI)自带的数字高程模型(DEM)数据验证, 可知目标高度与本文算法结果基本一致。地表特性利用 MODIS Level3 级陆地产品 MCD43A1 进行计算, 该产品是 BRDF 模型参数产品, 由 Terra 和 Aqua 两颗卫星连续 16 d 观测的太阳-地表-卫星相对位置变化的多角度反射率数据拟合所得, 空间分辨率为 500 m, 将 MCD43A1 参数产品中各向同性散射、体散射、几何光学散射各个核所占的权重参数代入 6S 模型, 得出研究区域的二向反射, 计算公式为^[13]

$$R(\theta_s, \theta_v, \varphi) = f_{\text{iso}} + f_{\text{vol}} K_{\text{vol}}(\theta_s, \theta_v, \varphi) + f_{\text{geo}} K_{\text{geo}}(\theta_s, \theta_v, \varphi), \quad (5)$$

式中: φ 为太阳与观测相对方位角; $K_{\text{vol}}(\theta_s, \theta_v, \varphi)$ 和 $K_{\text{geo}}(\theta_s, \theta_v, \varphi)$ 分别为体散射核和几何光学散射核, 都是入射角和观测角的函数; f_{iso} 、 f_{vol} 和 f_{geo} 分别表示各向同性散射、体散射、几何光学散射所占的权重。

将待校正辐亮度图像以及各个参数准确地输入 6S 校正模型中, 地表反射率可表示为

$$\rho_s = y / (1 + x_c \cdot y), \quad (6)$$

$$y = x_a \cdot L_\lambda - x_b, \quad (7)$$

式中: x_a 、 x_b 、 x_c 为通过 6S 校正模型得到的大气校正系数。地表反射率表征地面对太阳反射与吸收的能力, 反射率越大, 地面吸收太阳辐射越少。基于所选数据进行大气校正, 校正前后的图像如图 5 所示。在图像中选取水体、植被、建筑、土地 4 个典型地物对比校正前后的反射率, 图 6 对比了典型地物光谱曲线。

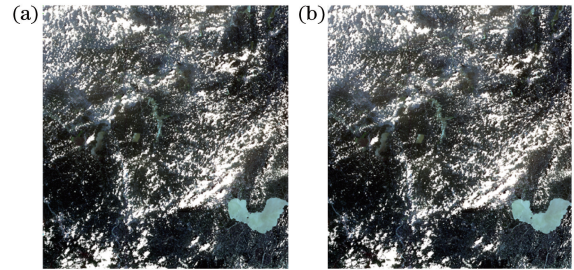


图 5 大气校正前后图像。(a)校正前;(b)校正后
Fig. 5 Images before and after atmospheric correction.

(a) Before correction; (b) after correction

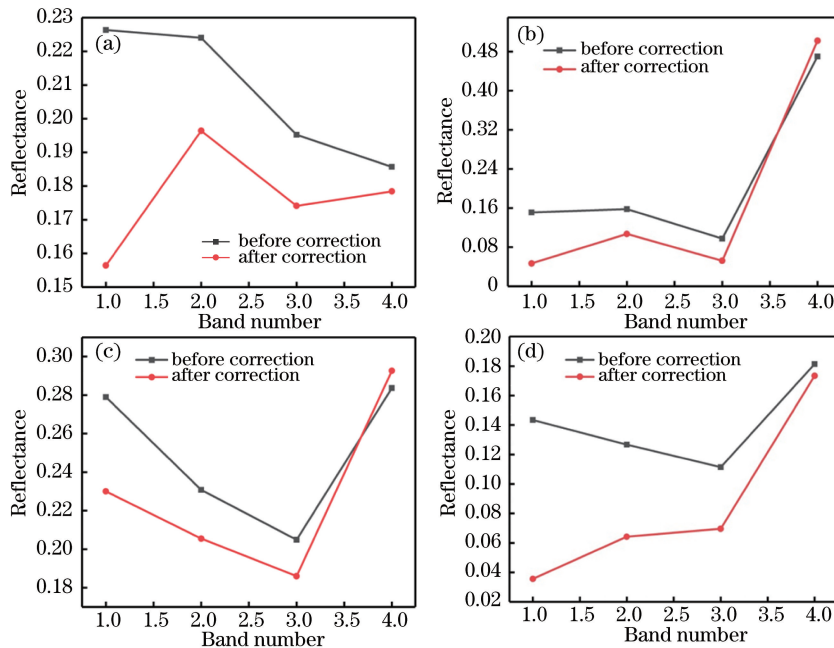


图 6 典型地物光谱曲线对比。(a)水体;(b)植被;(c)建筑;(d)土地

Fig. 6 Comparison of typical features spectral curves. (a) Water; (b) vegetation; (c) building; (d) land

