

环境星 CCD 数据大气校正研究

孙源^{1,2,3}, 顾行发^{1,3}, 余涛^{1,3}, 高海亮^{1,2,3}

(1. 中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 国家航天局航天遥感论证中心, 北京 100101)

摘要: 利用 6S 模型和同步气象资料, 对国产环境与灾害监测预报小卫星 HJ-1A 的 CCD1 传感器数据进行了大气校正和反射率反演。同时对 CCD1 传感器 1~4 波段大气校正前后的反射率变化进行了对比研究, 发现大气校正后的 1~3 波段的地面反射率明显降低, 4 波段的地面反射率升高; 利用同步野外实测地面数据对大气校正后的反射率数据进行了检验, 两者结果基本一致; 此外, 还进行了定量化误差分析, 以同步野外实测地面数据作为标准, 将大气校正后的反射率数据与之对比, 分析了可能带来误差的原因。结果表明, 利用 6S 大气校正方法能够有效去除 HJ-1A 星 CCD 图像的大气影响, 获取地物绝对反射率。

关键词: 环境与灾害监测预报小卫星 A 星; CCD 图像; 大气校正; 6S 模型

中图分类号: TP 751.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-070X(2010)04-0006-04

0 引言

环境与灾害监测预报小卫星(简称 HJ 星)是我国自主研发的中低空间分辨率、时间分辨率和光谱分辨率的卫星, 在我国环境监测、减灾应用、气象预报和农林监测等领域发挥着重要作用。HJ-1A/1B 于 2008 年 9 月成功发射, 已经开始投入使用。为了进一步推动国产遥感卫星数据更加广泛的应用, 研究适合于 HJ-1A CCD 数据的大气校正方法, 对去除大气对图像的影响、获取地物真实反射率具有重要意义。

由于大气对太阳辐射和地面反射的散射和吸收, 提高了地球表面大气层的平均亮度值, 并叠加在地物的辐射信号上, 共同通过遥感成像被记录下来^[1]。因此, 卫星传感器接收到的辐射信号出现畸变失真, 例如: 图像清晰度、对比度均下降, 反射率、辐射亮度等相关物理量出现偏差。所以必须进行大气校正以还原目标物的真实反射率^[2]。

国内外学者提出过许多大气校正的方法, 如: 直方图均衡化法(histogram matching method)^[3]、暗目标法(dark object method)^[4]、固定目标法(invariant object method)^[5]和对比减少法^[6]大气校正模式等。上述方法与模式大多建立在某种特定或理想条件下, 其实用性受到一定限制^[7,8]。6S(Second Sim-

ulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum)模型则建立在辐射传输理论基础之上, 应用范围广, 受研究区特点及目标类型等的影响较小, 精度较高, 因而在辐射及遥感等学科中应用越来越广泛。

本次研究采用 2009 年 9 月 20 日的 HJ-1A 星 CCD 图像, 以内蒙古自治区赤峰市克旗克旗贡尔大草原为研究对象。选取中国资源卫星应用中心公布的 HJ-1A 星 CCD 定标系数, 对 CCD1 传感器 1~4 的 4 个波段进行了辐射定标。利用 6S 模型和同步气象资料, 进行了大气辐射校正和反射率反演研究, 分析了大气对 HJ-1A 星 CCD 数据定量研究的影响。

本文还利用同步野外实测地面数据对大气校正后的反射率数据进行了检验, 两者结果基本吻合; 并对两者差异的原因进行了误差分析。结果表明, 利用 6S 大气校正方法能够有效地去除大气影响, 获取地物绝对反射率, 具有较高的应用价值。

1 数据源与研究区概况

选取 2009 年 9 月 20 日上午 11 时获取的 HJ-1A 星 CCD1 传感器 1~4 波段图像为数据源。

研究区位于内蒙古自治区赤峰市克旗克旗贡尔大草原, 属于内蒙古高原东部、大兴安岭西麓波状高平原。该区为典型的半干旱草原气候, 冬季寒冷

干燥,夏季温和湿润,地物覆盖类型主要为植被、陆地和水体。

实验场区有达里诺尔湖作为标志性地物,容易辨认。达里诺尔湖周长百余千米,呈海马状,为封闭式苏达型半盐水湖。

2 基于 6S 模型的大气校正

2.1 辐射定标

定量遥感反演研究必须从传感器所接收到的大气—陆地混合信号中提取出陆地表面目标物体的贡献部分,消除所观察目标的非相关信息。定量遥感首先要解决的核心问题是辐射定标和大气校正^[9,10]。辐射定标主要指将星上观测到的遥感数值转换成物理量绝对值的过程^[11]。本次研究利用中国资源卫星应用中心公布的定标系数进行辐射定标,相关定标系数见表 1。

