高分六号光学遥感卫星表观反射率反演方法及精度评价

孔莹，郭明珠，曹小杰，姜河清，李立英，周慧捷
中国四维测绘技术有限公司，北京 100091

DOI: 10.61369/ETR.2026280018

摘　　要： 针对高分六号（GF-6）多光谱影像在中高分辨率定量应用中存在的大气参数空间差异刻画不足、观测几何适配性不强以及缺少地面同步样本条件下精度验证路径不完整等问题，本文以官厅水库南岸—怀来县农田—建设用地过渡带为研究区，选取4景 GF-6 PMS 一级影像，构建了基于 MODIS 气溶胶光学厚度与整层可降水量驱动的 GF-6 表观反射率反演流程。结果表明：本文方法整体 RMSE、MAE、Bias 和 R^2 分别为0.0140、0.0109、0.0014和0.9854；相较通用 6S 参数方案和经验校正方案，整体 RMSE 分别降低46.42% 和58.51%。分波段结果显示，红光和近红外波段具有更高的一致性，蓝光波段受气溶胶散射影响误差相对较大；分地物结果显示，水体目标误差最高，稳定裸地和耕地样区结果更为稳健。研究结果可为 GF-6多光谱影像的业务化反射率生产和国产高分数据协同定量应用提供方法支撑。

关 键 词： 高分六号；表观反射率；6S 模型；MODIS 大气参数

Apparent Reflectance Inversion Method and Accuracy Evaluation of GF-6 Optical Remote Sensing

Kong Ying, Guo Mingzhu, Cao Xiaojie, Jiang Heqing, Li Liying, Zhou Huijie
China Siwei Surveying and Mapping Technology Co.Ltd., Beijing 100091

Abstract: In order to improve quantitative reflectance retrieval for Gaofen-6 (GF-6) optical imagery under the conditions of spatially heterogeneous atmosphere, variable viewing geometry and unavailable synchronous field samples, this study selected four GF-6 PMS scenes over the Guanting Reservoir – Huailai transition zone and developed a regionalized apparent reflectance inversion framework driven by MODIS aerosol optical depth and total precipitable water.The proposed method achieved an overall RMSE of 0.0140, MAE of 0.0109, Bias of 0.0014, and R^2 of 0.9854. The RMSE was reduced by 46.42% and 58.51% relative to the generic 6S parameterization and empirical correction, respectively. The blue band showed the largest atmospheric sensitivity, whereas the red and near-infrared bands presented higher consistency.The proposed strategy provides a feasible technical route for operational reflectance production and cross-sensor quantitative application of GF-6 data.

Keywords: GF-6; apparent reflectance; 6S model; MODIS atmospheric parameters

引言

光学遥感影像能够以较高时空分辨率记录地表反射辐射特征，是土地利用 / 覆盖分类、植被参数反演、水体环境监测和城市地表信息提取的重要数据基础。对于定量遥感应用而言，影像数字值或传感器辐亮度并不能直接表征目标地物的真实光谱特性，大气散射、吸收、观测几何差异以及传感器辐射响应衰减等因素均会导致影像之间存在系统性偏差，进而降低时序分析和多源协同反演的可靠性[1-3]。因此，构建稳定、可迁移、适配传感器特性的反射率反演方法，是国产高分辨率光学卫星从“可看”走向“可量化”的关键技术环节[4-7]。

GF-6配置2m 全色 /8m 多光谱高分辨率相机和16m 多光谱宽幅相机，具备较好的空间细节表达能力和业务化应用潜力 [8-10]。但 GF-6 PMS 反射率生产仍面临三方面问题：其一，AOD 与水汽时空变化显著，若直接采用单值大气参数，容易在水体、裸地和建筑等高对比地物上产生局部偏差；其二，不同日期太阳天顶角和观测天顶角变化会放大 BRDF 效应，使跨时相结果稳定性下降；其三，在缺少同步地面样本点的现实条件下，如何构建可重复、可操作的精度验证体系仍需进一步完善。

基于此，本文以 GF-6 PMS 一级影像为主数据源，以官厅水库南岸及其周边复合区为研究区，构建一种面向无地面同步样本场景的 GF-6表观反射率反演与精度评价方法。本文的主要工作包括：（1）建立基于 MODIS AOD、水汽和 DEM 气压修正的 GF-6区域化大气参数获取方案；（2）构建 GF-6波段适配的6S 反演流程，并采用伪不变目标开展多时相残差订正；（3）以 Sentinel-2 L2A 与 PIF 双重参照开展分波段、分地物精度评价。研究结果可为 GF-6定量反射率产品构建、国产高分数据交叉校准及区域多时相应用提供参考。

作者简介：孔莹（1993—），女，山东菏泽人，工学硕士学位，主要从事卫星应用相关工作。
通信作者：曹小杰（1990—），男，北京海淀人，工学硕士学位，主要从事光学遥感信息处理与研究相关工作。

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

一、研究区与数据

（一）研究区概况

研究区位于河北省怀来县东南部、官厅水库南岸过渡带，范围约为115.762° E—115.908° E、40.449° N—40.523° N。该区包含低反射水体、高纹理建设用地、中高反射裸地和具有显著近红外高反射特征的植被 / 耕地目标，能够较完整地反映 GF-6 PMS 在复杂地表背景下的反射率反演能力 .