3 图像质量指标分析

3.1 清晰度算法及结果分析

图像清晰度用于反映图像细节的变化,清晰度越高,成像质量越好,可辨程度越高。清晰度数值不是绝对值,是一种用于相互比较的指标^[14]。本研究采用梯度法和频域法两种方法来评价清晰度。清晰的图像较模糊的图像,其边缘更加尖锐清晰,边缘像素灰度值变化大,且有更大的梯度值。在进行图像处理时,将图像看作二维离散矩阵,利用梯度函数获取图像的灰度信息,并用于评判图像清晰度。梯度函数选择 Brenner 函数,它是利用某一像素点和与该像素相邻两个单元像素点的灰度值,计算相隔两个像素点之间的类均方差值评价图像清晰度^[15], Brenner 函数的表达式为

$$F_1 = \frac{1}{mn} \sum_x \sum_y [f(x+2,y) - f(x,y)]^2, \quad (8)$$

式中, x 和 y 表示图像像素坐标, m 和 n 为图像的长

和宽, $f(x,y)$ 表示像素值。

将图像由空域转换至频域时,根据图像频谱分析原理,可知清晰的图像有尖锐的边缘,故其包含更多的高频分量。频谱函数通过统计图像的高频分量,可以达到评价图像清晰度的目的。空域至频域的转换方法有傅里叶变换、拉普拉斯变换或小波变换^[16]。本文的评价函数采用中频离散余弦变换函数,该方法对高斯噪声不敏感,响应性能较好^[17]。中频离散余弦变换函数的表达式为

$$F_2 = \sum_x \sum_y (f * g)^2, \quad (9)$$

其中“ $*$ ”代表卷积, f 为 $f(x,y)$ 组成的矩阵, g 为

$$\text{中频离散变换算子, } g = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \end{bmatrix}。$$

从校正前后的图像中分别选取三个不同的区域,如图 7 和图 8 所示。利用基于 Brenner 梯度的清晰度评价法(以下简称“Brenner”)和基于中频离

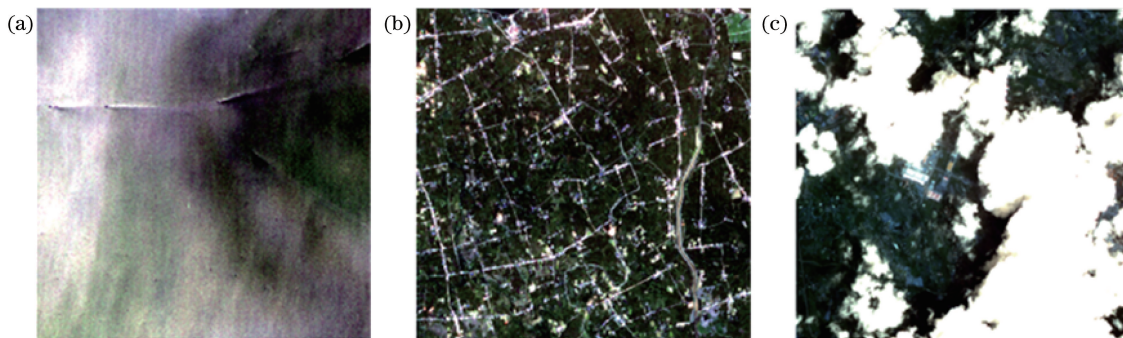


图 7 典型区域校正前。(a)区域 1;(b)区域 2;(c)区域 3

Fig. 7 Typical region before correction. (a) Region I ; (b) region II ; (c) region III