表 1 HJ-1 A 星 CCD1 传感器 1~4 波段辐射定标系数
Tab.1 Radiance calibration coefficients of HJ-1 A satellite CCD1 Band 1~4

物理量	单位	波段 1	波段 2	波段 3	波段 4
斜率 a ($\text{DN}/\text{W m}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$)		0.576 3	0.541 0	0.682 4	0.720 9
截距 L_0 ($\text{W m}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$)		9.318 3	9.175 8	7.507 2	4.148 4

2.2 6S 模型大气校正

该模型适用于波长范围为 0.25~4.0 μm 的多波段遥感数据,对不同传感器和不同地面状况下太阳光在太阳—地面目标—传感器整个传输路径中所受的大气影响进行了描述。通过输入相应的参数,即可求得地面反射率。

在 6S 模型中需要输入下列参数:几何参数(传感器类型、成像年月日),经纬度,气溶胶浓度,辐射条件、观测波段和海拔高度,地面覆盖类型,目标物半径和目标反射率等^[12]。其中,卫星的光谱响应函数由中国资源卫星应用中心提供,气象数据为 HJ 卫星过境时的同步实测数据。具体输入参数见表 2。

表 2 6S 输入参数

Tab.2 Input parameters of 6S model

各种角度/ $^\circ$				研究区条件		气象条件	
太阳天顶角	太阳方位角	观测天顶角	观测方位角	平均海拔高度/km	550 nm 处气溶胶光学厚度	气溶胶类型	
45.265 0	163.163 0	33.244 0	284.542 3	1.258	0.847 624 2	大陆型	

研究区为典型的中纬度冬季大气模式,地表可被视为均匀朗伯面。利用上述参数,对 HJ-1 A 星 CCD1 传感器的 4 个波段反射率数据进行大气校正模拟计算,得到大气校正参数 x_a 、 x_b 和 x_c (表 3)。然后利用 6S 模型提供的计算公式(式(1))计算校正后的反射率。

表 3 HJ-1 A 星 CCD1 传感器 1~4 波段 6S 大气校正参数
Tab.3 Atmospheric correction parameters of HJ-1 A satellite CCD1 Band 1~4 by 6S model

大气校正参数	波段 1	波段 2	波段 3	波段 4
x_a	0.005 24	0.005 01	0.005 15	0.006 60
x_b	0.298 20	0.191 98	0.121 04	0.066 78
x_c	0.225 96	0.188 19	0.158 34	0.117 30

$$\begin{cases} \rho = y / (1 + x_c \times y) \\ y = x_a \times L_i - x_b \end{cases} \quad (1)$$

式中, ρ 为校正后反射率; L_i 为第 i 波段辐射亮度。

3 大气校正结果分析

3.1 表观反射率

大气校正前地物的大气顶层表观反射率 ρ_{TOA} 可由式(2)计算得到^[12,13],即

$$\rho_{\text{TOA}} = \frac{\pi L d^2}{E_{\text{sun}} \cos \theta_z} \quad (2)$$

式中, ρ_{TOA} 为大气层顶 (TOA) 表观反射率 (无量纲); L 为大气层进入卫星传感器的光谱辐射亮度 ($\text{W m}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$); E_{sun} 为大气层外平均太阳辐射亮度; θ_z 为太阳天顶角; d 为日地距离。 d 以天文距离 (AU) 为单位,即

$$d = 1 + 0.016 7 \sin[2\pi(D - 93.5)/365] \quad (3)$$

式中, D 为数据获取日期距 1 月 1 日的天数。

表观反射率计算有关参数见表 4。

表 4 表观反射率计算有关参数

Tab.4 The relative coefficients of the TOA equivalent reflectance

参数	单位	波段 1	波段 2	波段 3	波段 4
E_{sun}	$\text{W m}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$	1 914.324	1 825.419	1 542.664	1 073.826
θ_z	sr	45.265 0			
d	AU	1.004 2			

3.2 地面同步实测光谱数据处理

地面同步地物光谱测量采用美国 ASD 公司的 Field Spec FR 便携式野外地物光谱仪和标准漫反射板,经处理得到地物光谱曲线,再将其匹配到卫星传感器相应的波段上。采用式(4)进行匹配,即

$$\rho_i = \frac{\int \rho(\lambda) \varphi_i(\lambda) d\lambda}{\int \varphi_i(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

