

李正强¹ 陈兴峰¹ 马奕¹ 伽丽丽¹ 侯伟真¹ 乔延利²

光学遥感卫星大气校正研究综述

摘要

由于高分辨率遥感应用需求增加的牵引,国内外发射了越来越多的光学遥感卫星载荷.然而,随着传感器分辨率的增加,大气对地表信息干扰的问题也越来越突出,光学遥感图像的大气校正问题,因载荷特点和应用需求的改变面临着一些新的挑战,有必要对其进行总结和分析.本文在介绍大气校正现状和原理的基础上,按照光学遥感卫星大气校正输入信息来源不同,把大气校正方法归纳为基于图像和图形处理方法、基于辐射传输计算、基于图像自身信息反演大气参数、基于大气同步校正仪的大气校正4类进行介绍.最后,结合我国高分辨率光学卫星的发展方向,对当前的大气校正应用方案 and 未来发展进行了讨论和展望.

关键词

光学遥感;大气校正;定量遥感;高分辨率;辐射传输

中图分类号 P407.4

文献标志码 A

收稿日期 2017-11-15

资助项目 国家重点研发计划(2016YFE0201400);国家自然科学基金(41701407);中科院科技创新重点部署项目(KGFZD-125-13-006)

作者简介

李正强,男,博士,研究员,主要研究方向为大气遥感.lizq@radi.ac.cn

陈兴峰(通信作者),男,博士,副研究员,主要从事气溶胶光学卫星遥感研究.chenxf@radi.ac.cn

1 中国科学院遥感与数字地球研究所 国家环境保护卫星遥感重点实验室,北京,100101

2 中国科学院合肥物质科学研究院 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室,合肥,230031

0 引言

地球是一颗表面包围着浓密大气的行星,在大气浑浊的情况下,光学卫星拍摄到的遥感影像上,地物等目标信息会受到严重干扰^[1],直观表现为传感器图像对比度、锐度等显著降低,产生模糊现象.这种图像质量的降低,来源于大气中气溶胶、水汽等颗粒物和吸收气体对于卫星接收到的地物反射的太阳辐射信号的削减作用,是一种独立于传感器相机等成像系统的自然不可控因素.由于其在图像质量提升方面的重要作用,以及空气污染造成的大气能见度降低等因素的影响,大气校正目前在光学卫星传感器数据处理链条中受到了越来越多的重视.

对地观测的卫星传感器,尤其是在较短波长的光学波段,电磁辐射不可避免地受到大气中各种气体和悬浮颗粒物的吸收和多次散射作用^[2].在以大气为监测目标的研究中,遥感获得的地面信号被视作一种噪声^[3],而在大气校正的研究中,大气则被认为是一种妨碍地物目标信息提取的因素^[4],这是站在以观测地物为目标的定量遥感应用立场来说的.在这种情况下,从卫星在大气层外观测的遥感数据中扣除大气干扰,恢复地面真实信息就是大气校正的主要目标^[5].在传感器成像时刻,当大气中有较厚云层覆盖时,光学遥感往往无法穿透云层,难以获得地表信号,这种情况下通常没有必要进行大气校正^[6].所以大气校正一般是在薄云和无云的情况下,致力于恢复遥感影像的地表信息,提高卫星图像质量.

大气对传感器入瞳信号的贡献可超过80%^[7],干扰最大的大气组分是气溶胶^[8],其他组分诸如气体分子造成的吸收和瑞利散射,因传感器波段设计已避开以及大气成分稳定等因素,相对而言校正或扣除较为容易^[4].在空气动力学中,气溶胶是指直径约为0.001~100 μm的颗粒物,可以长时间悬浮在大气中,因此也被叫做总悬浮颗粒物.当光线照射时,气溶胶会发生散射和吸收作用导致遥感图像模糊^[9].气溶胶本身在大气中的分布随着时间和空间变化很大,因此,与遥感影像同步的气溶胶含量等信息是开展量化大气校正的关键输入.不同的大气校正方法定义了不同的参量来描述大气或者气溶胶的含量^[10-12],通常来说,在遥感中使用气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOD)描述气溶胶在整层大气中的含量^[13-15].图1显示了同一地区在半个月内(可认为光照和轨道情况变化较小),3种不同的AOD

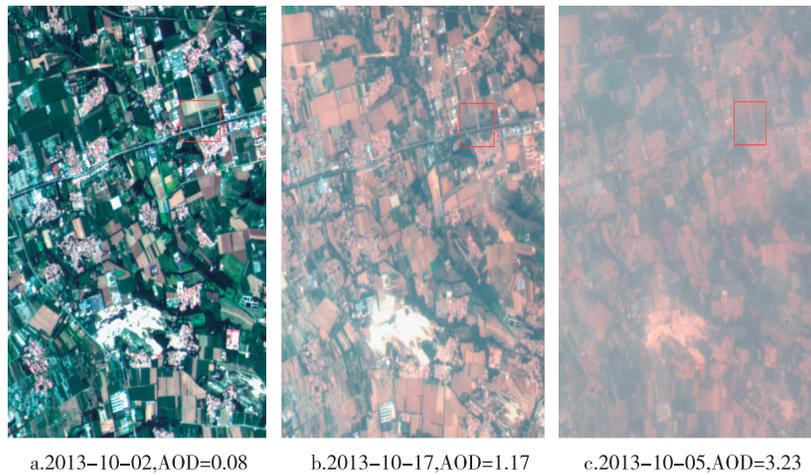


图1 北京市顺义区的 GF-1 卫星 16 m 彩色图像(AOD 波长为 550 nm)

Fig. 1 GF-1 satellite images (16 m resolution) at Shunyi, Beijing city (AOD is at 550 nm)

状况下,大气导致的卫星图像模糊效应的差异.