（二）卫星数据来源与选取原则

本文采用 GF-6 PMS 影像。影像筛选遵循以下原则：①研究区主体不受薄云遮挡；②覆盖春、夏、秋和冬四个时段，用于分析不同地表季相条件下的反演稳定性。鉴于 GF-6 PMS 的多光谱空间分辨率为8m，本文将8m 多光谱波段作为定量反射率反演主体，2m 全色影像仅用于伪不变目标筛查和精细解译，不参与定量校正参数求解。

（三）辅助数据与样本组织

为获得稳定的大气驱动参数并构建无地面同步样本条件下的验证体系，本文联合使用 MODIS 大气产品、DEM、Sentinel-2 L2A 和0.25m 辅助影像。本文采用“先同质区筛选、后尺度聚合比对”的策略，即在0.25m 影像上提取均一地物斑块，再回到 GF-6与 Sentinel-2尺度进行空间聚合，从而降低混合像元对精度评价的干扰。

伪不变目标（PIF）样本用于开展多时相残差校正与稳定性评价。

二、实验设计

（一）实验设计与精度评价方法

1. 验证样本选取与匹配策略

本文构建“Sentinel-2同质区聚合 + PIF 稳定性检验”的双层验证框架。首先，在0.25m 辅助影像上提取面积不小于8×8个 GF-6像元的均质样区，确保样区内部地物单一、边缘清晰且不受阴影遮挡；随后将样区边界投影到 GF-6与 Sentinel-2 L2A 影像上，采用3×3 GF-6像元和对应尺度聚合后的 Sentinel-2像元计算平均反射率，形成交叉验证样本。其次，对84个 PIF 目标进行多时相统计，评估不同影像日期之间的残差波动。最终得到560组同质区样本和84个稳定目标样本，用于整体、分波段和分条件评价。

2. 精度评价指标与统计方法

本文采用 RMSE、MAE、Bias 和 R^2评价 GF-6反演结果与参考反射率的一致性。为判断本文方法与基准方法之间误差差异是否显著，采用配对 t 检验对绝对误差序列进行显著性检验。

三、实验结果与分析

（一）表观反射率反演整体效果

1. 不同地物类型反射率曲线特征

图1给出了研究区典型地物在 GF-6 PMS 四个波段上的平均表观反射率曲线。这些曲线特征说明本文反演结果不仅在数值层面具有较高一致性，而且在物理意义上能够较好区分不同地物的光谱类型。其中，红波段对植被与裸地分离最有效，近红外波段对植被活力和水陆边界识别最敏感，蓝波段则更易受到大气条件波动影响。因此，在 GF-6反射率业务化生产中，应特别关注蓝波段参数控制和近红外波段跨时相一致性维护。

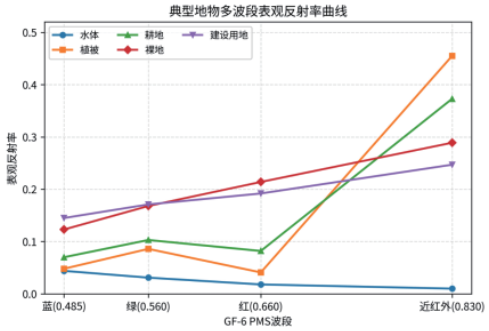


图1 典型地物多波段表观反射率曲线

（二）精度验证结果

1. 与参考反射率的对比结果

GF-6反演表观反射率整体 RMSE 为0.0140，MAE 为0.0109，Bias 为0.0014，R^2达到0.9854。从结果看，本文方法在无地面同步样本条件下仍获得了较高的一致性，表明基于 MODIS 大气参数驱动和 PIF 残差校正的联合策略能够有效支撑 GF-6 PMS 反射率反演。

图2进一步给出了 GF-6反演结果与参考反射率在四个波段上的散点关系。B1蓝波段散点离散程度相对较大，主要源于气溶胶散射和薄雾影响仍较显著；B2绿和 B3红波段的拟合线更接近1:1线，样本点在不同地物区间分布较均衡；B4近红外波段的相关性最高，植被和耕地样本表现出良好的线性一致性。从分波段结果看，红光与近红外波段已具备较好的定量分析可靠性，能够支撑植被监测和地表类型区分等应用。

