

基于天宫一号高光谱成像仪的替代光谱 定标方法精度对比分析

张雅琼^{1,2}, 张文娟¹, 陈正超¹, 张兵^{1*}

(1. 中国科学院遥感与数字地球研究所 数字地球重点实验室, 北京 100094;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 基于天宫一号高光谱成像仪 2012 年 3 月 6 日获取的可见近红外谱段数据, 分别进行了氧气吸收通道的同步和非同步替代光谱定标, 为了提高非同步替代光谱定标结果的可靠性, 利用与同步实验日期相近的另外两景图像进行了多次非同步替代光谱定标. 结果表明: 基于三景图像的非同步替代光谱定标结果相近, 差异小于 0.2 nm, 标准差小于 0.11; 同步和非同步两种替代光谱定标结果差异小于 0.3 nm; 以星上定标结果为基准, 两种替代光谱定标方法的误差分别为 0.384 nm 和 0.489 nm, 二者差异较小. 可见, 可采用非同步替代光谱定标方法对高光谱成像仪进行高频次的光谱定标.

关键词: 高光谱成像仪; 替代定标; 光谱定标; 精度对比

中图分类号: TP722 **文献标识码:** A

A comparative analysis of the accuracy of alternative spectral calibration methods based on TG-1 hyperspectral imager

ZHANG Ya-Qiong^{1,2}, ZHANG Wen-Juan¹, CHEN Zheng-Chao¹, ZHANG Bing^{1*}

(1. Key Laboratory of Digital Earth Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the visible near-infrared (VNIR) data acquired by TG-1 hyperspectral imager on March 6, 2012, synchronous and non-synchronous alternative spectral calibration were assessed at the oxygen band. In order to improve the reliability of non-synchronous alternative spectral calibration result, other two images with similar imaging date were used to achieve multiple calibrations. The results show that non-synchronous alternative spectral calibration results based on three images are similar, difference is less than 0.2 nm, and standard deviation is less than 0.11. Difference between synchronous and non-synchronous alternative spectral calibration results is less than 0.3 nm. Compared with the TG-1 on-board spectral calibration results, the error of the two alternative spectral calibration methods is 0.384 nm and 0.489 nm, respectively. The accuracy difference is relatively small. Non-synchronous alternative spectral calibration method can be used to achieve high-frequency spectral calibration for hyperspectral imager.

Key words: hyperspectral imager, alternative calibration, spectral calibration, accuracy comparison

PACS: 42.30.Va

引言

高光谱成像仪进入太空或搭载于飞行平台后,

由于运行环境温度变化、光学或电子器件老化、机械振动和形变所带来的仪器光路结构细微改变等一系列原因, 仪器响应可能发生变化, 进而导致各光谱通

收稿日期: 2014-04-07; 修回日期: 2014-05-11

Received date: 2014-04-07, revised date: 2014-05-11

基金项目: 中科院对地观测中心主任基金-(Y2ZZ09101B); 国家自然科学基金(41325004), (41271370)

Foundation items: Supported by Director Foundation of center for earth observation and digital earth of CAS (Y2ZZ09101B), National Natural Science Foundation of China (41325004, 41271370)

作者简介 (Biography): 张雅琼 (1986-), 女, 山西古交人, 博士研究生, 主要研究领域为高光谱传感器在轨定标. E-mail: zhangyq@radi.ac.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: zb@radi.ac.cn

道的中心波长发生漂移^[1-3]. 因此,需要通过光谱定标来重新标定每个光谱通道的中心波长等光谱特征,光谱定标精度直接影响辐射定标的精度^[2],是保证高光谱数据高精度量化应用的前提.

目前国内外高光谱成像仪在轨替代光谱定标主要是基于太阳 Fraunhofer 吸收线、典型大气吸收带(如氧气、二氧化碳等的吸收带)以及高光谱图像反演的反射率在这些典型吸收带的平滑性等诊断性特征进行. 替代光谱定标方法中,根据参考光谱所采用的数据源不同,可分成同步替代光谱定标和非同步替代光谱定标.