对地观测的光学遥感卫星,根据不同应用目的而设置了不同的光谱和空间分辨率^[16].对于气象、海洋、全球变化等领域的大尺度观测,遥感卫星通常为了保障覆盖能力而设置很大的幅宽(1×10^6 m 级)和较低的空间分辨率(km 级).随着遥感应用深入到各行各业,农、林、水、土、城、环、灾等行业都对高空间分辨率的遥感观测提出了强烈需求^[17-21],遥感卫星也逐步健全了百米级^[22]、十米级^[23]、米级^[24]和亚米级^[25-26]空间分辨率观测能力,例如美国的 KB-11 卫星空间分辨率已达 0.1 m^[27].上述不同分辨率的光学卫星在以地面目标为量化监测对象时,都需要进行辐射观测量的校正,按照校正的流程,可以分为传感器校正(绝对、相对)、大气校正、地形校正等.传感器校正通常是通过在轨定标获得传感器特性(定

标系数),随后扣除由于传感器特性引入的辐射测量值误差^[28-29].之后,需要进行大气校正,在山区等特殊区域,还需要根据地形数据,继续对遥感观测数据进行地形校正^[30-31].

随着大气环境污染和卫星分辨率进一步增加,光学遥感卫星大气校正变得尤为重要.首先,大气环境的恶化,尤其是在中国、印度等发展中国家^[32-33],以气溶胶为主的大气污染情况非常严重.图 2 是基于卫星观测和模式同化的 AOD 全球分布^[34],中国等区域 AOD 值显著较高,这种大气环境状况下,通过大气校正提高污染区域图像可用率是满足遥感应应用对观测效率需求的必然手段.其次,遥感器对地观测能力的提升遇到了瓶颈.通过增大光学孔径来提高空间分辨率的手段难以无限制使用,当新型探测器的应用和光学孔径的增大接近现有工程极限时,

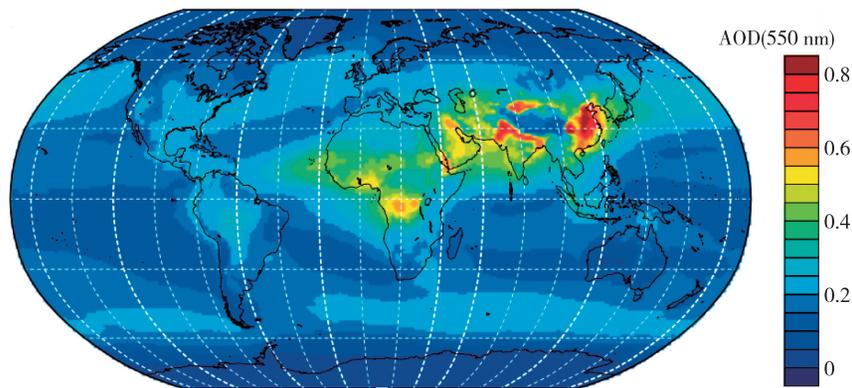


图2 卫星观测(MODIS)结合模式同化(ECWMF)的2003—2010年间全球气溶胶光学厚度(AOD)分布^[34]

Fig. 2 Global Aerosol Optical Depth (AOD) from satellite observation (MODIS) and model assimilation (ECWMF) over the period 2003—2010^[34]

图像清晰度的提升遇到了困难.例如,工程上虽然按照特定的分辨率去设计,受限于传感器自身的 MTF (调制传递函数, Modulation Transfer Function) 和大气 MTF,最终的遥感产品无法实现既定的在轨传函 MTF (包含传感器和大气 2 部分),成像的实际空间分辨率可能低于设计值.在这种情况下,大气校正可以弥补或者改善因大气 MTF 造成的图像质量退化^[35],使大气校正后的数据尽可能满足用户最终关心的在轨传函和空间分辨率.

1 大气干扰对地观测遥感影像的原理

图 3 是卫星光学遥感器对地观测时获取辐射信息构成的示意.图 3 中,① 是由目标直接反射太阳光的辐射信息;② 是未到达地面的太阳辐射被大气分子、气溶胶粒子等散射的信息,通常称为程辐射;③ 是来自目标周围环境反射,并再经大气散射进入遥感器视场的辐射信息;④ 是由经过大气散射到背景像元,反射后再经大气散射进入遥感器视场的辐射信息;⑤ 是目标反射大气背景产生的辐射信息.由图示可以看出,① 是最主要目标特征信息,⑤ 在一定程度上也反映了目标特征,如对阴影部分目标的探测可以利用此信息.① 和⑤ 包含了最终所需的地表信息,② 是仅由大气引起的程辐射,③ 和④ 则是由邻近效应^[36]造成的干扰,也不包含目标信息.

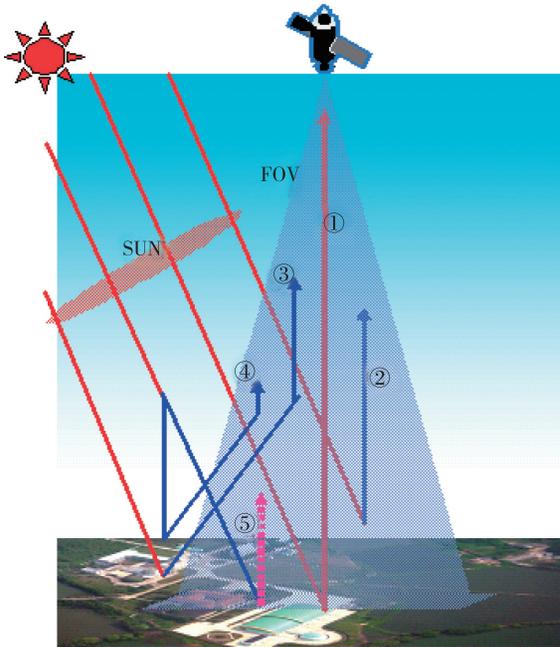


图 3 光学遥感器入瞳辐射信号构成示意

Fig. 3 Components of radiation signal into the remote sensing sensor

与上述过程对应的遥感器入瞳信号可以定量表达为

$$\rho^*(\theta_s, \theta_v, \varphi_s, \varphi_v) = \rho_a(\theta_s, \theta_v, \varphi_s, \varphi_v) + \frac{T(\theta_s)}{1 - \rho_e s} (\rho_s e^{-\tau} + \rho_e t_d(\theta_v)), \quad (1)$$

