

联合统计信息与散射模型的 GF-5 AHSI 可见光影像薄云校正

张弛¹, 李慧芳¹, 沈焕锋^{1,2}

1. 武汉大学 资源与环境科学学院, 武汉 430079;

2. 地球空间信息技术协同创新中心, 武汉 430079

摘要: 针对高分五号可见短波红外高光谱相机 AHSI (visible-shortwave infrared Advanced HyperSpectral Imager) 可见光波段存在的薄云干扰, 本文提出了一种联合统计信息与散射模型的校正方法。利用 AHSI 影像邻近波段间地表与云雾辐射的统计差异, 实现对不同场景下相对薄云辐射 RCR (Relative Cloud Radiance) 的准确估计。基于此, 根据不同波段的散射特性, 分别利用分级暗目标统计和散射模型约束策略, 获取可见光波段的绝对云辐射强度, 最终实现影像校正。通过设置模拟与真实实验对方法的有效性和鲁棒性进行目视和定量检验。模拟实验中, 可见光波段内的薄云干扰均可被有效地去除, 校正结果与真实地表十分一致; 此外, RMSE (Root-Mean-Square Error), MAE (Mean Absolute Error) 和 SA (Spectral Angle) 3 个评价指标的值分别为 1.9891, 1.6822 和 0.4901, 远小于对比方法。真实实验中, 不同场景内的薄云可被有效抑制, 在较为准确恢复降质地表信息的同时保持晴空区光谱特征; Q 指数, SSIM (Structural Similarity Index) 和 UQI (Universal Quality Index) 的计算结果优于对比方法。综上, 本文提出方法可用于不同场景下高分五号 AHSI 影像可见光波段的薄云校正, 可得到目视效果良好且光谱保真度高的校正结果。

关键词: 遥感, 高分五号 AHSI 数据, 可见光影像, 统计信息, 大气散射模型, 薄云校正

引用格式: 张弛, 李慧芳, 沈焕锋. 2020. 联合统计信息与散射模型的 GF-5 AHSI 可见光影像薄云校正. 遥感学报, 24(4): 368-378

Zhang C, Li H F and Shen H F. 2020. Thin cloud correction for GF-5 AHSI visible images by combining statistical information with scattering model. Journal of Remote Sensing (Chinese), 24(4): 368-378 [DOI: 10.11834/jrs.20209271]

1 引言

随着航空航天科学的发展, 遥感技术逐渐成为获取宏观地理空间信息的重要手段, 被越来越多地应用于目标识别、变化检测、国土资源调查和高质量城市底图制作等领域(代书博等, 2017)。然而, 光学遥感成像过程易受大气条件影响, 特别是云、雾等天气现象在很大程度上干扰了遥感影像对真实地表信息的表达, 降低了数据的有效性和可用性(许华等, 2013; Tarel 和 Hautière, 2009)。因此, 有效地消除云雾所致的辐射偏差, 对于遥感数据质量和精度的提升具有重要意义。

当前广泛使用的遥感影像薄云校正方法主要包括基于辐射传输模型的校正方法, 基于统计信息的校正方法和其他方法等。基于辐射传输模型的方法通过考虑不同环境因素对辐射传输的影响, 并对其进行正向建模, 以消除光学遥感影像中的大气效应(王中挺等, 2016; 方莉等, 2013; Vermote 等, 2002; Richter, 1996)。总的来说, 该类方法物理意义明确, 可取得较高精度的校正结果。然而, 模型对参数要求较高且通常难以获取; 此外, 方法对于薄云等精细尺度的大气效应难以消除, 限制了其普适性。

相对而言, 基于统计信息的方法不依赖于模型与参数, 仅利用云雾的空间和光谱统计特征便

收稿日期: 2019-07-18; 预印本: 2019-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 41871246, 41631180)

第一作者简介: 张弛, 1995年生, 男, 博士研究生, 研究方向为光学遥感影像薄云雾去除等。E-mail: zhangchi9502@outlook.com

通信作者简介: 李慧芳, 1985年生, 女, 副教授, 研究方向为遥感信息处理、城市热环境分析。E-mail: huifangli@whu.edu.cn

能实现校正, 主要包括基于频率域的校正方法、基于暗目标的校正方法和基于光谱变换的校正方法。基于频率域的方法主要利用云雾的低频性, 通过抑制低频信息并增强高频信息实现影像校正 (Shen 等, 2014; Liu 等, 2014)。由于云雾仅表征部分低频信息, 因此该类方法在去除薄云的同时会不可避免地造成有效低频信息的丢失。基于暗目标的方法通过在全局或局部查找暗目标的方式对云雾的空间分布与强度进行估计和去除, 查找范围可以是单波段或多波段 (Chavez, 1988; Makarau 等, 2014; He 等, 2010; Pan 等, 2015)。对于暗目标存在且分布广泛的区域, 该类方法可取得较好的校正结果。然而, 当暗目标缺乏时, 如高亮地表, 方法性能将会受到限制。基于光谱变换的方法主要利用云雾与地表在波段间的辐射差异实现云雾的检测和校正 (Zhang 等, 2002; Yang 等, 2015; 姜侯 等, 2016)。这类方法通常对影像进行全局处理, 容易导致非云区的辐射变化, 从而引起校正结果出现光谱畸变。综上, 现有基于统计信息的云雾校正方法常常受限于场景, 且没有顾及波段间的相关性, 导致全局或局部光谱畸变问题, 难以保障校正后数据的精度。其他方法主要包括波段比值法和基于深度学习的方法等 (Ebenezer 等, 2019; Jiang 和 Lv, 2018; Wu 等, 2012)。当所需波段和训练样本充足且具有代表性时, 该类方法可取得较好的校正结果。但对处理数据提出了更高的要求, 限制其应用。

因此, 针对上述尺度不适用、场景和数据受限以及光谱畸变等问题, 提出联合统计信息与散射模型的可见光影像薄云校正方法, 并以高分五号 (GF-5) 高光谱分辨率影像进行使用验证。

2 影像观测模型与数据

2.1 影像观测模型

多云成像条件下, 传感器的入瞳处辐射值可认为主要由地表辐射与云雾辐射组成 (Gao 等, 2002; Lv 等, 2016), 即

$$\rho_i^* = \rho_i + \rho_{ci} \quad (1)$$

式中, ρ_i^* 为波段 i 的入瞳处辐射值, ρ_i 和 ρ_{ci} 为对应的地表与云雾辐射。根据大气散射模型, ρ_{ci} 可进一步表示为与波长、光强分布函数和散射颗粒大小等相关的函数 (Bucholtz, 1995; Curcio, 1961;

Li 等, 2012; Rayleigh, 1881)

$$\rho_{ci} = \frac{D}{\lambda_i^\gamma} \quad (2)$$

式中, D 为光强分布函数, 与散射角度、散射颗粒极化性和传感器与散射颗粒距离相关; λ_i 表示波段 i 的中心波长; γ 反映散射类型, 从非选择性散射到瑞利散射, γ 的取值范围为 $[0, 4]$ 。