同步替代光谱定标方法是基于同步场地实验中获取的地表反射率和大气参数,利用大气辐射传输模型计算得到大气层顶(TOA)辐亮度,将其作为参考光谱与图像辐亮度进行匹配对比来实现光谱定标. Green^[4]等基于同步测量的地表反射率和大气参数,通过 TOA 辐亮度与图像辐亮度在典型大气吸收带的光谱诊断特征对比,对 Hyperion 进行了光谱定标;Felde^[5]等通过归一化光学厚度导数变换后的 TOA 辐亮度与图像辐亮度在典型大气吸收带的匹配对比,对 Hyperion 进行了光谱定标.

非同步替代光谱定标方法则无需同步实验数据支持,仅利用高光谱图像头文件参数以及基于高光谱图像自身反演的参数,来进行光谱定标中所用参考光谱的模拟. Gao^[6-7]等利用光谱匹配的方法,对比图像表观反射率与模拟大气透过率在典型大气吸收带的差异,对 AVIRIS、PHILLS、Hyperion 进行了光谱定标. Guanter^[1]等将大气校正模型首次计算得到的图像反射率进行低通滤波处理,将其作为参考光谱,利用图像反射率在大气吸收带附近的平滑性特征对 ROSIS、CHRIS 等进行了光谱定标. 王天星^[8]等基于不包含大气程辐射的图像表观反射率近似值与模拟大气透过率在典型大气吸收带的光谱匹配,实现了对 Hyperion 的光谱定标.

在同步替代光谱定标中,由于同步场地实验区通常只能涵盖图像中部分探元,因此难以实现全视场逐探元的光谱定标. 而非同步替代光谱定标不需要同步数据支持,因此可以实现对高光谱成像仪高频率、全视场逐探元的光谱定标,但由于参考光谱模拟过程中缺乏同步数据支持,其定标结果可能与同步替代光谱定标存在一定差异. 针对目前缺乏两种方法精度对比分析的现状,针对天宫一号高光谱成像仪 2012 年 3 月 6 日的可见近红外谱段数据,开展了同步场地定标实验,并基于氧气吸收这一可见光

近红外谱段的典型大气吸收带,对该数据进行了同步替代光谱定标和非同步替代光谱定标,为提高非同步替代光谱定标结果的可靠性,增加了与同步实验日期相近的两景图像进行了多次非同步光谱定标. 最后开展了替代光谱定标结果分析,并以同时期的天宫一号星上光谱定标结果为依据,进一步进行了两种方法的精度分析与对比验证,实验流程见图 1.

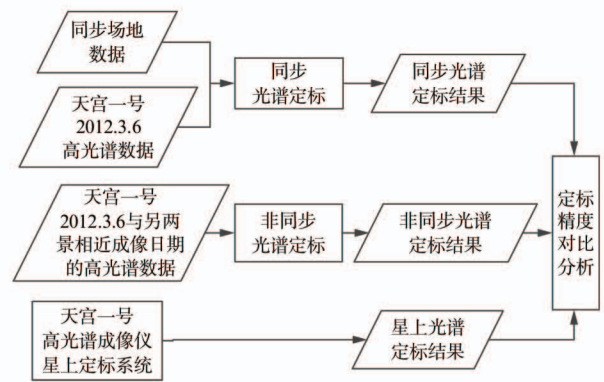


图 1 本文总体实验流程图

Fig. 1 Flow chart of the experiment in this paper

图 1 中,星上定标结果由中国科学院空间科学与应用总体部有效载荷应用中心提供. 天宫一号高光谱成像仪自发射后基于星上定标系统定期进行光谱定标,更新全视场、全通道的中心波长,本文采用与同步实验日期最为接近的星上光谱定标结果(2012 年 2 月 23 日).