其中, $\rho^*(\theta_s, \theta_v, \varphi_s, \varphi_v)$ 是表观反射率, $\theta_s, \theta_v, \varphi_s, \varphi_v$ 分别是太阳天顶角、观测天顶角、太阳方位角、观测方位角, $\mu_v = \cos \theta_v, \rho_s$ 表示目标像元反射率, ρ_e 是邻近像元反射率, τ 为大气光学厚度, $t_d(\theta_v)$ 是向上的散射辐射透过率, s 是大气半球反照率:

$$s = 1 - \int_0^1 \mu T(\mu) d\mu, \quad (2)$$

其中 μ 是天顶角的余弦. $T(\theta_s) = e^{-\tau} + t_d(\theta_s)$ 和 $T(\theta_v) = e^{-\tau} + t_d(\theta_v)$ 分别为向下和向上的总透过率. $\rho_a(\theta_s, \theta_v, \varphi_s, \varphi_v)$ 是程辐射反射率, 对应图 3 中的第②部分贡献, 可以表达为

$$\rho_a(\theta_s, \theta_v, \varphi_s, \varphi_v) = \frac{\int R(\lambda) E_\lambda \mu_s T_g^\lambda(\theta_s, \theta_v) \rho_\lambda^a d\lambda}{\int R(\lambda) E_\lambda \mu_s d\lambda}, \quad (3)$$

其中, $R(\lambda)$ 是光谱响应函数, λ 是波长, E_λ 是大气层外太阳光谱辐射能量, $\mu_s = \cos \theta_s, T_g^\lambda(\theta_s, \theta_v)$ 是大气气体透过率, ρ_λ^a 是气溶胶散射和瑞利散射的反射率.

式(1)中, 邻近像元的空间平均反射率 ρ_e 可由所有邻近像元的真实反射率与大气点扩散函数的卷积计算得到:

$$\rho_e = \frac{1}{t_d(\theta_v)} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \rho_s(x, y) e(x, y, \theta_v) dx dy, \quad (4)$$

其中, (x, y) 是邻近像元距离目标像元的位置, $e(x, y, \theta_v)$ 是大气点扩散函数. 从辐射传输的角度而言, 大气校正就是从卫星入瞳信号中, 扣除程辐射和邻近像元等贡献, 反算得到目标像元反射率.

2 大气校正方法归纳

为了开展光学遥感大气校正, 研究人员从不同的思路出发开发了大量的方法, 相关学者也对其进行了归类^[37]. 然而, 实际执行大气校正的时候, 由于具备的大气、地表等输入信息条件差异很大, 实际可用的大气校正方法也不同. 因此, 着眼于校正输入信息来源和定量化与否, 本文将大气校正的主要方法分为 4 类进行介绍.

2.1 基于图像和图形处理方法的大气校正

基于图像自身特征,采用图像和图形处理方法可以开展大气校正.这类方法不关注造成图像模糊的物理机理,只要是大气造成图像视觉模糊,都可采用“去雾”或者“去雾霾”算法^[38-39]等进行校正,通常这视为一种相对的大气校正.遥感图像去雾是从地面摄像数据的去雾方法^[40-41]发展而来的,并不关注遥感信号的辐射数值量化准确程度,这种方法在特定场景下可显著提高目视效果.在某些具备较高空间分辨率的图像应用中,用户如果仅关注目标类型和几何等非量化辐射信息,去雾类大气校正方法能够满足需求且具备较高的效率,甚至针对不均匀的大气分布,利用小波变换、T-C 变换等^[11],也可以有较好的校正效果.这些方法中典型的有 He 等^[40-41]发展的暗通道去雾法、Zhang 等^[42]发展的 HOT(Haze Optimized Transform)方法等,后续很多研究是在其基础上做出改进^[11,43-45].

这些去雾处理往往伴随使用对比度拉伸等增强处理,通常使用清晰度、信息熵等评价指标,但由于其不考虑地物反射特性或者辐射强度等物理量,容易造成矫正过度或色彩失真^[11].这种方法在高空间分辨率的有人机、无人机航空遥感图像处理中得到了大量的应用,在实际的航空测绘遥感产品生产过程中,通过大气校正达到用户对测图清晰度等的要求,可以在较短的时间内完成航拍任务,保障在较短工期内交付测绘产品^[46-47].

2.2 基于辐射传输计算的大气校正

基于辐射传输模型的大气校正属于物理模型方法.商业遥感软件公司和研究机构已经提供了一些

广泛使用的辐射传输大气校正工具.该类工具通常并没有指定大气信息的来源,仅提供了基于辐射传输的大气校正计算功能.因此,在执行辐射传输计算的时候,需要人工输入大气参数.这类大气校正软件通常采用 6S、MODTRAN 等辐射传输计算模型. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S)^[48]是由法国里尔大学大气光学实验室和美国马里兰大学发展的辐射传输模型,提供了较全面的卫星信号模拟和大气辐射传输计算功能,在卫星影像大气校正中得到了广泛的应用. Moderate Spectral Resolution Atmospheric Transmission (MODTRAN)^[49]是由美国空军物理实验室与光谱科技公司联合开发的模型,被广泛使用在 Fast Line-of-sight Atmosphere Analysis of Spectral Hypercubes (FLAASH)^[50]等大气校正软件包,德国光电研究所研发的 Atmospheric and Topographic Correction (ATCOR)^[51]快速大气校正软件包也是使用 MODTRAN 构建的辐射传输查找表^[52].表 1 汇总了大气校正相关通用辐射传输模型.