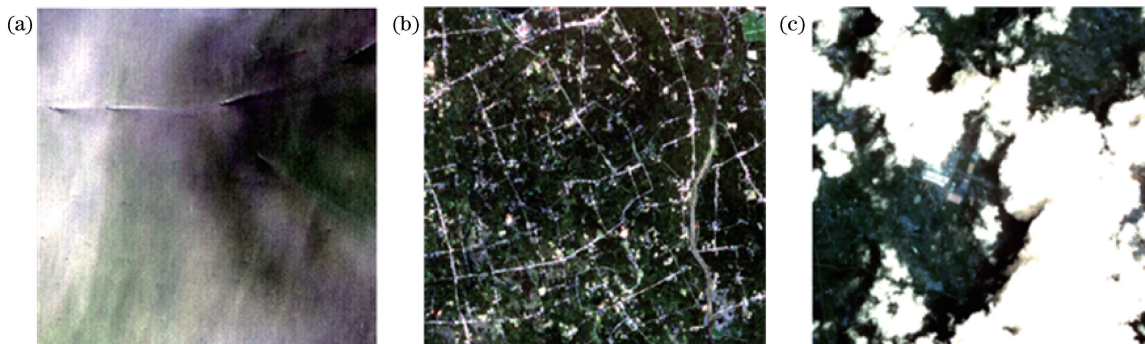


图 8 典型区域校正后。(a)区域 1;(b)区域 2;(c)区域 3

Fig. 8 Typical region after correction. (a) Region I ; (b) region II ; (c) region III

散余弦变换的清晰度评价法(“MF-DCT”),计算每个区域校正前后同一波段的清晰度值,为方便比较进行了归一化处理。计算结果如表 2、3、4 所示。

结合实验数据分析可得,经大气校正后每个区

域图像相同波段的清晰度值均大于未校正之前,图像清晰度均有明显提升。分析校正前后每一波段清晰度差值的变化幅度,发现 Band1 最大,Band4 最小,这说明每一波段都受到不同程度的大气影响,其

表 2 区域 1 清晰度对比
Table 2 Region I definition

Band	Before correction		After correction	
	Brenner	MF-DCT	Brenner	MF-DCT
Band1	0.33	0.40	0.67	0.60
Band2	0.36	0.38	0.64	0.62
Band3	0.40	0.42	0.60	0.58
Band4	0.42	0.43	0.58	0.57

表 3 区域 2 清晰度对比
Table 3 Region II definition

Band	Before correction		After correction	
	Brenner	MF-DCT	Brenner	MF-DCT
Band1	0.31	0.31	0.69	0.69
Band2	0.34	0.34	0.66	0.66
Band3	0.38	0.38	0.62	0.62
Band4	0.43	0.43	0.57	0.57

表 4 区域 3 清晰度对比
Table 4 Region III definition

Band	Before correction		After correction	
	Brenner	MF-DCT	Brenner	MF-DCT
Band1	0.36	0.35	0.64	0.65
Band2	0.37	0.37	0.63	0.63
Band3	0.40	0.40	0.60	0.60
Band4	0.44	0.44	0.56	0.56

中大气对 Band1 影响较大, Band4 受大气的影响较小, 这与可见光波段易受大气影响, 近红外波段受大气程辐射影响小这一理论相符。

3.2 信噪比算法及结果分析

信噪比反映了遥感成像系统的辐射性能, 是评价成像系统辐射性能的重要指标之一^[18]。遥感图像的噪声包括各个子系统产生的噪声, 通过量化各个子系统的噪声难以评估整个系统的噪声, 故可以采用简单的描述系统的模型来获取图像中的噪声^[19]。遥感图像噪声包括周期性噪声和随机性噪声。周期性噪声可通过频域变换滤波有效消除, 所以图像噪声主要为随机噪声。这种随机噪声一般被认为是加性噪声, 通常可以采用呈正态分布的高斯白噪声来进行模拟。同等水平的噪声对不同信号强度的图像质量影响不同, 一般对弱信号图像的影响较大, 对强信号图像的影响较小, 所以对于图像信噪比的估计是必要的^[20]。信噪比计算的准确性与图

像信号以及噪声有密切的关系, 在区域中一般用图像像素均值 (LM, X_{LM}) 作为信号, 像素均值标准差 (LSD, X_{LSD}) 作为噪声值, 遥感图像信噪比 (SNR, R_{SN}) 的计算公式为

$$R_{SN} = 20 \log \frac{X_{LM}}{X_{LSD}}, \quad (10)$$

$$X_{LM} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i, \quad (11)$$

$$X_{LSD} = \left[\frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N (S_i - X_{LM})^2 \right]^{1/2}, \quad (12)$$