1 传感器特性与数据准备

1.1 天宫一号高光谱成像仪特性

天宫一号高光谱成像仪由中科院长春光学精密机械与物理研究所和上海技术物理研究所共同研制,在空间分辨率、波段范围、波段数目等方面达到了国际同类遥感器先进水平. 其中,高光谱成像仪可见近红外(VNIR)谱段数据空间分辨率为 10 m,光谱范围为 400 ~ 1 000 nm,光谱分辨率约 10 nm,有效波段数为 64 个.

1.2 同步场地定标实验

1.2.1 定标场地选择

同步场地定标实验要求所选定标场地地势平坦、开阔无遮挡,地物单一且分布均匀,同时定标场面积应大于 $5 * 5$ 个像元^[9]. 天宫一号于 2012 年 3 月 6 日过境北京,根据其过境情况以及预先提供的成像轨迹,提前开展了定标场地调研,选择了北京市

房山区青龙湖水库附近的一块耕地(图 2a)和枯草地(图 2b)作为定标场地,两块场地均匀开阔,满足同步场地定标实验要求,对应经纬度分别为 39.79N,116.10E、39.81N,116.07E,场地中心点分别位于图像的第 758 列和第 509 列。



图 2 定标场地—耕地(a)和枯草(b)
Fig. 2 Calibration Site-Soil (a) and Hay land(b)

1.2.2 地面光谱测量

天宫一号过境时间是 2012 年 3 月 6 日 14:30,在卫星过境前后 15 分钟内完成了对定标场地的光谱测量.光谱测量仪器为美国 ASD 公司可见—短波红外地物光谱仪 ASD FieldSpec Pro,参考板采用中国科学院安徽光机所生产标定的白色参考板.在每个定标场地中央选择面积约 50 m × 50 m 的均匀样区,通过多次测量获得定标场地的平均光谱反射率(图 3).测量同时利用 GPS 设备对试验场地精确定位,获取相应经纬度信息。

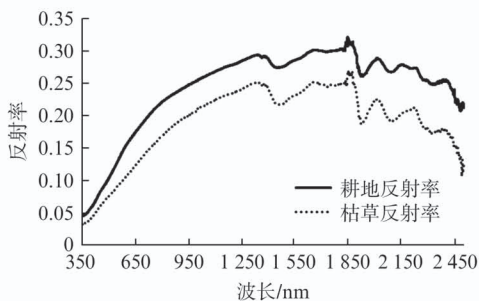


图 3 定标场反射率
Fig. 3 Field reflectance

1.2.3 大气参数测量与获取

在地面光谱测量的同时,对大气参数进行了观测.大气参数测量采用美国 Solar Light 公司生产的手持式五通道太阳光度计(Microtops II),测量了 440、500、675、870、1 020 nm 五个通道气溶胶散射的光学厚度,利用其与水平气象视距之间的关系模型^[10],得到了水平气象视距.同时,利用 Microtops II 测量了垂直水汽柱含量和海拔高度.另外,CO₂ 体积混合比采用 IPCC2011 发布的数据,臭氧含量来自

美国 Aura 卫星 OMI 臭氧探测器数据。

1.3 定标图像数据选取

除同步场地实验当天获取的天宫一号高光谱图像数据,为了保障非同步光谱定标精度,另外选取了两景同步实验前后的图像数据进行多次非同步光谱定标.所选天宫一号高光谱数据的具体成像情况见表 1,其中第三景数据为同步实验对应的图像数据。

表 1 实验图像参数

Table 1 Parameters of hyperspectral images

成像日期	中心经度	中心纬度	高程(米)	主要地物类型
1 2012.2.26	9.92	19.16	557	撒哈拉沙漠
2 2012.3.1	25.33	81.8	90	印度,大部分为农田,少数城镇
3 2012.3.6	38.65	114.28	72	北京郊区,大部分农田和林地,少数城镇