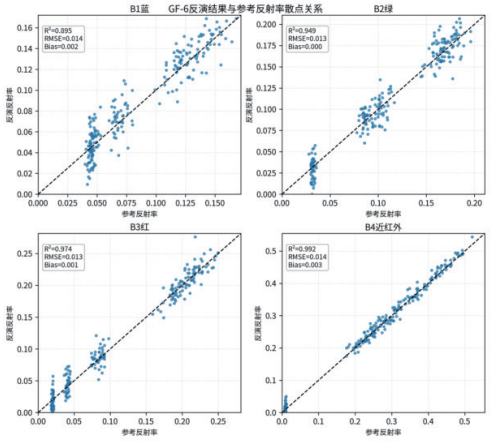


图2 GF-6反演结果与参考反射率散点关系

2. 分地物类型精度分析

不同地物类型的精度统计结果见表1。总体来看，稳定裸地、耕地和植被样区的误差水平较为接近，RMSE 分别为0.0138、0.0140和0.0131；建设用地 RMSE 为0.0141；水体样区 RMSE

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

最高，为0.0149。这一结果与高分辨率反射率反演的一般规律相一致。对于植被和耕地而言，近红外高反射峰增强了样本动态范围，使拟合关系更加稳定；而建设用地内部亮暗差异大、边界复杂，在局部区域仍会产生一定误差放大。

从应用角度看，本文方法在农田、植被和裸地上的精度已经能够满足区域地表反照率、地表类型识别和多时相定量分析的基础需求。

表1不同地物类型的GF-6反演精度

landcover	样本数	RMSE	MAE	Bias
水体	448	0.0149	0.0113	0.0001
植被	448	0.0131	0.0105	0.0024
耕地	448	0.014	0.011	0.0014
裸地	448	0.0138	0.0109	0.0014
建设用地	448	0.0141	0.011	0.0019

四、结语

本文围绕GF-6 PMS多光谱影像表观反射率反演与无地面同步样本条件下的精度评价问题，构建了基于MODIS大气参数驱动、DEM气压修正、GF-6波段适配6S反演和PIF残差订正的技术路线，并在官厅水库南岸复合地表区开展了多时相实验。主要结论如下：

（1）基于MODIS AOD、水汽与DEM高程修正构建的区域化参数驱动方案能够有效提升GF-6 PMS反射率反演稳定性。整体评价结果表明，本文方法的RMSE、MAE、Bias和R^2分别为0.0140、0.0109、0.0014和0.9854，说明在缺少地面同步样本条件下仍可获得较高的一致性。

（2）本文方法相较通用6S参数方案和经验校正方案具有显著优势。整体RMSE分别降低46.42%和58.51%，且误差差异通过配对t检验达到极显著水平。蓝波段仍是误差相对较高的敏感波段，红光和近红外波段表现出更好的稳定性。

参考文献

[1] 国家航天局 . 高分专项高分六号卫星成功发射 [EB/OL].2018-06-02.

[2] 刘耀开，马灵玲，王任飞，等 . 基于自动辐射定标场的高分六号宽幅载荷时序绝对辐射定标及趋势分析 [J]. 遥感学报 ,2023,27(3):599-609.

[3] 唐健雄，杨秀峰，顾行发，等 . 高分六号卫星遥感估算大气细颗粒物方法研究 [J]. 遥感信息 ,2023,38(1):18-25.

[4] 王密，郭贝贝，龙小祥，等 . 高分六号宽幅相机在轨几何定标及精度验证 [J]. 测绘学报 ,2020,49(2):10.

[5] 曾彩云 . 国产高分卫星影像质量评价及特征分析 [D]. 成都理工大学2026.

[6] 王中挺，李小英，李荤荤，陈良富 .GF-1星 WFV 相机快速大气校正 [J]. 遥感学报 ,2016,20(3):353-360.

[7] 尹俊玥，何瑞瑞，赵凤君，等 . 多源卫星遥感影像的林火监测 [J]. 光谱学与光谱分析 ,2023,43(3):917-926

[8] 李继清，徐泽辉，伍海，等 . 基于高分六号 WFV 影像的黄河宁蒙段河冰识别研究 [J]. 中国农村水利水电 ,2026(2):91-98.

[9]Wilson R T. Py6S: A Python Interface to the 6S Radiative Transfer Model[J]. Computers & Geosciences, 2013, 51: 166-171.

[10]Levy R C, Mattoo S, Munchak L A, et al. The Collection 6 MODIS Aerosol Products over Land and Ocean[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2013, 6(11): 2989-3034.

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.