式中, ρ_i 为第 i 通道的反射率; $\rho(\lambda)$ 为野外光

谱仪测量的反射率; $\varphi_i(\lambda)$ 为卫星传感器第 i 通道的光谱响应函数。

4 对比分析

4.1 大气校正前后反射率对比

在研究区内的 HJ-1 A 图像上分别选取不同典

型地物(草地、裸土和水体(达里诺尔湖))的训练样本 100 个,统计训练样本的反射率平均值。图 1 为草地、裸土和水体的表观反射率、大气校正后的地面反射率和野外实测反射率的对比图。

由图 1(左)和图 1(中)可以看出,草地和裸土的反射率曲线相似,9 月份时贡尔草原植被稀疏,实测叶面积指数(LAI)值仅为 0.3,二者曲线差别不大。

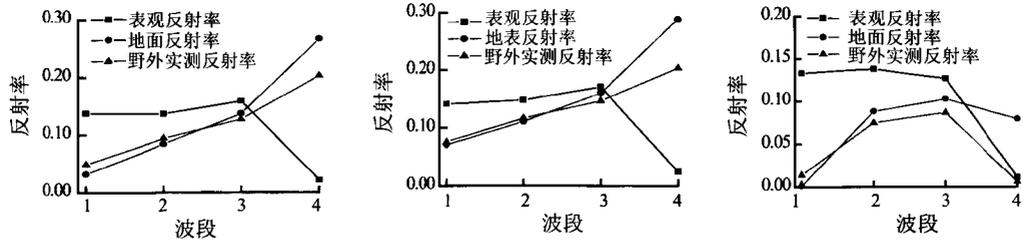


图 1 HJ-1 A 星 CCD 图像反射率对比(左: 草地、中: 裸土、右: 水体)

Fig.1 HJ-1 A satellite CCD image reflectance comparison (left: grassland, middle: soil, right: water)

经过大气校正的草地和裸土反射率在第 1 波段最低,随波段依次递增,第 4 波段最高;而未经大气校正的二者表观反射率在第 3 波段最高,第 1、2 波段次之,第 4 波段最低。未经及已经大气校正的草地和裸土表观反射率与野外实测反射率相差很大,反射率曲线的形态也相差较大。经过大气校正的草地和裸土反射率与野外实测反射率曲线形态基本吻合,第 1~3 波段吻合度很高,其中裸土的平均误差为 7%,草地的平均误差为 8%;但第 4 波段差异较大,平均误差为 35%;这些误差是因辐射定标系数、图像噪声及太阳辐照度变化等引起的。

由图 1(右)可以看出,经过大气校正的水体反射率在第 3 波段最高,第 2、4 波段次之,第 1 波段接近为零;而未经过大气校正的水体表观反射率在第 2 波段最高,第 1、3 波段减小,第 4 波段锐减。未经及已经大气校正的水体表观反射率与实测反射率相差很大,反射率曲线的形态也相差较大。经过大气校正的水体反射率与水体实测反射率曲线形态基本吻合。但两者对比结果相对于草地和裸土的对比结果来说差异相对较大,这是因为水体的反射率很低,实测数据难以获取。

在 1~3 波段,草地、裸土和水体 3 种地物的光谱反射率经大气校正以后均有所降低,其主要原因是受天空光的影响。大气散射增强了地面的辐照和大气层本身的“亮度”,大气校正后地物反射率还原为地面真实值,去除了大气散射引起的“亮度”效果,使得大气校正后的反射率值降低。

在 4 波段,草地和裸土经大气校正后的地面反射率明显升高。由于在近红外波段不仅受天空光的影响,还受水气吸收的影响。大气散射增强了“亮

度”,而水气吸收则减小了“亮度”;但大气散射作用较小,而水气吸收率大,故表现为地面的辐照和大气层本身的“亮度”减弱。因此,经大气校正后,地物反射率还原为地面真实值,去除了“亮度”减弱效果,使大气校正后的 4 波段即近红外波段地面反射率大幅度上升。

综上所述,草地与裸土两种地物在 1~3 波段,经过大气校正以后的地表反射率与野外同步实测反射率结果基本一致;在 4 波段,大气校正后的数据比实测结果偏高,存在一定的差异,但总体趋势一致。水体经过大气校正的地表反射率与实测数据结果差异相对较大,但反射率曲线形态基本吻合。