2 同步替代光谱定标

2.1 定标方法

针对氧气吸收通道,基于大气辐射传输模型计算得到同步大气层顶(TOA)辐亮度,将其与图像辐亮度进行光谱匹配对比,来实现同步光谱定标.实验流程如图 4,具体定标过程如下:

(1) 不同光谱漂移量对应的的光谱响应函数构建

天宫一号高光谱数据对应的氧气吸收带包含 6 个通道,对于每一个通道 i ,基于天宫一号高光谱成像仪原始中心波长 $\lambda_c(i)$ 和半波宽 $fwhm(i)$,进行不同光谱漂移量对应的的光谱响应函数(SRF)构建.首先将 $\lambda_c(i)$ 以 0.01 nm 的步长进行漂移,漂移量为 $\Delta\lambda$,漂移范围为 -5 nm 到 +5 nm, $fwhm(i)$ 不变,进而通过高斯函数模拟得到不同 $\Delta\lambda$ 对应的该通道光谱响应函数 $SRF(i, \Delta\lambda)$ (公式 1)。

$$SRF(i, \Delta\lambda) = \exp\left[-\left(\frac{\lambda - (\lambda_c(i) + \Delta\lambda)}{fwhm(i)/2 \sqrt{\ln(2)}}\right)^2\right] \quad (1)$$

(2) 等效 TOA 辐亮度计算

对于每一个通道 i ,将大气辐射传输模型计算得到的高分辨率同步 TOA 辐亮度 L_{ref} 分别与不同 $\Delta\lambda$ 对应的 SRF 进行卷积(公式 2),得到不同 $\Delta\lambda$ 对应的等效 TOA 辐亮度 L_{ref_con} 。

$$L_{ref_con}(i, \Delta\lambda) = \frac{\int L_{ref} \cdot SRF(i, \Delta\lambda) d\lambda}{\int SRF(i, \Delta\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

(3) 包络线去除

包络线去除是一种增强感兴趣吸收特征的光谱分析方法^[11],它可以有效突出光谱曲线中的吸收特征,并将光谱数据归一化到 0 ~ 1.0 (无量纲),有利

于进行特征数值的比较. 为突出光谱曲线中的氧气吸收特征, 分别对图像辐亮度 L_{img} 和不同 $\Delta\lambda$ 对应的 L_{ref_con} 进行包络线去除.

(4) 光谱匹配及中心波长漂移量计算

选用两类典型的光谱匹配测度: 基于光谱形状的光谱夹角测度和基于光谱距离的欧式距离测度. 把光谱看作多维矢量, 两种测度分别是通过计算测量光谱与参考光谱之间的角度(公式3)^[12]和欧式距离(公式4)^[13]来确定光谱之间的相似性. 分别计算 L_{img} 和不同 $\Delta\lambda$ 对应的 L_{ref_con} 之间的光谱匹配测度值 $f(sam)$ 和 $f(dis)$, 求得最小测度值对应的 $\Delta\lambda$, 记为 $\Delta\lambda_{min}$, $\Delta\lambda_{min}$ 即为氧气吸收通道的中心波长漂移量, 从而实现光谱定标.

$$f(sam) = \arccos \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2}}, \theta \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right], \quad (3)$$

$$f(dis) = \sum_{i=1}^n [x_i - y_i]^2, \quad (4)$$

其中, x_i 和 y_i 分别为经包络线去除后的第 i 通道的图像光谱与参考光谱.