由式 (1) 可知, 若要得到高光谱保真的校正结果, 需准确估计出符合大气散射规律的多波段云雾辐射, 并将其从影像中去除。

2.2 数据

GF-5 卫星于 2018-05-09 在太原卫星发射中心成功发射, 搭载了 2 台高光谱/多光谱陆地观测载荷和 4 台大气类观测载荷, 可实现对陆地与大气的同步观测 (刘文清, 2019)。本文所使用数据来源于其中的可见短波红外高光谱相机 AHSI (visible-shortwave infrared Advanced HyperSpectral Imager), 该相机具有 330 个探测通道, 可获取 0.4—2.5 μm 谱段的图像和连续光谱信息。其光谱分辨率在可见光和近红外谱段内为 5 nm, 在短波红外谱段内为 10 nm (刘银年, 2018)。其中, 可见光波段受云雾干扰较为显著, 因此本文以涵盖 AHSI 数据可见光谱段的第 13 至 61 波段为处理对象, 开展薄云校正方法验证。

3 薄云校正方法

对于高光谱遥感影像, 清晰像元的地表辐射在邻近波段间存在显著线性关系。当像元受云雾影响时, 由于散射强度在不同波段的差异性, 云雾像元将偏离上述线性关系, 且偏移量与云雾辐射强度呈正相关 (Zhang 等, 2002; Jiang 等, 2016)。因此, 本文利用高分五号 AHSI 数据邻近波段间的清晰像元构建线性参考, 对场景中的相对薄云强度进行估计。进一步地, 结合分级薄云辐射估计策略与大气散射模型计算出符合散射规律的多波段薄云辐射, 从而实现可见光影像的薄云校正。

3.1 相对薄云辐射估计

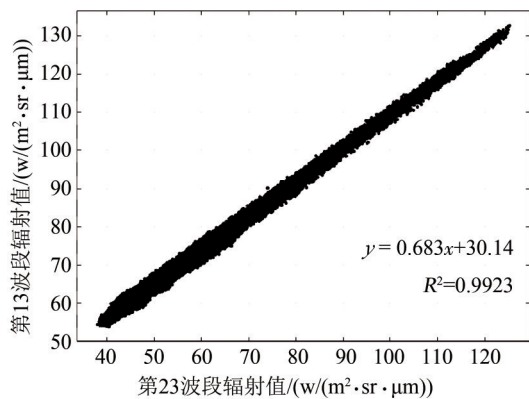
假设晴空条件下, AHSI 数据邻近波段对 i 和 j 的地表辐射 ρ_i 和 ρ_j 存在如下的线性关系

$$\rho_i = a \cdot \rho_j + b \quad (3)$$

式中, a 和 b 为线性关系的增益与偏置, 可通过回归清晰像元获得。为准确地估计出相对薄云辐射, 波段 i, j 应对薄云影响敏感、强度具有一定差异且两者间地表辐射线性关系稳健。在可见光波段内, 蓝光波段受薄云干扰最为显著。经过对该谱段内满足条件的波段组合进行测试, 发现第 13 (441.672 nm) 和第 23 波段 (484.462 nm) 数据质量较高且满足上述条件。因此, 本文利用第 13 与 23 波段进行相对薄云辐射估计。图 1 (a) 为随机选取的 AHSI 影像, 图 1 (b) 为对应的第 13 与第 23 波段拟合结果, 可知两波段地表辐射间存在显著的线性关系, 决定系数 R^2 高达 0.9923。



(a) 无云高分五号 AHSI 数据
(a) Cloud free GF-5 AHSI data



(b) 第 13 与 23 波段辐射散点图
(b) Scatter plot of ground radiance between bands 13 and 23

图 1 无云高分五号 AHSI 数据(红:第 61 波段, 647.076 nm; 绿:第 38 波段, 548.666 nm; 蓝:第 23 波段, 484.462 nm)和第 13、23 波段地表辐射散点图

Fig. 1 An example of a clear GF-5 AHSI image (red: band 61, 647.076 nm; green: band 38, 548.666 nm; blue: band 23, 484.462 nm) and the corresponding ground radiance scatter plot between bands 13 and 23

多云条件下, 传感器所接收辐射除地表辐射外还包含云雾辐射。此时, 第 13 和 23 波段的人瞳处辐射可表示为

$$\begin{aligned}\rho_{13}^* &= \rho_{13} + \rho_{c13} \\ \rho_{23}^* &= \rho_{23} + \rho_{c23}\end{aligned}\quad (4)$$

根据式 (2) 可知, ρ_{c13} 和 ρ_{c23} 间的关系可定量表示为

$$\rho_{c13} = \left(\frac{\lambda_{23}}{\lambda_{13}} \right)^\gamma \cdot \rho_{c23} \quad (5)$$

式中, γ 在给定场景内可视为常数, 因此 ρ_{c13} 正比于 ρ_{c23} 。联立式 (3)、(4) 和 (5), 可得

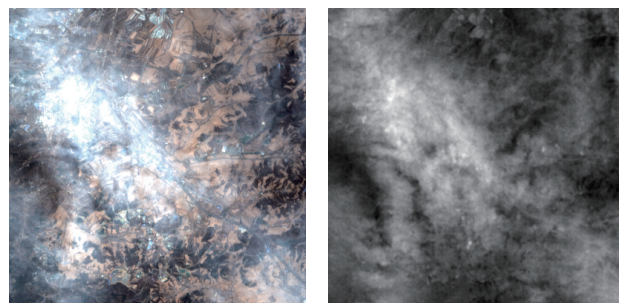
$$\rho_{13}^* - a \cdot \rho_{23}^* - b = \varepsilon \cdot \rho_{c13} \quad (6)$$

式中, ε 为常数。由此可见, 人瞳处辐射在相邻两个波段的差异与云辐射正相关, 即相对薄云辐射 RCR (Relative Cloud Radiance) 可以表示为

$$RCR = \rho_{13}^* - \phi(\rho_{23}^*) \quad (7)$$

式中, $\phi(\cdot)$ 表示以 a 和 b 为增益和偏置的线性变换。因此, RCR 与云雾辐射强度成正比, 可准确地描述场景中云雾的空间分布和相对强度。

图 2 (a) 为薄云覆盖的 AHSI 影像, 其对应的相对薄云辐射 RCR 如图 2 (b) 所示。对比两者可以发现, RCR 较为准确地表征了影像中的云雾空间分布与强度, 且几乎不包含任何地表信息, 后续实验部分将进一步检验其有效性。



(a) GF-5 薄云数据
(a) GF-5 thin cloud data
(b) RCR
(b) RCR

图 2 高分五号 AHSI 薄云数据(红:第 61 波段;绿:第 38 波段;蓝:第 23 波段)及其对应 RCR

Fig. 2 GF-5 AHSI thin cloud image (red: band 61, green: band 38, blue: band 23) and the corresponding RCR