2.3 基于图像自身信息反演大气参数的大气校正

基于辐射传输的大气校正是符合光学遥感物理机理的方法,但这种方法需要知道大气参数.对于部分具备大气探测能力的传感器而言,从图像自身提取大气参数是一种切实可行的方法. Kaufman 等^[54]利用 MODIS 图像自身的暗目标(浓密植被等)提取大气气溶胶信息,并将其用于大气校正.对于中高空间分辨率的卫星,例如我国高分卫星^[55]、资源卫星^[56-57]、环境卫星^[58]等,可通过基于先验知识设定经验系数^[56,58]、先验地表关系^[57]或先验地表数据支

表 1 基于辐射传输计算的大气校正模型和软件包

Table 1 Radiative transfer models and software packages for atmospheric correction

辐射传输模型/ 软件包	参考文献	特点
6S	[48]	采用逐次散射法计算大气散射,优化了参数的输入,内置了典型大气模式、气溶胶类型模型,内置了常用传感器的光谱响应函数,易用性好,在我国被广泛用于大气校正.6SV 是具有矢量辐射传输计算能力的版本
MODTRAN	[49]	利用离散纵标法计算多次散射,具有较高的光谱分辨率.多被商业化软件采用,例如 ENVI 软件中的 FLAASH 模块、ERDAS 软件中的 ATCOR 模块,均采用 MODTRAN 完成辐射传输计算
RT3	[53]	基于倍加累加法进行辐射传输计算,具备矢量计算能力,没有内置气溶胶类型模型,可以直接将散射相函数的勒让德展开系数作为输入,能够灵活集成自定义气溶胶模型,计算速度快
FLAASH	[50]	内置到商业软件中,界面易操作,需要用户输入大气参数,辐射传输计算使用 MODTRAN 模型,可以校正高光谱和多光谱遥感图像.考虑了邻近效应校正
ATCOR	[51]	可以快速执行大气校正,内置到了 PCI 和 ERDAS 等商业软件中.针对高空间分辨率遥感图像校正进行了优化,分为多个版本,在 ATCOR3 和 ATCOR4 中考虑了地形辐射校正

撑^[55]等方法,从待校正图像估算气溶胶信息,随后用于大气校正.这些方法通常受限于地表类型(要求暗目标),或者需要其他遥感器的地表数据库支撑,具有一定的局限性,但优点是自动化程度较高.另外还有通过使用大气干扰较小的遥感参数来描述某些地表特征,也可归类为利用图像自身光谱特征的大气校正,例如被广泛使用的归一化植被指数 NDVI^[59]等.

表2总结了针对我国中高空间分辨率遥感数据的一些典型大气校正研究,这些工作都是基于遥感图像自身信息反演大气参数再开展大气校正的.从表2中也可以看出,基于辐射传输的大气校正,即使是基于图像自身信息获得大气参数,在业务化运行时,也需要解决云识别、辐射定标、几何配准、大气信息反演等一系列问题,目前仅部分研究开展了业务化运行.这表明基于图像自身信息反演大气参数的大气校正仍具有较大的局限性,此外还有很多高分辨率传感器难以从自身图像中提取出大气信息,针对这种状况,基于同步校正仪的大气校正得到了发展.

2.4 基于大气同步校正仪的大气校正

大气状况随着时间和空间变化往往非常剧烈,利用其他渠道获得的大气气溶胶信息时空匹配吻合度随机性较大,很难满足业务化校正这类需要专门

大气测量信息的需求.因此,通过搭载小型化专用大气探测仪,同步获取大气测量数据,用于同一平台上其他传感器遥感数据的大气校正方法得到了发展.

大气校正所需的大气参数,须与待校正图像同时同区域,以保证可以精准描述成像时刻的大气状态,然后通过辐射传输计算,得到指定波段的地表反射率.考虑到气溶胶、水汽等信息的反演需要大量的专用探测波段,且大气组分的时空变化特性明显,通过专用小型化仪器获得高精度的大气参数,逐渐成为大气校正的一个重要发展方向.例如美国新千年计划中,用于卫星平台和新传感器技术验证的 EO-1 卫星,于2000年11月发射成功,该星搭载了大气校正仪 LEISA Atmospheric Corrector (LAC)用以校正 Advanced Land Imager (ALI)多光谱图像^[61];2014年8月,美国商业卫星遥感数据公司 DigitalGlobe 发射了 WorldView-3 卫星,该星专门搭载了用于纠正高分辨率遥感影像的大气同步校正仪 CAVIS (Clouds, Aerosols, Water Vapor, Ice and Snow)^[62];在我国民用空间基础设施规划的一些中(十米级)高(亚米级)分辨率卫星上面,已设计搭载了中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的系列化星载大气同步校正仪,该类型的大气同步校正仪^[63-64]使用了偏振技术提高气溶胶反演的精度^[65].一些典型的大气校正仪的技术信息如表3所示.

表2 基于图像自身信息反演大气参数进行校正的中国中高分辨率传感器举例

Table 2 Atmospheric corrections of Chinese middle-high spatial resolution sensors using the atmospheric information directly retrieved from the image

卫星/传感器	参考文献	辐射传输模型	方法简述	业务化
GF1/WFV	[55]	6S	利用蓝波段数据,基于深蓝算法(适用于暗目标和较亮地表)反演 AOD,随后开展校正	否
GF1/PSM	[12]	6S	借助于 MODIS 地表先验知识确定暗目标,利用 PSM 多光谱图像自身反演 AOD,随后开展校正	否
GF2/PSM	[60]	6S	构建了适用于业务化大气校正的查找表,未建立业务化大气校正系统	否
ZY3/CCD	[56]	6S	采用暗目标法反演 AOD 并校正,或不反演 AOD 直接用暗目标校正	否
HJ-1A, B/CCD	[57]	MODTRAN	采用归一化的植被、土壤、水体指数识别暗像元,随后开展气溶胶反演和大气校正	试运行
	[58]	RT3	采用区域气溶胶模式用于大气校正,暗目标反演 AOD,同时在亮目标区域通过插值获得 AOD	否

表3 星载大气同步校正仪

Table 3 Synchronous atmospheric correctors for satellites

卫星/平台	大气同步校正仪	参考文献	波段设置	技术特色
EO-1	LAC	[61]	256 个波段(覆盖范围 0.89~1.58 μm)	高光谱载荷
WorldView-3	CAVIS	[62]	中心波长 (nm): 413, 484, 555, 645, 865, 912, 948, 1 236, 1 380, 1 650, 2 175	中高空间分辨率
样机	SMAC	[63]	中心波长 (nm): 490, 550, 670, 865, 910, 1 380, 1 610, 2 250	偏振观测

3 现状和发展趋势讨论

遥感是一个面向应用的交叉学科,大气校正是服务于遥感应用的重要数据处理过程,由于定量化遥感需求快速增加的推动作用,大气校正应用的需求十分迫切.结合国际发展趋势,针对我国高分辨率卫星的大气校正需求,大气校正的现状和发展方向可以大致归纳为以下几个方面:

3.1 面向高分辨率遥感的大气校正

近年来,国内外高空间分辨率卫星大量发射,服务领域也从原来集中服务于国土详查、军事侦察等拓展到各行各业的定量化应用.高空间分辨率遥感图像受到邻近像元的干扰贡献,在大气校正处理的时候更有必要包括邻近效应校正.刘广员等^[66]基于3DMC模型开展了卫星遥感邻近效应的蒙特卡罗模拟,对相关参数进行了敏感性分析,得到一些结论:随着太阳天顶角的增大,邻近效应明显增大;邻近窗口大小受到地表均一性、气溶胶光学厚度和相函数影响;空间分辨率越高,邻近效应越强.