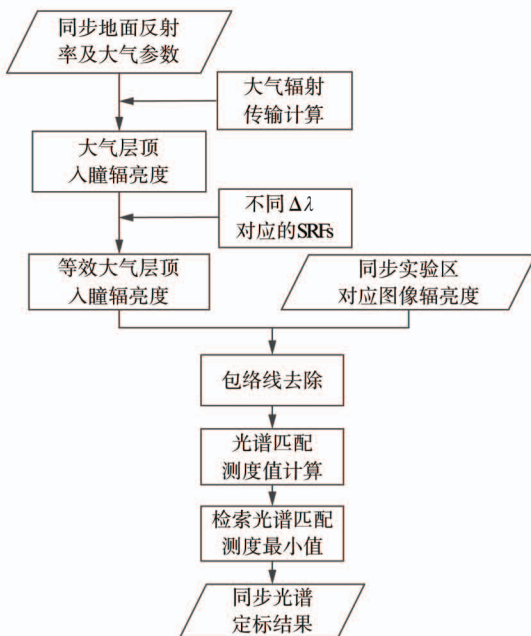


图4 同步光谱定标流程图

Fig. 4 Flow chart of synchronous spectral calibration

2.2 待定标图像辐亮度提取

根据天宫一号高光谱成像仪在轨同步场地实验中测量的 GPS 信息, 提取耕地和枯草同步实验区在

图像中的对应像元. 针对耕地和枯草所在列, 分别选取 5 个像元, 计算对应像元的辐亮度均值, 作为待定标图像辐亮度数据.

2.3 参考高分辨率 TOA 辐亮度计算

选用大气辐射传输模型 MODTRAN 进行 TOA 辐亮度计算. MODTRAN 模型充分考虑了二氧化碳、水汽、臭氧等微量和痕量气体与气溶胶的吸收和散射作用, 模式本身提供了多种标准大气、气溶胶、痕量气体参数以供选择, 计算结果的分辨率可达到 1 cm^{-1} ^[14].

本文基于天宫一号同步场地试验中获取的地表反射率与大气参数(表 2), 运用 MODTRAN4.0 计算得到两个同步实验区的 TOA 辐亮度(图 5).

表 2 TOA 辐亮度模拟中输入 MODTRAN4 的大气参数
Table 2 MODTRAN4 atmospheric parameters in the simulation of TOA radiance

参数类型	数值
大气模式	中纬度冬季
气溶胶类型	乡村型
垂直水汽柱含量(g/cm^2)	0.1
臭氧含量(atm-cm)	0.365
CO_2 体积混合比(ppmv)	390
水平气象视距(km)	33.03
目标高度(km)	0.072

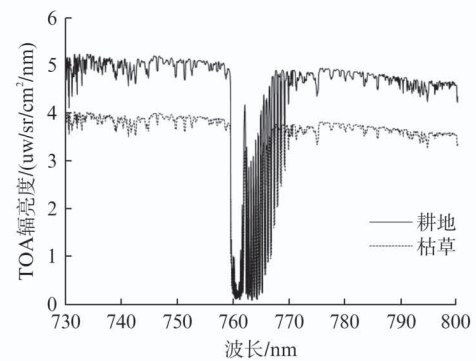


图5 Modtran4 计算的同步实验区对应的 TOA 辐亮度

Fig. 5 TOA radiance calculated by MODTRAN4

3 非同步替代光谱定标

3.1 定标方法

非同步替代光谱定标采用 Gao 等提出的基于图像表观反射率与总大气透过率的光谱匹配方法^[7], 同样运用光谱夹角和欧式距离作为光谱匹配测度, 对氧气吸收通道进行非同步光谱定标, 实验流程如图 6.

首先基于模拟得到的氧气吸收通道在不同 $\Delta\lambda$

下的SRF,将高分辨率太阳辐照度 E_0 、基于图像头文件参数模拟得到的高分辨率总大气透过率 T_g 分别进行波段等效,得到不同 $\Delta\lambda$ 对应的等效 E_0 和等效 T_g ,进而结合等效 E_0 和图像辐亮度 L_{img} ,得到不同 $\Delta\lambda$ 对应的图像表观反射率 ρ_{app} (公式 5). 其中, μ_0 为对应的太阳天顶角的余弦值.

$$\rho_{app} = \frac{\pi L}{\mu_0 E_0} \quad (5)$$

ρ_{app} 与等效 T_g 在氧气吸收带幅值差异较大,同时为了突出氧气吸收特征,先分别对 ρ_{app} 和等效 T_g 进行包络线去除,进而对不同 $\Delta\lambda$ 对应的 ρ_{app} 和等效 T_g 分别进行光谱匹配,求得最小光谱匹配测度值对应的 $\Delta\lambda$,记为 $\Delta\lambda_{min}$,即为光谱定标结果,该过程与 2.1 类似.