3.2 绝对薄云辐射计算与校正

对于空间分布均匀的大气干扰, 可以利用暗目标估算大气辐射 (Chavez, 1988); 而对于具有显著空间异质性的薄云, 则需要分级估算,

使得在同一级别内大气满足匀质假设 (Jiang 等, 2016)。 RCR 可准确反映影像中薄云的空间分布与相对强度, 因此各级薄云辐射应与 RCR 存在一定的线性关系。基于以上分析, 本文构建了分级薄云辐射计算方法, 具体步骤如下: 首先, 以 RCR 为基准对影像进行分级, 确保各级云雾辐射强度一致或相近, 即 RCR 值稳定; 然后, 逐波段地统计每一级最小百分位辐射值并将其作为暗目标辐射; 最后通过拟合多级暗目标辐射与 RCR 的关系曲线估计绝对薄云辐射, 完成校正。

以图 2 为例, 设置分级数为 120, 最小百分位数为 5%, 得到可见光波段分级暗目标辐射与 RCR

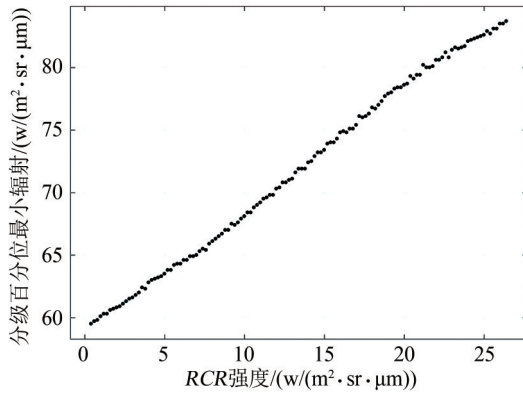
间的散点统计结果。图 3 显示了第 13、23、38 和 61 波段的统计结果。由图 3 (a) — (c) 可见, 在蓝波段 (13 和 23 波段) 和绿波段 (38 波段), 暗目标辐射值随着 RCR 值的增长而稳步线性上升, 两者间的关系可表示为

$$\rho_{D,i} = k_i \cdot RCR + d_i \quad (8)$$

式中, $\rho_{D,i}$ 为波段 i 的暗目标辐射值, k_i 和 d_i 分别为对应拟合曲线的斜率与截距。当 RCR 值等于 0 时, 影像不受云雾干扰, 此时对应的辐射值为非云区的基准辐射, 即无云时目标的自身辐射。因此, 蓝波段和绿波段的绝对薄云辐射可表示为

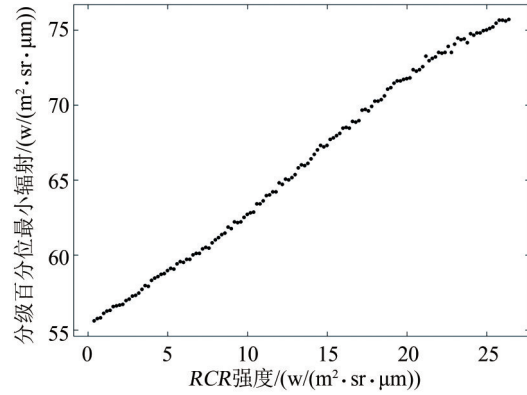
$$\rho_{ci} = k_i \cdot RCR \quad (9)$$

式中, k_i 表示对应波段与 RCR 的拟合斜率。



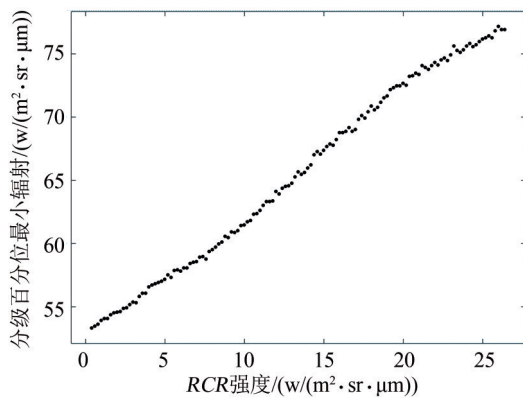
(a) 第 13 波段分级统计结果

(a) Hierarchical statistical result of 13th band



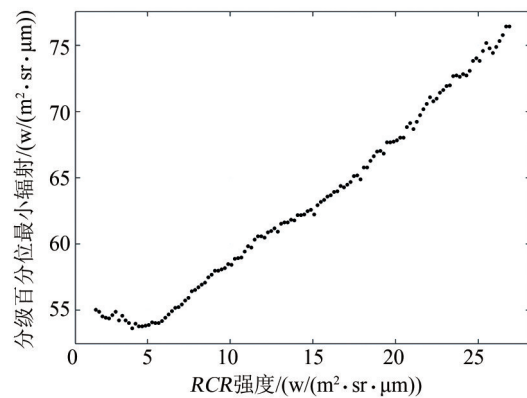
(b) 第 23 波段分级统计结果

(b) Hierarchical statistical result of 23th band



(c) 第 38 波段分级统计结果

(c) Hierarchical statistical result of 38th band



(d) 第 61 波段分级统计结果

(d) Hierarchical statistical result of 61th band

图 3 RCR 与第 13、23、38 和 61 波段分级统计结果

Fig. 3 Hierarchical statistical results between RCR and 13th band, 23th, 38th, and 61th band

从图 3 (d) 可以发现, 不同于蓝、绿波段, 在红波段上 (61 波段) 暗目标辐射值并不随 RCR 稳健地线性增长, 甚至在 $[0, 5]$ 区间出现了递

减的趋势。这是由于随着波长的增大, 红波段中的云像素混合了更多的地表信息, 暗目标辐射对大气辐射的表征性减弱, 导致式 (9) 不适用于红

波段以及波长更大的波段。因此,需要寻求一种更稳健的方式计算红波段的云辐射。

由式(2)可知,波段间的云辐射能够相互表征,其关系取决于中心波长 λ 与参数 γ 。中心波长已知,而参数 γ 在可见光波段可视为常数,则可利用已获得的蓝波段和绿波段的云辐射计算得到参数 γ 的值,即

$$\gamma = \log_{\frac{\lambda_i}{\lambda_j}} \frac{k_j}{k_i} \quad (10)$$

式中, i, j 分别表示蓝、绿波段中的任意两波段。经测试,上式中代入不同波段时,获得的 γ 值基本一致。至此,红波段的绝对云辐射可表示为

$$\rho_{cr} = \left(\frac{\lambda_l}{\lambda_r} \right)^\gamma \cdot \rho_{cl} \quad (11)$$

式中, ρ_{cr} 为估计的红波段薄云辐射。 ρ_{cl} 为已知的绝对云辐射,即蓝波段或绿波段,理论上选择暗目标辐射与 RCR 线性关系最显著的波段最为稳健。