式中, S_i 为图像第 i 个像素的灰度值, N 为当前图像像素总数。在实际研究中很难找出大面积均匀的区域, 在地物复杂的区域中相邻两种地物之间灰度值相差较大的边缘为不同地物的分界线。包含边缘的子块可能包含不同的地物, 这样的子块会增加图像噪声。如果先探测出图像中不同地物的边缘, 并将包含边缘的子块进行标记后去除, 就可减小图像中不均匀子块对噪声评估的影响。为准确评估噪声, 可将信噪比算法设置如下: 1) 利用 Qtsu 阈值分割法确定 Canny 算子的高门限值, 之后准确提取图像边缘, 将得到的二值图像划分为若干小图像块。因为二值图像中 1 表示边缘, 0 表示非边缘, 所以图像块像素和为 0 即为均匀图像块。2) 利用 (11) 式和 (12) 式计算步骤 1) 中筛选出的均匀小图像块的局部均值和局部标准差。3) 根据文献[21]在最小局部标准差与局部标准差均值的 1.2 倍之间划分若干小区间, 将每个图像块的局部标准差列入相应的区间, 统计每个区间的图像块个数, 将包含图像块数最多的区间局部标准差均值作为整个图像的噪声值。4) 利用 (9) 式计算信噪比。

图 7 和图 8 中区域 1 为巢湖水体的一部分, 将该区域校正前和校正后的地表反射率图像利用 Qtsu 阈值分割原理和 Canny 算子按照波段提取图像边缘信息, 得到二值图像, 并将其划分为 $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ 的小图像块, 在二值化图像中剔除包含边缘的图像块, 减小了包含不同地物间图像块对噪声值的影响, 最终得到均匀图像块, 如图 9 和图 10 所示, 黑色图像块为均匀图像块。在单通道图像中找到对应的均匀图像块, 统计均匀图像块的噪声值, 根据步骤 3) 确定整个图像噪声值, 计算各波段每个小图像块的信噪比, 分析每一波段信噪比与辐亮度的关系, 如图 11 所示。