温奇等^[67]将卫星获取的信号分为目标像元的贡献和背景像元的贡献两部分,通过同步测量目标区域和邻近区域的地面反射率,利用逆向最小二乘法确定目标像元贡献率,从而进行了邻近效应校正.Liang等^[68]针对Tanré等^[69]邻近效应校正中背景平均反射直接求解困难的问题,利用三维辐射传输模型SHDOM,提出用有效反射率代替反射率,建立经验方程,实现LandSat ETM+陆地遥感图像的大气校正.然而,很多情况下,在计算邻近效应时需要输入的邻近像元的反射率仍然是难以确定的,因此简便、通用的邻近效应校正方法仍是目前的一个挑战^[70].

3.2 多种大气校正方法融合发展

在不同的应用场合下,遥感图像的大气校正可以使用对应的校正方法,以服务于定性或定量化的地面参数遥感应用.在定量遥感应用领域,基于辐射传输的物理方法是面向大部分应用的通用处理方法,但其在高分辨率图像大气校正方面仍面临许多问题,高分影像大气校正的算法需要结合卫星观测姿态、地表类型、阴影处理等开展细化研究,与地形辐射校正进行深度耦合^[30]提高山区校正精度;对辐射定量化需求并不太强烈的遥感应用,可以结合图像处理的相关方法,针对某个方面提高特定应用需求下的图像质量.

基于辐射传输方法的定量化遥感图像大气校正

在业务化运行时占用大量计算时间,需要从算法级别优化再结合计算机高性能计算^[71],开发既保障高精度,又能快速进行大气校正处理的运行算法.此外,遥感卫星海量数据批量处理,要求研发自动化的大气参数提取和图像校正算法和流程,从而具备业务化处理能力,推动从算法研究到工程实现的转变,促进大气校正正在卫星工程地面系统中具备实用化能力.

3.3 大气校正输入信息的多源化和专用化

大气校正的依据是对大气状况的判断,气溶胶、水汽、云等大气组分的相关参数是开展精确大气校正的数据基础.随着大气环境、气象类卫星在轨运行数量的增多,利用多源卫星大气产品整合形成具备高空间分辨率、高时间分辨率、统一时空参考的大气探测数据集,可以为不具备同时、同区域大气参数同步探测的遥感图像提供交叉大气校正服务.

面向定量化辐射精度要求较高,或者商业价值较高的亚米级空间分辨率卫星数据,大气校正需要时空严格匹配的、更加精准的大气参数,大气同步校正仪随着更多的高分辨率卫星发射而得到发展.随着卫星平台以及载荷技术的发展,大气校正的同步参数探测将朝着更高空间分辨率的方向发展,获得偏振、光谱、角度等多维信息,并充分借助于训练地基数据得到的气溶胶模型等先验知识^[72],实现更加精确的地气解耦合和大气多参数探测.

大气校正是辐射处理的重要环节,包含大气参数提取和图像大气校正两方面的内容,这两部分的精度均严重依赖遥感数据地面处理过程中的几何校正、绝对和相对辐射标定等环节的处理精度.我国规划并已经发射了大量的分辨率遥感卫星,其中高分、资源、环境等系列卫星的数据已经开放使用,但在地面处理系统数据产品方面,目前还较少提供经过几何精纠正的辐射数据,这不利于开展基于辐射传输计算的大气校正,因此未来应统筹考虑几何和辐射校正,满足高精度定量遥感应用的全链路需求.

4 结论

对于地表参数的遥感应用来说,大气校正正在可见-近红外波段范围内是重要的处理环节.大气校正方法多样,不论是定性还是定量的校正方法,都取得了一定程度的应用.定量化的大气校正目前正在从能用到好用的方向迈进.获得更多、更高精度的大气校正所需大气参数,研发高精度、通用的校正方法,

有利于更加精确地描述成像瞬间的辐射场景,获得更高精度的校正效果;具备业务化大气校正能力的地面处理系统,将能够批量制备全球地表定量遥感产品数据集,为地球科学研究和各种行业应用提供系统的观测数据。