在获得各可见光波段绝对薄云辐射的基础上,根据式(1)便可得到无云校正结果,即

$$\rho_i = \rho_i^* - \rho_{ci} \quad (12)$$

式中,下标 i 表示待校正的可见光波段序号。

4 实验与分析

为验证提出方法对高分五号 AHSI 数据的有效性和鲁棒性,选取不同场景下的多幅影像进行模拟与真实实验。通过目视与定量评价检验校正结果,其中模拟实验选取均方根误差 RMSE (Root Mean Square Error)、平均绝对误差 MAE (Mean Absolute Error) 和光谱角 SA (Spectral Angle) 3 个指标来衡量校正结果与真实地表的辐射差异,真实实验则利用无参考的 Q 指数来衡量影像清晰度的提升幅度,利用 SSIM (Structural Similarity Index) 和 UQI (Universal Quality Index) 评价校正前后影像的结构一致性。此外,选取两种经典的薄云校正方法,最优云雾变换法 HOT (Haze Optimized Transformation) (Zhang 等, 2002) 和改进的暗通道先验法 IDCP (Improved Dark Channel Prior) (Pan 等, 2015) 与本文提出方法进行对比分析。

4.1 模拟实验

基于影像观测模型和大气散射模型可实现薄

云影像模拟。其中,地表辐射 ρ 取自无云高分五号 AHSI 可见光数据,薄云辐射 ρ_c 以 Landsat 8 OLI 云检测波段为基准,通过大气散射模型推导出各波段对应的云雾辐射分布。

图4(a)为模拟薄云影像,图4(b)—图4(d)分别为 HOT、IDCP 和提出方法的校正结果,图4(e)为真实地表。图4(f)和图4(g)分别为参考云辐射和本文方法估计的相对薄云辐射 RCR ,图4(h)则表示两者的散点图。目视评价可以发现, HOT 去除了影像中的大部分云雾干扰,较好地恢复了降质区域的纹理和结构。然而,无论是云区还是非云区,校正结果和真实地表间均存在较大的光谱偏差。这说明 HOT 在去除云雾影响的同时也改变了真实的地表信息。相较于 HOT 而言, IDCP 较好地维持了非云区的光谱特征但仅有部分薄云得到了有效抑制。这主要是因为 IDCP 对影像进行逐窗口校正,当云雾强度在局部变化剧烈时,容易出现校正不足的问题。本文提出的方法能够完全去除影像中的薄云干扰,校正后影像的色彩与真实地表十分一致,如图4(d)所示。这表明提出方法在去除云雾干扰的同时还较大程度地保证恢复光谱的准确性。对比参考云辐射与相对薄云辐射 RCR 可知,两者对云雾的刻画无论是在空间分布还是强度上都具有高度的一致性,其决定系数 R^2 可达 0.9445。总的来说,相较于两种对比方法,本文提出的方法在薄云校正和光谱保真能力上都具有一定的优势,估计的相对薄云辐射 RCR 可准确对反映场景中云的空间与辐射特征,为薄云的高保真去除提供有力支撑。

选取 RMSE、MAE 与 SA 等 3 个定量评价指标进一步衡量不同校正结果与真实地表的辐射与光谱差异,其计算公式为

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{n=1}^m (\rho_n - \hat{\rho}_n)^2} \quad (13)$$

$$MAE = \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m |\rho_n - \hat{\rho}_n| \quad (14)$$

$$SA = \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m \cos^{-1} \frac{\rho_n^T \hat{\rho}_n}{\sqrt{\rho_n^T \rho_n} \sqrt{\hat{\rho}_n^T \hat{\rho}_n}} \quad (15)$$

式中, n 为像元序号, m 为总像元数, ρ 和 $\hat{\rho}$ 分别为校正结果和真实地表。RMSE 和 MAE 单位为 $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$, SA 单位为弧度。

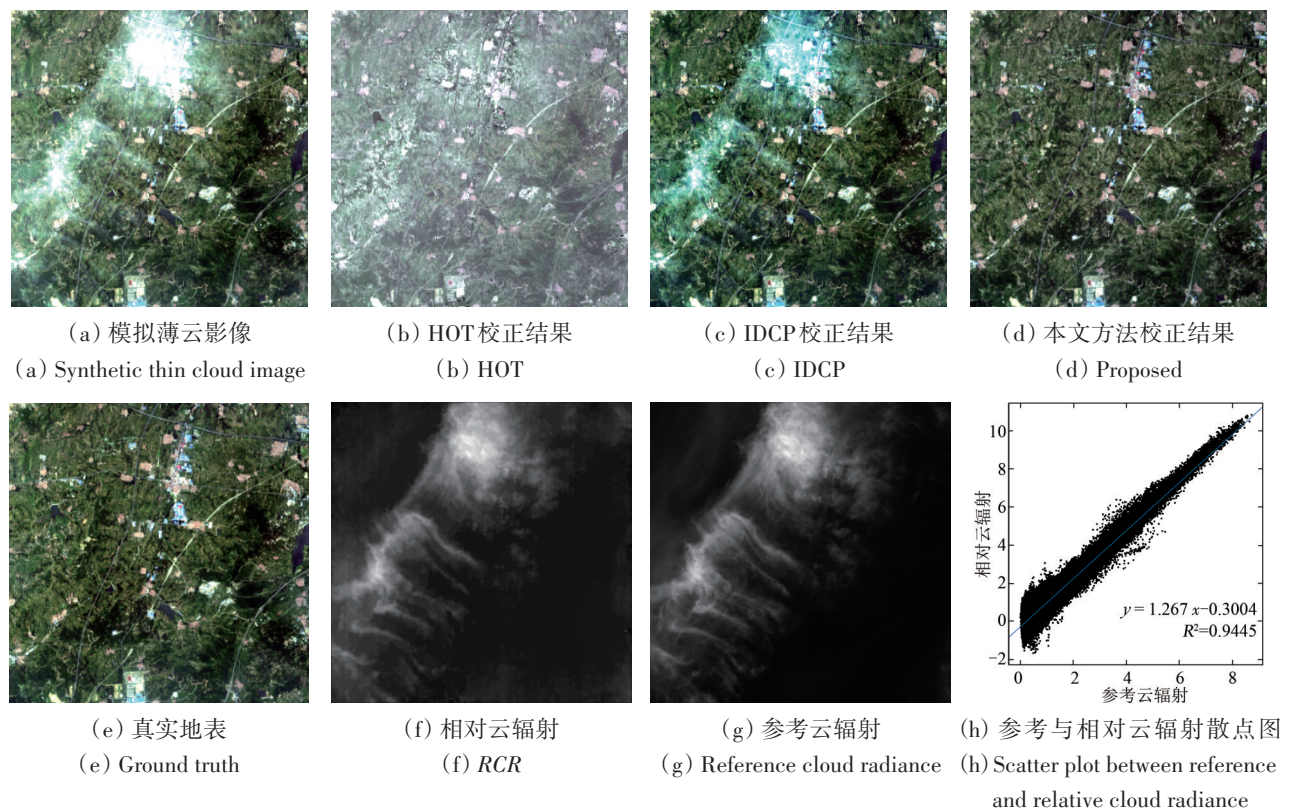


图4 模拟高分五号 AHSI 云雾影像实验结果比较(红:第61波段;绿:第38波段;蓝:第23波段)