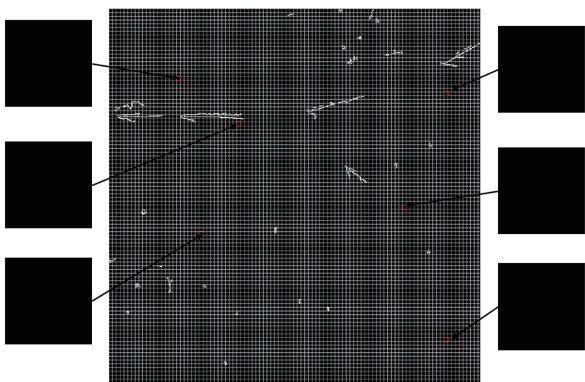


图 9 校正前均匀图像块选取

Fig. 9 Selection of uniform image blocks before correction

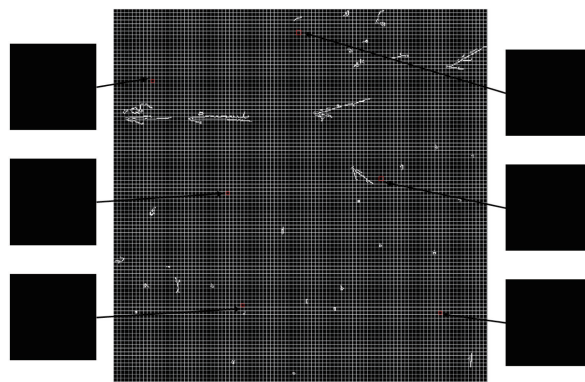


图 10 校正后均匀图像块选取

Fig. 10 Selection of uniform image blocks after correction

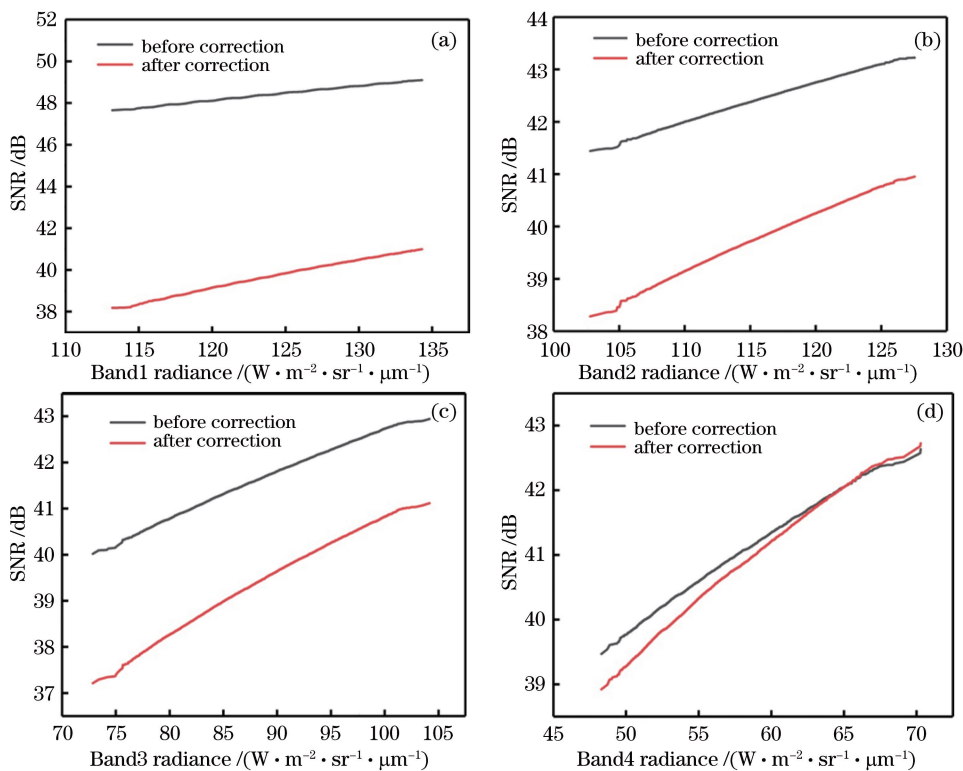


图 11 巢湖水体的信噪比较。(a) Band1; (b) Band2; (c) Band3; (d) Band4

Fig. 11 SNR of Chaohu. (a) Band1; (b) Band2; (c) Band3; (d) Band4

由图 11 可得,在高辐亮度区域和低辐亮度区域,校正前后每一波段的信噪比均随辐亮度增大而增大。大气校正后的信噪比与校正前的信噪比相比,均有所降低,这说明在大气校正前,高估了信噪比,其中短波波段(Band1~2)的大气校正对信噪比的影响较大,而长波波段(Band3~4)的大气校正对信噪比的影响较小。

4 结 论

基于 6S 大气校正模型和 MODIS 气溶胶光学厚度数据,定量分析了校正前后图像的清晰度和信

噪比,研究了大气校正对高分一号卫星 WFV 相机所拍摄的图像质量的影响。利用 Brenner 函数和 MF-DCT 函数计算清晰度,并对其作归一化处理后比较可得,校正后图像清晰度值高于校正前,且长波波段清晰度值校正前后的变化幅度较小,短波波段清晰度的变化幅度较大,所以大气校正一定程度上提升了图像的清晰度。通过阈值分割法计算信噪比,得出高辐亮度区间和低辐亮度区间,图像信噪比随辐亮度呈递增关系,大气校正对短波波段的影响较大,对长波波段的影响较小。各个波段图像质量指标变化情况,与可见光波段易受大气影响,近红外

波段受大气程辐射影响小这一理论相符。所以大气校正一定程度上消除了大气对电磁波辐射的影响,改善了图像质量。本文理论方法可为后续研究大气校正参数对校正效果的影响提供新的思路。