参考文献

References

- [1] 赵英时.遥感应用分析原理与方法[M].北京:科学出版社,2003
ZHAO Yingshi. Principle and method of remote sensing application analysis [M]. Beijing: Science Press, 2003
- [2] Wendisch M, Yang P. Theory of atmospheric radiative transfer; A comprehensive introduction [M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012
- [3] Zhang Y H, Li Z Q, Zhang Y, et al. High temporal resolution aerosol retrieval using Geostationary Ocean Color Imager; Application and initial validation [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2014, 8(16): 083612
- [4] 牛铮.光学遥感大气订正总体思路与最新进展[J].遥感技术与应用,1998,13(1):50-55
NIU Zheng. Basic idea and new advance in atmospheric correction for optical remote sensing [J]. Remote Sensing Technology and Application, 1998, 13(1): 50-55
- [5] 马炎,李正强,李浩,等.卫星影像大气校正中气溶胶模型的影响分析:以天津地区为例[J].遥感技术与应用,2014,29(3):410-418
MA Yan, LI Zhengqiang, LI Hao, et al. Influence of aerosol model in the atmospheric correction of satellite images; A case study over Tianjin region [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2014, 29(3): 410-418
- [6] Liang S L, Fallah-Adl H, Kalluri S, et al. An operational atmospheric correction algorithm for Landsat Thematic Mapper imagery over the land [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1997, 102(D14): 17173-17186
- [7] Chen X F, Xing J, Liu L, et al. In-flight calibration of GF-1/WFV visible channels using Rayleigh scattering [J]. Remote Sensing, 2017, 9(6): 513
- [8] Pandya M R, Pathak V N, Shah D B, et al. Retrieval of surface reflectance using SACRS2: A scheme for atmospheric correction of ResourceSat-2 AWiFS data [J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2014, XL-8(8): 865-868
- [9] 郑尧,王琪洁,梁忠壮.太湖地区 HJ-1 卫星 CCD 数据反演气溶胶及大气校正[J].测绘工程,2016,25(5):10-15
ZHENG Yao, WANG Qijie, LIANG Zhongzhuang. Aerosol retrieval and atmospheric correction of HJ-1 satellite CCD data over land surface of Taihu Lake [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2016, 25(5): 10-15
- [10] Zhang Y, Guindon B, Cihlar J. An image transform to characterize and compensate for spatial variations in thin cloud contamination of Landsat images [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 82(2): 173-187
- [11] 姜侯,吕宁,姚凌.改进 HOT 法的 Landsat 8 OLI 遥感影像雾霾及薄云去除[J].遥感学报,2016,20(4):620-631
JIANG Hou, LYU Ning, YAO Lin. HOT-transform based method to remove haze or thin cloud for Landsat 8 OLI satellite data [J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(4): 620-631
- [12] 孙林,于会泳,傅俏燕,等.地表反射率产品支持的 GF-1 PMS 气溶胶光学厚度反演及大气校正[J].遥感学报,2016,20(2):216-228
SUN Lin, YU Huiyong, FU Qiaoyan, et al. Aerosol optical depth retrieval and atmospheric correction application for GF-1 PMS supported by land surface reflectance data [J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(2): 216-228
- [13] Holben B N, Tanré D, Smirnov A, et al. An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol optical depth from AERONET [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, 106(D11): 12067-12097
- [14] Li Z Q, Goloub P, Devaux C, et al. Retrieval of aerosol optical and physical properties from ground-based spectral, multi-angular, and polarized sun-photometer measurements [J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 101(4): 519-533
- [15] Dubovik O, Holben B N, Kaufman Y J, et al. Single-scattering albedo of smoke retrieved from the sky radiance and solar transmittance measured from ground [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1998, 103(D24): 31903-31924
- [16] 朱仁璋,丛云天,王鸿芳,等.全球高分光学星概述(三):亚洲与俄罗斯[J].航天器工程,2016,25(2):70-96
ZHU Renzhang, CONG Yuntian, WANG Hongfang, et al. Global high-resolution optical satellite overview (3): Asia and Russia [J]. Spacecraft Engineering, 2016, 25(2): 70-96
- [17] 童旭东.中国高分辨率对地观测系统重大专项建设进展[J].遥感学报,2016,20(5):775-780
TONG Xudong. Development of China high-resolution earth observation system [J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(5): 775-780
- [18] 王利民,刘佳,杨福刚,等.基于 GF-1 卫星遥感的冬小麦面积早期识别[J].农业工程学报,2015,31(11):194-201
WANG Limin, LIU Jia, YANG Fugang, et al. Early recognition of winter wheat area based on GF-1 satellite [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(11): 194-201
- [19] 丁相元,高志海,孙斌,等.基于高分一号时间序列数据的沙化土地分类[J].国土资源遥感,2017,29(3):196-202
DING Xiangyuan, GAO Zhihai, SUN Bin, et al. Sandy lands classification using GF-1 time series NDVI data [J]. Remote Sensing For land & Resources, 2017, 29(3): 196-202
- [20] 许华,张玉环,侯伟真,等.利用环境一号卫星监测北京地区雾霾[J].遥感学报,2013,17(2):476-477
XU Hua, ZHANG Yuhuan, HOU Weizhen, et al. Remote