Fig. 4 Experimental comparison of synthetic GF-5 thin cloud image (red: band 61; green: band 38; blue: band 23)

各指标计算结果如表1所示。总的来说,经过不同方法校正后,对应的RMSE、MAE和SA均有所降低,说明云雾干扰均得到了有效抑制。观察HOTA的结果可知, RMSE和MAE分别从9.3558和6.1422减小至5.5271和3.6887。这意味着各波段的辐射值更接近真实地表。SA值的降低幅度则相对较小,这说明校正结果的光谱依然与真实地表存在较大差异。IDCP在3个指标上的表现与HOTA类似,其RMSE、MAE和SA分别降低至5.7128、3.3611和1.3479。相较于前两者,提出方法在3个指标的值均为最小且下降幅度最大, RMSE、MAE和SA分别降低至1.9891、1.6822和0.4901。这表面提出的方法可以较为准确地恢复降质信息,校正结果与真实地表更为接近。

表1 定量评价指标统计结果

Table 1 Quantitative assessment of different thin cloud removal results

	原始影像	HOTA	IDCP	本文方法
RMSE	9.3558	5.5271	5.7128	1.9891
MAE	6.1422	3.6887	3.3611	1.6822
SA	1.4155	1.2221	1.3479	0.4901

注:黑体为最优值。

4.2 真实实验

图5展示了4幅不同地表覆被类型的高分五号AHSI影像及对应校正结果,其中第1列为薄云影像,第2—4列分别为HOTA、IDCP和本文方法的结果。观察可知,第1幅影像主要覆盖了大面积耕地和水体,第2幅影像主要地表覆被类型为暗色植被与高亮裸土,第3幅影像则主要由浓密植被构成,第4幅影像主要包含了密集的地表人工建筑。如HOTA结果所示,大部分薄云干扰均可被有效去除,还原地表真实纹理结构。但在部分场景中依然存在部分残留且出现了不同程度的光谱畸变,如图5(b)中的水体区域和图5(n)中的人工建筑物所示。这表明HOTA的薄云校正与光谱保真能力在不同场景中存在差异。相较于HOTA而言, IDCP可更好地保持影像非云区的光谱特征。然而,由于IDCP的薄云校正效果主要依赖于暗目标这一先验假设。因此,对于影像中不存在暗目标的区域,如高亮裸土等,均出现了不同程度的过校正。其次,对于薄云强度变化剧烈的区域, IDCP容易出现校正不彻底的现象,如图5(c)和图5(g)所示。相较于以上两组结果,由于提出的方法充分挖掘了

薄云的空间和光谱特征, 并联合统计信息与大气散射模型, 可准确地估计并去除多波段的薄云辐射。因此, 在这4种不同的场景中均取得了最好的校正结果。此外, 通过与薄云影像比较可知, 非

云区的光谱信息在校正前后保持一致, 整体光谱过渡自然。总的来说, 本文提出的方法对于不同场景下薄云覆盖的高分五号 AHSI 影像均有较好的校正效果。

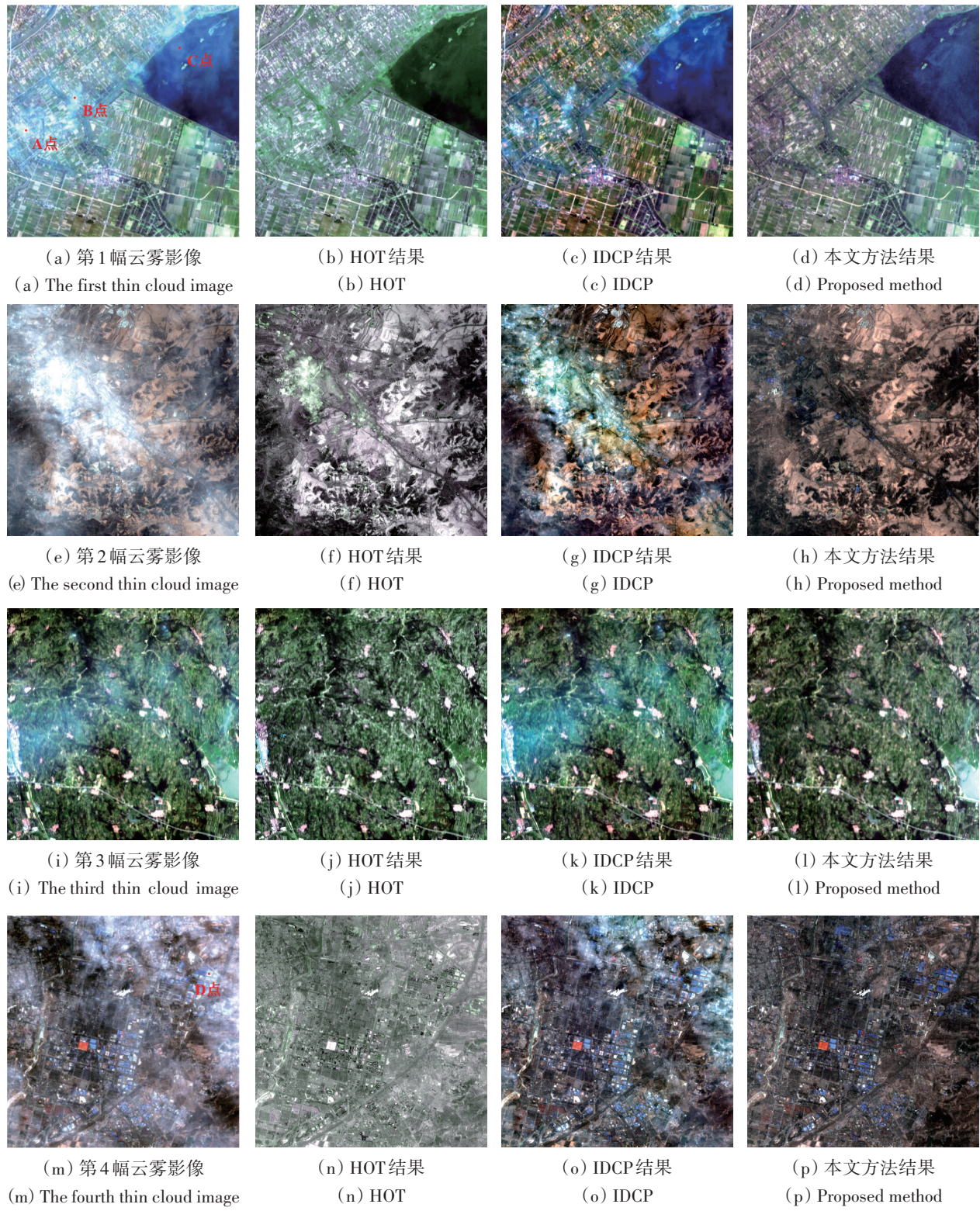


图5 四组真实高分五号 AHSI 薄云影像实验结果比较(红:第61波段;绿:第38波段;蓝:第23波段)