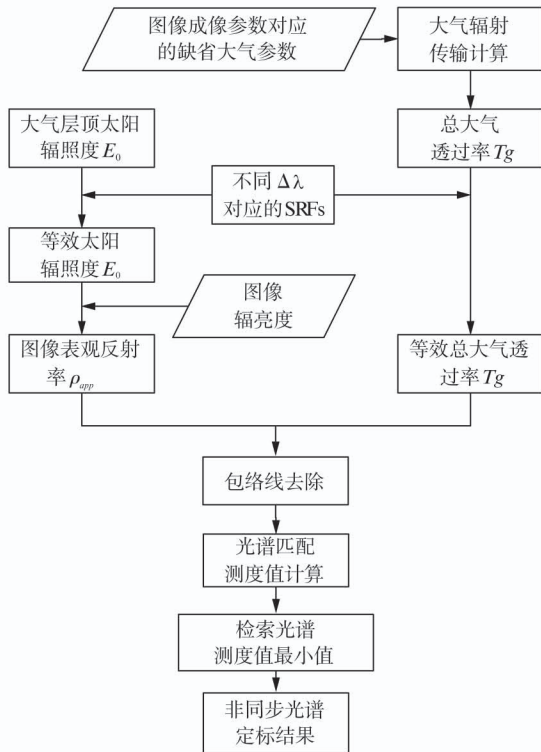


图 6 非同步光谱定标流程
Fig. 6 Flow chart of non-synchronous spectral calibration algorithm

3.2 待定标图像表观反射率生成

针对同步场地实验区对应的探元,将整景图像中该探元列方向上的所有像元辐亮度求均值,作为待定标图像辐亮度,目的是使得图像中不同地物光谱充分混杂,以提高待定标图像辐亮度的信噪比,同时,也可减少地物组分本身的光谱特征对大气吸收特征的影响,因为非同步替代光谱定标中的参考光谱 T_g 并不包含地物信息.

基于待定标图像辐亮度,依据 3.1 中方法生成

图像表观反射率 ρ_{app} , 计算过程中的 E_0 为经过日地距离 D 校正后的太阳辐照度(公式 6), d_n 为成像顺序天数,高分辨率大气层顶太阳常数数据 $\overline{E_0}$ 来自 Chance + Kurucz (MChKur) 数据库.

$$E_0 = \frac{\overline{E_0}}{D^2} = \overline{E_0} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{2\pi d_n}{365} \right) \right] \quad (6)$$

3.3 参考高分辨率总大气透过率模拟

采用 Modtran4 辐射传输模型模拟总大气透过率(图 7),模拟过程中采用的大气模式、成像日期、观测几何及高程等参数,均基于待检验图像头文件参数进行选择,水汽与能见度等大气参数设为当前大气模式下的缺省值. 通常氧气透过率由高程、纬度和季节控制,因此基于此模拟过程得到的透过率可满足光谱定标需求. 相应的输入参数如表 3 所示.