- sensing observation of heavy haze in Beijing by HJ-1 satellite in January 2013 [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2013, 17(2):476-477
- [21] 刘明,吴玮,舒阳,等.基于“高分四号”卫星数据的水体提取效果评价[J]. *航天返回与遥感*, 2016, 37(4):96-101
LIU Ming, WU Wei, SHU Yang, et al. Evaluation of water extraction based on GF-4 satellite data [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2016, 37(4):96-101
- [22] 王桥,吴传庆,厉青.环境一号卫星及其在环境监测中的应用[J]. *遥感学报*, 2010, 14(1):104-121
WANG Qiao, WU Chuanqing, LI Qing. Environment Satellite 1 and its application in environmental monitoring [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2010, 14(1):104-121
- [23] Chen X F, Xing J, Liu L, et al. In-flight calibration of GF-1/WFV visible channels using Rayleigh scattering [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(6):513
- [24] Tong X D, Zhao W B, Xing J, et al. Status and development of China high-resolution earth observation system and application [C] // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2016:3738-3741
- [25] 徐伟,金光,王家骥.吉林一号轻型高分辨率遥感卫星光学成像技术[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(8):1969-1978
XU Wei, JIN Guang, WANG Jiaqi. Optical imaging technology of JL-1 lightweight high resolution multispectral remote sensing satellite [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(8):1969-1978
- [26] 刘锋,李琳.光学遥感卫星信息获取能力指数的评估[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(9):2454-2460
LIU Feng, LI Lin. Evaluation of information acquisition capability of optical remote sensing satellites [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(9):2454-2460
- [27] 朱仁璋,丛云天,王鸿芳,等.全球高分光学卫星概述(一):美国和加拿大[J]. *航天器工程*, 2015, 24(6):85-106
ZHU Renzhang, CONG Yuntian, WANG Hongfang, et al. Global high-resolution optical satellite overview (1): USA and Canada [J]. *Spacecraft Engineering*, 2015, 24(6):85-106
- [28] 顾行发,陈兴峰,程天海,等.多角度偏振遥感相机DPC在轨偏振定标[J]. *物理学报*, 2011, 60(7):165-172
GU Xingfa, CHEN Xingfeng, CHENG Tianhai, et al. In-flight polarization calibration methods of directional polarized remote sensing camera DPC [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(7):165-172
- [29] 潘志强,顾行发,刘国栋,等.基于探元直方图匹配的CBERS-01星CCD数据相对辐射校正方法[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2005, 30(10):925-927
PAN Zhiqiang, GU Xingfa, LIU Guodong, et al. Relative radiometric correction of CBERS-01 CCD data based on detector histogram matching [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(10):925-927
- [30] Vanonckelen S, Lhermitte S, Rompaey A V. The effect of atmospheric and topographic correction methods on land cover classification accuracy [J]. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation*, 2013, 24(1):9-21
- [31] Yu K, Liu S H, Zhao Y C. CPBAC: A quick atmospheric correction method using the topographic information [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 186:262-274
- [32] 曹军骥.我国PM_{2.5}污染现状与控制对策[J]. *地球环境学报*, 2012, 3(5):1030-1036
CAO Junji. Pollution status and control strategies of PM_{2.5} in China [J]. *Journal of Earth Environment*, 2012, 3(5):1030-1036
- [33] Zhang Q, He K B, Huo H. Policy: Cleaning China's air [J]. *Nature*, 2012, 484(7393):161-162
- [34] Stocker T F, Qin D, Plattner GK, et al. IPCC climate change 2013: The physical science basis [M]. Cambridge University Press, 2013
- [35] 吴昫昭,宫鹏.北京一号小卫星MTF在轨测量与图像复原[J]. *遥感信息*, 2007, 2007(3):49-53
WU Junzhao, GONG Peng. On-orbit MTF estimation and restoration of Beijing-1 images [J]. *Remote Sensing Information*, 2007, 2007(3):49-53
- [36] 胡宝新,李小文,朱重光,等.一种大气订正的方法:BRDF——大气订正环[J]. *环境遥感*, 1996, 11(2):151-160
HU Baoxin, LI Xiaowen, ZHU Chongguang, et al. A new method for atmospheric correction: BRDF—atmospheric correction loop [J]. *Remote Sensing of Environment China*, 1996, 11(2):151-160
- [37] 元雪勇,田庆久.光学遥感大气校正研究进展[J]. *国土资源遥感*, 2005, 17(4):1-6
QI Xueyong, TIAN Qinjiu. The advance in the study of atmospheric correction for optical remote sensing [J]. *Remote Sensing For land & Resources*, 2005, 17(4):1-6
- [38] 赵锦威,沈逸云,刘春晓,等.暗通道先验图像去雾的大气光校验和光晕消除[J]. *中国图象图形学报*, 2016, 21(9):1221-1228
ZHAO Jinwei, SHEN Yiyun, LIU Chunxiao, et al. Dark channel prior-based image dehazing with atmospheric light validation and halo elimination [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2016, 21(9):1221-1228
- [39] 代书博,徐伟,朴永杰,等.基于暗原色先验的遥感图像去雾方法[J]. *光学学报*, 2017(3):341-347
DAI Shubo, XU Wei, PIAO Yongjie, et al. Remote sensing image defogging based on dark channel prior [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017(3):341-347
- [40] He K M, Sun J, Tang X O. Single image haze removal using dark channel prior [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(12):2341-2353
- [41] He K M, Sun J, Tang X O. Single image haze removal using dark channel prior [C] // *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2009:1956-1963
- [42] Zhang Y, Guindon B, Cihlar J. An image transform to characterize and compensate for spatial variations in thin cloud contamination of Landsat images [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 82(2):173-187
- [43] 李坤,兰时勇,张建伟,等.改进的基于暗原色先验的图像去雾算法[J]. *计算机技术与发展*, 2015, 16(2):

- 6-11
LI Kun, LAN Shiyong, ZHANG Jianwei, et al. An improved algorithm of haze removal based on dark channel prior [J]. Conference on Computer Technology and Development, 2015, 16(2):6-11
- [44] 梁健,巨海娟,张文飞,等.偏振光学成像去雾技术综述[J].光学学报,2017(4):1-13
LIANG Jian, JU Haichang, ZHANG Wenfei, et al. Review of optical polarimetric dehazing technique [J]. Acta Optica Sinica, 2017(4):1-13
- [45] 王建新,张有会,王志巍,等.基于 HSI 颜色空间的单幅图像去雾算法[J].计算机应用,2014,34(10):2990-2995
WANG Jianxin, ZHANG Youhui, WANG Zhiwei, et al. Single image defogging algorithm based on HSI color space [J]. Journal of Computer Applications, 2014, 34(10):2990-2995
- [46] 纪红霞,姚军,潘延鹏,等.基于暗通道先验的无人机图像去雾算法研究[J].光学与光电技术,2016,14(5):53-56
JI Hongxia, YAO Jun, PAN Yanpeng, et al. An method of image haze removal by dark channel prior for UAV [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2016, 14(5):53-56
- [47] 王京卫.测绘无人机低空数字航摄影像去雾霾研究[J].测绘学报,2016,45(2):251-251
WANG Jingwei. Study of the geo-UAV low-altitude digital aerial image haze removal [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(2):251-251
- [48] Vermote E F, Tanré D, Deuze J L, et al. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1997, 35(3):675-686
- [49] Berk A, Bernstein L S, Anderson G P, et al. MODTRAN cloud and multiple scattering upgrades with application to AVIRIS [J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 65(3):367-375
- [50] Adlergolden S M, Matthew M W, Bernstein L S, et al. Atmospheric correction for shortwave spectral imagery based on MODTRAN4 [C] // Proceedings of SPIE, 1999, 3753:61-69
- [51] Richter R. Atmospheric correction of satellite data with haze removal including a haze/clear transition region [J]. Computers & Geosciences, 1996, 22(6):675-681
- [52] 麻金继,陈浩.基于 ATCOR3 模型的大气校正应用研究[J].大气与环境光学学报,2009,4(3):211-216
MA Jinji, CHEN Hao. Application of atmospheric correction based on ATCOR3 model [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2009, 4(3):211-216
- [53] Evans K F, Stephens G L. A new polarized atmospheric radiative transfer model [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 1991, 46(5):413-423
- [54] Kaufman Y J, Sendra C. Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-IR satellite imagery [J]. International Journal of Remote Sensing, 1988, 9(8):1357-1381
- [55] 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
WANG Zhongting, LI Xiaoying, LI Shenshen, et al. Quickly atmospheric correction for GF-1 WFV cameras [J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(3):353-360
- [56] 郭红,顾行发,谢勇,等.基于 ZY-3 CCD 相机数据的暗像元大气校正方法分析与评价 [J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(8):2203-2207
GUO Hong, GU Xingfa, XIE Yong, et al. Evaluation of four dark object atmospheric correction methods based on ZY-3 CCD Data [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(8):2203-2207
- [57] 王爱春,傅俏燕,闵祥军,等. HJ-1A/B 卫星 CCD 影像大气订正 [J]. 中国科学: 信息科学, 2011, 41(增刊1):81-93
WANG Aichun, FU Qiaoyan, MIN Xiangjun, et al. Atmospheric correction for the HJ-1A/B satellite CCD sensor [J]. Scientia Sinica Informationis, 2011, 41(sup1):81-93
- [58] 谢东海,程天海,吴侃,等.耦合京津冀气溶胶模式的 HJ-1 卫星 CCD 数据大气校正 [J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(5):1284-1290
XIE Donghai, CHENG Tianhai, WU Yu, et al. Atmospheric correction for HJ-1 CCD data coupling with aerosol models of Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(5):1284-1290
- [59] 赵巧华,何金海.基于资源卫星图像对 NDVI 进行大气修正的一种简单方法 [J]. 南京气象学院学报, 2003, 26(2):236-242
ZHAO Qiaohua, HE Jinhai. A simple method for processing atmospheric modification to NDVI based on satellite image of China Brazil environment resource satellite [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2003, 26(2):236-242
- [60] 舒敏,闻德保,张浩,等.高分 2 号图像业务化大气校正查找表的设计与实现 [J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(5):683-690
SHU Min, WEN Debao, ZHANG Hao, et al. Design and implementation of operational atmospheric correction look-up tables for GF-2 image [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(5):683-690
- [61] Reuter D C, McCabe G H, Dimitrov R, et al. The LEISA/Atmospheric Corrector (LAC) on EO-1 [C] // IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001:46-48
- [62] Digital Globe. WorldView 3: Above + beyond [EB/OL]. [2017-11-15]. <http://worldview3.digitalglobe.com/>
- [63] 胡亚东,胡巧云,孙斌,等.遥感图像双角度偏振大气校正仪 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(3):652-659
HU Yadong, HU Qiaoyun, SUN Bin, et al. Double-angle polarized atmospheric corrector for remote sensing images [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(3):652-659
- [64] 康晴,袁银麟,李健军,等.大气同步校正仪的滤光片筛选方法与精度验证实验研究 [J]. 光学学报, 2017(3):219-229
KANG Qing, YUAN Yinlin, LI Jianjun, et al. Filtration and precision verification of optical filters on atmospheric synchronous corrector [J]. Acta Optica Sinica, 2017(3):219-229
- [65] Qie L L, Li Z Q, Sun X B, et al. Improving remote sensing