Fig. 5 Experimental comparison of four real GF-5 thin cloud images (red: band 61; green: band 38; blue: band 23)

为进一步检验提出方法对 AHSI 数据可见光波段的校正效果, 分别在裸土、耕地、水体和人工

建筑等不同地表选择 A—D 等 4 个样本点, 对校正前后的光谱曲线变化情况进行比较, 如图 6 所示。

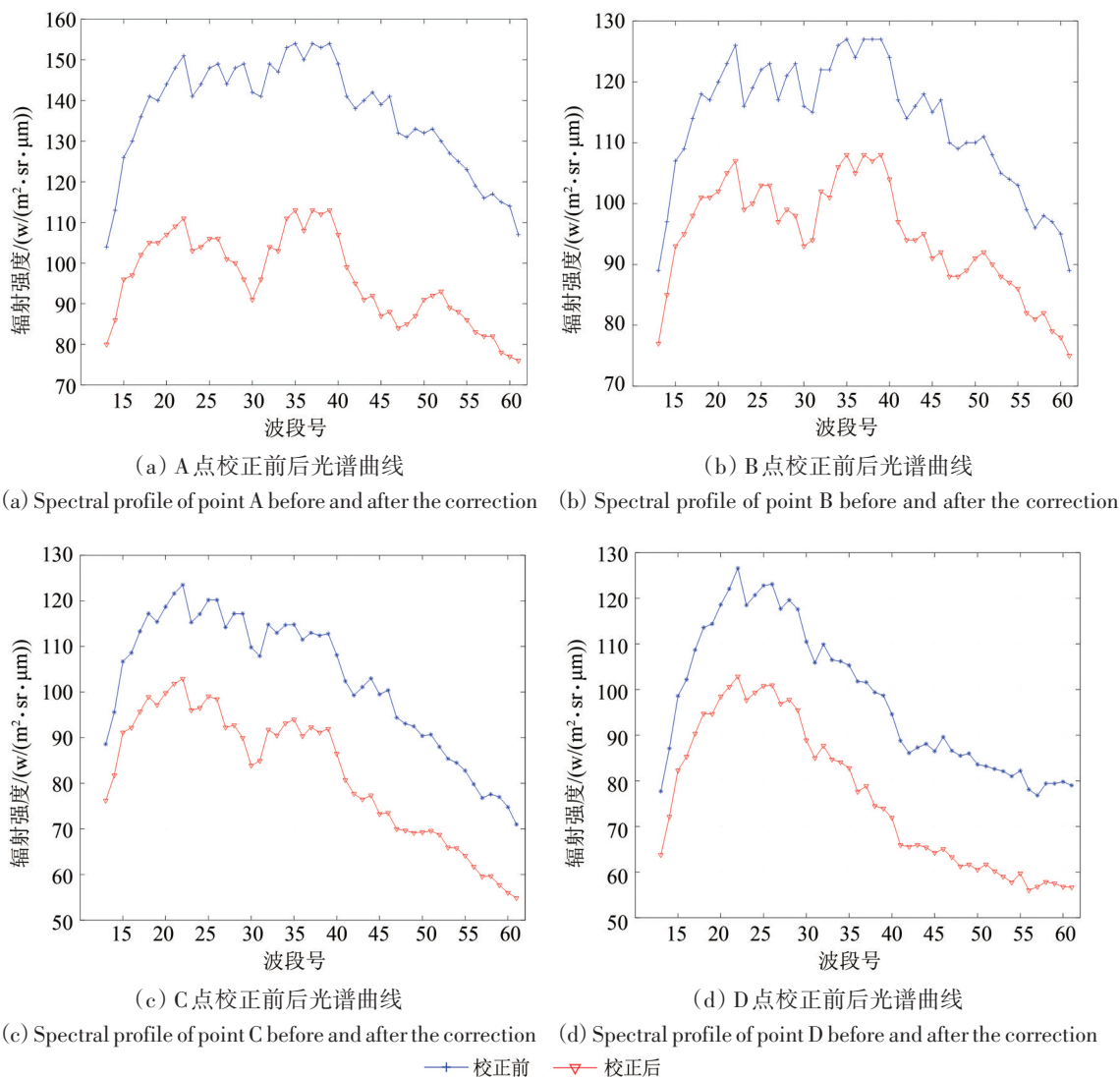


图 6 校正前后不同地表覆被类型光谱曲线对比

Fig. 6 Comparison of spectral profiles of different land covers before and after the correction

总的来说, 经过校正后 A—D 点在可见光范围的辐射强度均有显著的降低, 说明由薄云导致的高辐射影响被有效抑制。此外, 通过观察可以发现, 蓝色曲线整体较为平缓, 而经过校正后的红色曲线曲率变化更为明显。这主要是因为在校正前由于薄云辐射的干扰, 导致各波段间的真实地表信息不能准确地被表达。消除云雾辐射后, 各波段对真实地表信息的表达更为准确, 因此对应的光谱特征更加显著。若有多时相的无云参考数据, 可以对校正后的光谱信息做定量评估, 但是由于缺少相关数据, 本文未能做相应的评价, 未来工作中会进一步完善和补充。

为对真实实验结果进行定量评价, 选取无参考的 Q 指数来衡量校正前后影像的清晰程度。Q 指数是通过影像进行奇异值分解的局部梯度, 具体计算公式如下 (Zhu 和 Milanfar, 2010)

$$Q = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M s_1 \frac{s_1 - s_2}{s_1 + s_2} \quad (16)$$

式中, M 为影像分块数, s_1 表示影像块梯度主方向上的奇异值, s_2 则表示垂直于主方向的奇异值。一般来说, Q 值越大则影像越清晰。

此外, 还选取了 SSIM, UQI 两个指标检验校正前后影像结构信息的一致性 (Jiang 等, 2016), 其计算公式如下:

$$SSIM = \frac{(2\mu_{\rho}\mu_{\hat{\rho}} + c_1)(2\sigma_{\rho\hat{\rho}} + c_2)}{(\mu_{\rho}^2 + \mu_{\hat{\rho}}^2 + c_1)(\sigma_{\rho}^2 + \sigma_{\hat{\rho}}^2 + c_2)} \quad (17)$$

$$UQI = \frac{4\sigma_{\rho\hat{\rho}}\mu_{\rho}\mu_{\hat{\rho}}}{(\sigma_{\rho}^2 + \sigma_{\hat{\rho}}^2)(\mu_{\rho}^2 + \mu_{\hat{\rho}}^2)} \quad (18)$$