参 考 文 献

- [1] He H J. The study of atmospheric correction scheme based on the radiative transfer theory[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2006: 7-10.
何海舰. 基于辐射传输模型的遥感图像大气校正方法研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2006: 7-10.
- [2] 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.
- [3] Wang Z T, Li X Y, Li S S, et al. Quickly atmospheric correction for GF-1 WFV cameras [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(3): 353-360.
王中挺, 李小英, 李莘莘, 等. GF-1 星 WFV 相机的快速大气校正[J]. *遥感学报*, 2016, 20(3): 353-360.
- [4] Hu Y, Zhong B, Ma Z Z, et al. GF-1 WFV atmospheric correction based on MODIS atmosphere products and 6S model[J]. *Remote Sensing Information*, 2018, 33(5): 35-40.
胡勇, 仲波, 马泽忠, 等. 采用 MODIS 大气产品的高分一号 WFV 数据大气校正[J]. *遥感信息*, 2018, 33(5): 35-40.
- [5] Tan W, Wang Y, He H Y, et al. Comparison of improving image definition with common-used atmospheric correction models[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2017, 38(5): 96-105.
谭伟, 王钰, 何红艳, 等. 常用大气校正模型对图像清晰度提升的对比分析[J]. *航天返回与遥感*, 2017, 38(5): 96-105.
- [6] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, 9(1): 62-66.
- [7] Su W, Zhang M Z, Jiang K P, et al. Atmospheric correction method for sentinel-2 satellite imagery[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0128001.
苏伟, 张明政, 蒋坤萍, 等. Sentinel-2 卫星影像的大气校正方法[J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 0128001.
- [8] 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.
- [9] China Centre for Resources Satellite Data and Application. Absolute radiometric calibration coefficient in 2017: GF-2, GF-1, GF-4, ZY3-01/02, ZY-102C, CBERS-04, HJ-1A/B[EB/OL]. (2018-01-03)[2019-12-14]. <http://www.cresda.com/n16/n1115/n1522/n2103/191962.html>.
中国资源卫星应用中心. 2017 年绝对辐射定标系数: GF-2, GF-1, GF-4, ZY3-01/02, ZY-102C, CBERS-04, HJ-1A/B[EB/OL]. (2018-01-03)[2019-12-14]. <http://www.cresda.com/n16/n1115/n1522/n2103/191962.html>.
- [10] Sun Z L. Cartography and geographic information engineering[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013: 31-33.
孙章丽. 内陆湖水体反射率的精度验证与分析[D]. 成都: 电子科技大学, 2013: 31-33.
- [11] Goddard Space Flight Center, National Aeronautics and Space Administration (NASA). The Level-3 MODIS atmosphere daily global product [EB/OL]. (2000-02-24) [2019-12-26]. http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/MOD08_D3/index.html.
- [12] Carabajal C C, Harding D J, Boy J P, et al. Evaluation of the global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010) using ICESat geodetic control[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8286: 82861Y.
- [13] Strahler A H, Muller J, Lucht W, et al. MODIS BRDF/albedo product: algorithm theoretical basis document version 5.0[J]. *MODIS documentation*, 1999, 23(4): 42-47.
- [14] Xu W, Long X X, Li Q P. Radiometric image quality assessment of GF-2 satellite PMS camera[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2015, 36(4): 1-9.
徐文, 龙小祥, 李庆鹏. “高分二号”卫星相机影像辐射质量评价[J]. *航天返回与遥感*, 2015, 36(4): 1-9.
- [15] Yan J W, Jia X W, Sui G R, et al. Study on image definition evaluation function[J]. *Optical Instruments*, 2019, 41(4): 54-58.
严锦雯, 贾星伟, 隋国荣, 等. 图像清晰度评价函数的研究[J]. *光学仪器*, 2019, 41(4): 54-58.
- [16] Wang F, Zu L J, Gao Y F. Research on definition evaluation of digital remote sensing images[J]. *Modern Electronic Technique*, 2014, 37(23): 66-68.
王锋, 祖力军, 高亚飞. 数字遥感图像清晰度评价研究[J]. *现代电子技术*, 2014, 37(23): 66-68.
- [17] Lee S Y, Kumar Y, Cho J M, et al. Enhanced autofocus algorithm using robust focus measure and fuzzy reasoning [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2008, 18(9): 1237-1246.
- [18] Fu P, Sun Q S, Ji Z X, et al. A method of SNR estimation and comparison for remote sensing images [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(4): 559-567.

- 傅鹏, 孙权森, 纪则轩, 等. 一种遥感图像信噪比评估和度量准则[J]. 测绘学报, 2013, 42(4): 559-567.
- [19] Gao L R, Zhang B, Zhang X, et al. Study on the method for estimating the noise in remote sensing images based on local standard deviations[J]. Journal of Remote Sensing, 2007, 11(2): 201-208.
- 高连如, 张兵, 张霞, 等. 基于局部标准差的遥感图像噪声评估方法研究[J]. 遥感学报, 2007, 11(2): 201-208.
- [20] Chen Q L, Xue Y Q. Estimation of signal-noise-ratio from data acquired with OMIS[J]. Journal of Remote Sensing, 2000, 4(4): 284-289.
- 陈秋林, 薛永祺. OMIS 成像光谱数据信噪比的估算[J]. 遥感学报, 2000, 4(4): 284-289.
- [21] Gao B C. An operational method for estimating signal to noise ratios from data acquired with imaging spectrometers[J]. Remote Sensing of Environment, 1993, 43(1): 23-33.