4.2 误差原因分析

(1)测量误差。野外实地测量时,存在人为因素带来的误差,如参考板放置不是绝对水平、测量时操作人员手抖动等。

(2)测量环境误差。由于地理位置、天气条件等,造成精确的实测数据难以获取。

(3)模型误差。6S 模型是朗伯体假设的大气校正方法,输入参数的近似值与实际地物的真实值之间存在较大差异,会产生较大的误差。

(4)其他误差。辐射定标系数、图像噪声及太阳辐照度变化等导致的差异。

5 结论

(1)选取中国资源卫星应用中心公布的 HJ-1 A 星 CCD 定标系数用于定标,结果较为理想。

(2)未经与已经大气校正的地物反射率相差很大,反射率曲线的形态也相差较大,表明大气校正

必要且不可忽略的。

(3) 经大气校正的地物反射率与野外地物实测反射率形状基本吻合。草地与裸土 2 种地物的相似度较高,水体次之。草地与裸土 2 种地物在 CCD1 传感器 1~3 波段相似度很高,误差不到 10%; 在 4 波段差异相对较大,误差达到 35%。

(4) 利用 6S 大气校正方法能够有效地去除大气对电磁波传输过程的影响,实现 HJ-1A 星 CCD 影像的大气校正,获取地物的绝对反射率。

致谢: 本研究工作得到国家航天局航天遥感论证中心的项目支持和自然资源卫星应用中心的数据支持,特此致谢。

参考文献:

- [1] Moike J G. Remote Sensing Image Digital Process[M]. Beijing: Meteorological Publishing, 1987.
- [2] 徐萌,郁凡,李亚春,等. 6S 模式对 EOS/MODIS 数据进行大气校正的方法[J]. 南京大学学报, 2006, 42(6): 582-589.
- [3] Richter R. A Spatially Adaptive Fast Atmospheric Correction Algorithm[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(6): 1201-1214.
- [4] Kaufman Y J, Wald A, Remer L A, et al. Remote Sensing of Aerosol Over the Continents with the Aid of a 2.2 μm Channel[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997 (35): 1286-1298.
- [5] Chavez P S Jr. Image-based Atmospheric Corrections—Revisited and Improved [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1996(62): 1025-1036.
- [6] Tanre D, Legerand M. On the Satellite Retrieval of Saharan Dust Optical Thickness Over Land: Two Different Approaches[J]. Journal Geophysical Research, 1991(96): 5221-5227.
- [7] Liang S L, Fang H L, Chen M Z. Atmospheric Correction of Landsat ETM+ Land Surface Imagery—part I: Methods [J]. IEEE Transactions of Geoscience Remote Sensing, 2001, 39(11): 2490-2498.
- [8] Liang S L, Fang H L, Jeffrey T M, et al. Atmospheric Correction of Landsat ETM+ Land Surface Imagery—part II: Validation and Applications[J]. IEEE Transactions of Geoscience Remote Sensing, 2002, 40(12): 2736-2746.
- [9] Edward J T, McDonnell. Characteristics of the Indoor Wireless Propagation Environment at Microwave and Millimeter Frequencies [J]. The Institution of Electrical Engineers, 1996 (11): 4-5.
- [10] Turin G L, Clapp F D, Johnson T L, et al. A Statistical Model of Urban Multipath Propagation [J]. IEEE Trans. Veh. Techno, 1972 (21): 1-9.
- [11] Adel A M, Saleh, Reinaldo A, et al. A Statistical Model of Indoor Multipath Propagation [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1987, 5(2): 128-137.
- [12] 阿布都瓦斯提·吾拉木, 秦其明, 朱黎江. 基于 6S 模型的可见光、近红外遥感数据的大气校正[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2004, 40(4): 611-618.
- [13] 池宏康, 周广胜, 徐振柱, 等. 表观反射率及其在植被遥感中的应用[J]. 植被生态学报, 2005, 29(1): 74-80.

A Study of HJ-1A CCD Image Atmospheric Correction

SUN Yuan^{1,2,3}, GU Xing-fa^{1,3}, YU Tao^{1,3}, GAO Hai-liang^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University, Beijing 100101, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. The Center for National Spaceborne Demonstration, Beijing 100101, China)

Abstract: This paper deals with a suitable atmospheric correction method based on HJ-1A CCD Image. A method based on 6S radiation transfer code and isochronous meteorological information on sensing time was used in the atmosphere correction, which is an operational method of correcting visible and near-infrared data for atmospheric effects. Validation analysis was conducted by comparing the reflectance data corrected and uncorrected atmospherically. Significant differences occurred between them: the values of the corrected reflectance of CCD1~3 decreased obviously, whereas those of CCD4 increased. The retrieved surface reflectance was evaluated against the ground-based reflectance acquired during HJ-1A satellite overpass, and it is shown that the curves of the figures are similar, and the compared values are agree with each other well. Based on the statistical analysis, some reasons for the errors were mentioned in the end of the paper.

Key words: HJ-1A; CCD image; Atmospheric correction; 6S radiation transfer code

第一作者简介: 孙源(1987-), 女, 博士研究生, 主要从事定量遥感方面的研究。

(责任编辑: 刘心季)