式中, μ_{ρ} , $\mu_{\hat{\rho}}$, σ_{ρ} 和 $\sigma_{\hat{\rho}}$ 分别为 ρ 和 $\hat{\rho}$ 的平均值和方差; $\sigma_{\rho\hat{\rho}}$ 代表 ρ 和 $\hat{\rho}$ 间的协方差; c_1 和 c_2 是避免分母为 0 而设置的常数项。

上述评价指标统计结果如表 2 所示。由 HOT 结果可知, Q 指数、SSIM 和 UQI 在 4 组结果中均为最低。这说明经过校正后, 影像的清晰度提升幅度较小, 校正结果与薄云影像间的结构相似性较低, 这与目视分析结论一致。IDCP 的定量评价结果略优于 HOT, 且在部分结果中表现最佳。这表明 IDCP 的校正结果更清晰, 与原始影像具有更高的结构相似性。如本文方法结果所示, Q 指数的值均高于其余两种方法, 且 SSIM 和 UQI 更接近 1。这意味着本文方法可有效抑制薄云干扰, 并在提升影像清晰度的同时保持与原始影像的结构相似性。

表 2 定量评价指标统计结果

Table 2 Quantitative assessment of different thin cloud removal results

		HOT	IDCP	本文方法
Q	第 1 组	42.4896	42.3953	52.0518
	第 2 组	11.0371	24.1645	24.6467
	第 3 组	35.2549	37.8909	39.1899
	第 4 组	16.4698	23.5020	23.7081
SSIM	第 1 组	0.8749	0.9221	0.9471
	第 2 组	0.7965	0.8141	0.8973
	第 3 组	0.8436	0.9569	0.9141
	第 4 组	0.7628	0.7825	0.8167
UQI	第 1 组	0.8475	0.9166	0.9577
	第 2 组	0.7962	0.8138	0.8964
	第 3 组	0.8432	0.9567	0.9139
	第 4 组	0.6297	0.7954	0.8566

注: 黑体表示最优值。

5 结 论

本文提出了一种联合统计信息与大气散射模型的薄云校正方法, 通过充分利用高光谱影像相邻波段间的高相关特性, 构建了相对薄云辐射图 *RCR*, 实现了对薄云空间与相对强度的准确估计;

针对不同波段的散射特性, 利用分级暗目标和散射模型约束的方法, 获得了可见光波段的绝对云辐射, 最终实现了高保真的薄云校正。在覆盖不同场景的高分五号 AHSI 影像实验中, 所提出的方法均展现出了显著优势。从目视效果来看, 本文方法不仅能够完全去除薄云干扰, 而且能够有效保持非云区和恢复云区的光谱信息。从定量结果来看, 模拟实验中 RMSE、MAE、SA 和真实实验中 Q 指数、SSIM 和 UQI 相较于薄云影像显著改善, 且优于对比方法。综上, 联合统计信息与大气散射模型的薄云校正方法能够有效去除高分五号 AHSI 可见光影像中的薄云干扰, 较为准确地复原真实地表信息, 具有较强的普适性和鲁棒性。

本文通过模拟与真实实验对方法的有效性进行了目视和定量评价, 但由于真实实验缺乏相应时刻的无云参考数据, 未能进行定量评价。未来考虑以多时相影像为数据源, 实现对真实实验的进一步补充和完善。

参考文献(References)

- Bucholtz A. 1995. Rayleigh-scattering calculations for the terrestrial atmosphere. *Applied Optics*, 34(15): 2765-2773 [DOI: 10.1364/AO.34.002765]
- Chavez Jr P S. 1988. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, 24(3): 459-479 [DOI: 10.1016/0034-4257(88)90019-3]
- Curcio J A. 1961. Evaluation of atmospheric aerosol particle size distribution from scattering measurements in the visible and infrared. *Journal of the Optical Society of America*, 51(5): 548-551 [DOI: 10.1364/JOSA.51.000548]
- Dai S B, Xu W, Piao Y J and Chen Y T. 2017. Remote sensing image defogging based on dark channel prior. *Acta Optica Sinica*, 37(3): 337-343 (代书博, 徐伟, 朴永杰, 陈彦彤. 2017. 基于暗原色先验的遥感图像去雾方法. *光学学报*, 37(3): 337-343) [DOI: 10.3788/AOS201737.0328002]
- Ebenezer J P, Das B and Mukhopadhyay S. 2019. Single image haze removal using conditional Wasserstein generative adversarial networks. *arXiv preprint arXiv:1903.00395*
- Fang L, Yu T, Gu X F, Wang S P, Gao J and Liu Q Y. 2013. Aerosol retrieval and atmospheric correction of HJ-1 CCD data over Beijing. *Journal of Remote Sensing*, 17(1): 151-164 (方莉, 余涛, 顾行发, 王舒鹏, 高军, 刘其悦. 2013. 北京地区 HJ-1 卫星 CCD 数据的气溶胶反演及在大气校正中的应用. *遥感学报*, 17(1): 151-164) [DOI: 10.11834/jrs.20131373]
- Gao B C, Yang P, Han W, Li R R and Wiscombe W J. 2002. An algorithm using visible and 1.38- μm channels to retrieve cirrus cloud