- of aerosol optical depth over land by polarimetric measurements at 1 640 nm: Airborne test in North China[J]. Remote Sensing, 2015, 7(5): 6240-6256
- [66] 刘广员, 邱金桓. 卫星对地遥感应应用中的邻近效应研究[J]. 大气科学, 2004, 28(2): 311-319
LIU Guangyuan, QIU Jinhuan. Adjacency effect of satellite remote sensing on land surface studies [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2004, 28(2): 311-319
- [67] 温奇, 马建文, 陈雪, 等. 遥感影像邻近效应的实测数据校正(II)[J]. 遥感学报, 2007, 11(2): 159-165
WEN Qi, MA Jianwen, CHEN Xue, et al. Correction with ground measurement data for adjacency effect in remote sensing images[J]. Journal of Remote Sensing, 2007, 11(2): 159-165
- [68] Liang S, Fang H, Chen M. Atmospheric correction of Landsat ETM+land surface imagery. I. Methods [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(11): 2490-2498
- [69] Tanré D, Herman M, Deschamps P Y. Influence of the background contribution upon space measurements of ground reflectance [J]. Applied Optics, 1981, 20(20): 3676-3684
- [70] 梁顺林. 定量遥感[M]. 北京: 科学出版社, 2009
LIANG Shunlin. Quantitative remote sensing of land surface[M]. Beijing: Science Press, 2009
- [71] 白连红, 徐澍, 司一丹, 等. 高性能大气校正算法中遥感数据切分策略研究[J]. 计算机工程与科学, 2016, 38(5): 857-862
BAI Lianhong, XU Shu, SI Yidan, et al. A remote sensing data division strategy in a high-performance atmospheric correction algorithm [J]. Computer Engineering & Science, 2016, 38(5): 857-862
- [72] 李正强, 李东辉, 李凯涛, 等. 扩展多波长偏振测量的太阳-天空辐射计观测网[J]. 遥感学报, 2015, 19(3): 495-519
LI Zhengqiang, LI Donghui, LI Kaitao, et al. Sun-sky radiometer observation network with the extension of multi-wavelength polarization measurements [J]. Journal of Remote Sensing, 2015, 19(3): 495-519

An overview of atmospheric correction for optical remote sensing satellites

LI Zhengqiang¹ CHEN Xingfeng¹ MA Yan¹ QIE Lili¹ HOU Weizhen¹ QIAO Yanli²

¹ State Environmental Protection Key Laboratory of Satellite Remote Sensing,

Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

² Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Hefei Institute of Physical Science,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031

Abstract Driven by the demand of high resolution remote sensing applications, many optical remote sensing satellites with higher spatial resolution have been launched. But the extraction of the surface information from satellite image is also more and more affected by the worse atmospheric conditions with the increase of sensor resolution. The atmospheric correction of optical remote sensing images is facing new situation and challenges due to new payload characteristics and upgraded application demands. Therefore a brief summary with simple analysis of the atmospheric correction methods is valuable. This paper introduces the current status and principle of atmospheric correction methods for optical remote sensing. According to the different approaches obtaining atmospheric parameters, these methods are classified into four catalogues, including the image graphical processing, the radiative transfer computing, the atmospheric parameters inversion from own-image, and the synchronous atmospheric corrector methods. At the end of this paper, with consideration of the development of Chinese high resolution satellites, the application status of atmospheric correction and future developments are discussed.

Key words optical remote sensing; atmospheric correction; quantitative remote sensing; high resolution; radiative transfer