- reflectances from aircraft and satellite data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(8): 1659-1668 [DOI: 10.1109/TGRS.2002.802454]
- He K M, Sun J and Tang X O. 2010. Single image haze removal using dark channel prior. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 33(12): 2341-2353 [DOI: 10.1109/TPAMI.2010.168]
- Jiang H, Lv N and Yao L. 2016. HOT-transform based method to remove haze or thin cloud for Landsat 8 OLI satellite data. *Journal of Remote Sensing*, 20(4): 620-631 (姜侯, 吕宁, 姚凌. 2016. 改进 HOT 法的 Landsat 8 OLI 遥感影像雾霾及薄云去除. *遥感学报*, 20(4): 620-631) [DOI: 10.11834/jrs.20165276]
- Jiang H, Lv N and Yao L. 2016. A high-fidelity haze removal method based on hot for visible remote sensing images. *Remote Sensing*, 8(10): 844 [DOI: 10.3390/rs8100844]
- Jiang H and Lv N. 2018. Multi-scale residual convolutional neural network for haze removal of remote sensing images. *Remote Sensing*, 10(6): 945 [DOI: 10.3390/rs10060945]
- Li H F, Zhang L P, Shen H F and Li P X. 2012. A variational gradient-based fusion method for visible and SWIR imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 78(9): 947-958 [DOI: 10.14358/pers.78.9.947]
- Liu J, Wang X, Chen M, Liu S G, Zhou X R, Shao Z F and Liu P. 2014. Thin cloud removal from single satellite images. *Optics Express*, 22(1): 618-632 [DOI: 10.1364/OE.22.000618]
- Liu W Q. 2019. GaoFen-5 satellite payload development. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 14(1): 1 (刘文清. 2019. “高分五号卫星载荷研制”专辑. *大气与环境光学学报*, 14(1): 1)
- Liu Y N. 2018. Visible-shortwave infrared hyperspectral imager of GF-5 satellite. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 39(3): 25-28 (刘银年. 2018. “高分五号”卫星可见短波红外高光谱相机的研制. *航天返回与遥感*, 39(3): 25-28) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-8518.2018.03.003]
- Lv H T, Wang Y and Shen Y. 2016. An empirical and radiative transfer model based algorithm to remove thin clouds in visible bands. *Remote Sensing of Environment*, 179: 183-195 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.03.034]
- Makarau A, Richter R, Müller R and Reinartz P. 2014. Haze detection and removal in remotely sensed multispectral imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(9): 5895-5905 [DOI: 10.1109/tgrs.2013.2293662]
- Pan X X, Xie F Y, Jiang Z G and Yin J H. 2015. Haze removal for a single remote sensing image based on deformed haze imaging model. *IEEE Signal Processing Letters*, 22(10): 1806-1810 [DOI: 10.1109/LSP.2015.2432466]
- Rayleigh L. 1881. X. On the electromagnetic theory of light. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 12(73): 81-101 [DOI: 10.1080/14786448108627074]
- Richter R. 1996. Atmospheric correction of satellite data with haze removal including a haze/clear transition region. *Computers and Geosciences*, 22(6): 675-681 [DOI: 10.1016/0098-3004(96)00010-6]
- Shen H F, Li H F, Qian Y, Zhang L P and Yuan Q Q. 2014. An effective thin cloud removal procedure for visible remote sensing images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 96: 224-235 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.06.011]
- Tarel J P and Hautière N. 2009. Fast visibility restoration from a single color or gray level image//*Proceedings of the 12th International Conference on Computer Vision*. Kyoto, Japan: IEEE [DOI: 10.1109/ICCV.2009.5459251]
- Vermote E F, El Saleous N Z and Justice C O. 2002. Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: first results. *Remote Sensing of Environment*, 83(1/2): 97-111 [DOI: 10.1016/s0034-4257(02)00089-5]
- Wang Z T, Li X Y, Li S S and Chen L F. 2016. Quickly atmospheric correction for GF-1 WFV cameras. *Journal of Remote Sensing*, 20(3): 353-360 (王中挺, 李小英, 李莘莘, 陈良富. 2016. GF-1 星 WFV 相机的快速大气校正. *遥感学报*, 20(3): 353-360) [DOI: 10.11834/jrs.20165156]
- Wu S J, Li L, Gong B X and Gong M. 2012. Comparison of the methods for haze elimination of GeoEye-1 remote sensing image. *Remote Sensing for Land and Resources*, (3): 50-53 (吴寿江, 李亮, 宫本旭, 龚梅. 2012. GeoEye-1 遥感图像去雾霾方法比较. *国土资源遥感*, (3): 50-53) [DOI: 10.6046/gtzyyg.2012.03.10]
- Xu H, Zhang Y H, Hou W Z, Lv Y, Li L, Gu X F and Li Z Q. 2013. Monitoring haze in Beijing using HJ-1 satellite. *Journal of Remote Sensing*, 17(2): 476-477 (许华, 张玉环, 侯伟真, 吕阳, 李莉, 顾行发, 李正强. 2013. 利用环境一号卫星监测北京地区雾霾. *遥感学报*, 17(2): 476-477) [DOI: 10.11834/jrs.2013016]
- Yang S, Yong W, Lv H T and Qian J. 2015. Removal of thin clouds in Landsat-8 OLI data with independent component analysis. *Remote Sensing*, 7(9): 11481-11500 [DOI: 10.3390/rs70911481]
- Zhang Y, Guindon B and Cihlar J. 2002. An image transform to characterize and compensate for spatial variations in thin cloud contamination of Landsat images. *Remote Sensing of Environment*, 82(2/3): 173-187 [DOI: 10.1016/s0034-4257(02)00034-2]
- Zhu X and Milanfar P. 2010. Automatic parameter selection for denoising algorithms using a no-reference measure of image content. *IEEE Transactions on Image Processing*, 19(12): 3116-3132 [DOI: 10.1109/TIP.2010.2052820]

Thin cloud correction for GF-5 AHSI visible images by combining statistical information with scattering model

ZHANG Chi¹, LI Huifang¹, SHEN Huanfeng^{1,2}

1. School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan 430079, China

Abstract: Thin clouds widely exist in the visible bands of GaoFen-5 visible-shortwave infrared Advanced HyperSpectral Imager (AHSI), thereby degrading the data quality. In this study, a thin cloud correction method based on statistical information and scattering model was proposed to correct the clouds and restore the surface information with high fidelity.

The proposed method combines the statistical information between two adjacent visible bands and the atmospheric scattering model among visible bands. Two steps are included, that is estimating the Relative Cloud Radiance (*RCR*) and calculating the absolute radiance for different visible bands.

For a pair of adjacent visible bands, the ground radiance of clear pixels is highly and linearly correlated. However, the linear relationship deviates when the pixel is contaminated by clouds. The stronger the cloud contamination is, the larger the deviation will be. Therefore, the *RCR* can be accurately estimated using the two adjacent visible bands of the AHSI. Relying on the *RCR*, different strategies were utilized to calculate the absolute cloud radiance for different visible bands in accordance with their scatter properties. A hierarchical dark object strategy was used to calculate the cloud radiance for the bands in blue and green spectral regions. A scattering model was adopted for the bands in red spectral region. The cloud-free results can be obtained by subtracting the band-varied cloud radiance from cloudy images when the absolute cloud radiance of different visible bands were calculated.

Synthetic and real experiments were conducted to validate the effectiveness of the proposed method through qualitative and quantitative analyses. In the synthetic experiments, the cloud contamination in visible bands can be completely cleared, and the results are closest to the ground truth compared with the two other methods. The values of root-mean-square error, mean absolute error, and spectral angle values are only 1.9891, 1.6822, and 0.4901, respectively, which are smaller than those of the compared methods. In the real experiments, the thin clouds in various scenes can be completely corrected, whereas the spectral characteristics of the clear regions are relatively maintained. The scores of the Q-index, structural similarity index, and universal quality index showed that the proposed method achieve the best performance in most cases compared with the two other methods. All the comparisons indicated the proposed method has superior cloud correction ability for different scenes.

This study proposed a thin cloud correction method for the GF-5 AHSI visible data. The highly linear correlation between the two adjacent visible bands can be used to accurately estimate the *RCR*. Various strategies were utilized to calculate cloud radiance in accordance with the scattering properties of different bands, where a hierarchical dark object strategy was used for the bands in blue and green spectral regions, whereas a scattering model strategy was used for the bands in red spectral region. The thin clouds in the visible bands of AHSI data can be completely corrected by combining the statistical information and scattering model. For various scenes, the results achieve the best performance compared with the compared methods in terms of qualitative and quantitative aspects.

Key words: remote sensing, GF-5 AHSI data, visible images, statistical information, scattering model, thin cloud correction

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41871246, 41631180)