表 3 透过率模拟中 MODTRAN4 输入参数
Table 3 MODTRAN4 input parameters in the simulation of transmittance spectrum

参数类型	数值
大气模式	中纬度冬季
气溶胶类型	乡村型(2012.3.1,2012.3.6),沙漠型(2012.2.26)
垂直水汽柱含量(g/cm ²)	当前大气模式下缺省值
臭氧含量(atm-cm)	当前大气模式下缺省值
CO ₂ 体积混合比(ppmv)	当前大气模式下缺省值
水平气象视距(km)	当前大气模式下缺省值

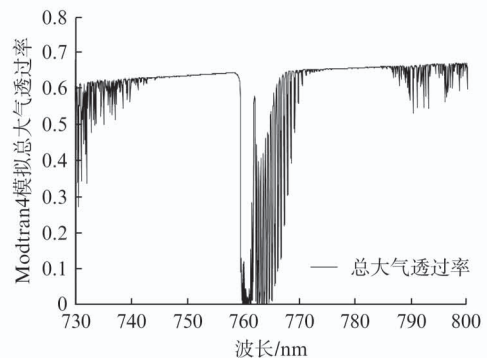


图 7 Modtran4 模拟得到的总大气透过率(2012.3.6)
Fig. 7 Total atmospheric transmittance simulated by MODTRAN4(2012.3.6)

4 替代光谱定标结果与精度分析

4.1 替代光谱定标结果

基于上述两种替代光谱定标方法,对天宫一号 2012 年 3 月 6 日获取的高光谱数据的氧气吸收带对应通道进行了光谱定标,定标前后的图像光谱和参考光谱见图 8 ~ 11. 其中,天宫一号高光谱成像仪 758 探元和 509 探元对应的氧气吸收通道原始中心波长见

图 8(左)和图 10(左)的横坐标对应波长,从图中可 以看到所选实验通道涵盖了整个氧气吸收带.

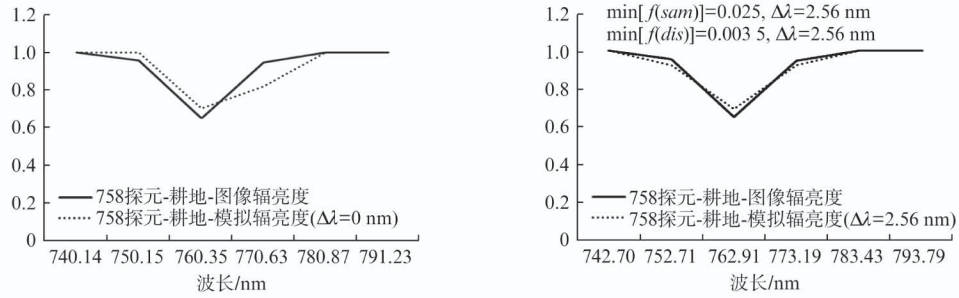


图 8 758 探元在氧气通道的图像辐亮度和基于原始中心波长的模拟辐亮度(左)以及同步光谱定标后的模拟辐亮度(右)
Fig. 8 Image spectrum of sample 758 and a simulated spectrum in the oxygen bands based on the original center wavelength (left) and after synchronous spectral calibration (right)

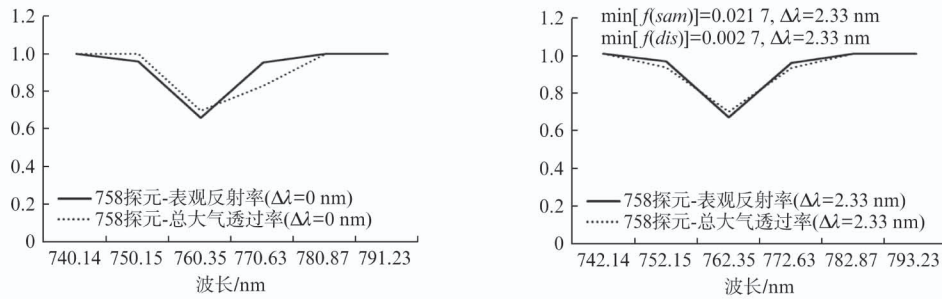


图 9 758 探元在氧气通道基于原始中心波长(左)以及非同步光谱定标后(右)的表现反射率和总大气透过率
Fig. 9 Apparent reflectance and transmittance of sample 758 in the oxygen bands based on the original center wavelength (left) and after non-synchronous spectral calibration (right)

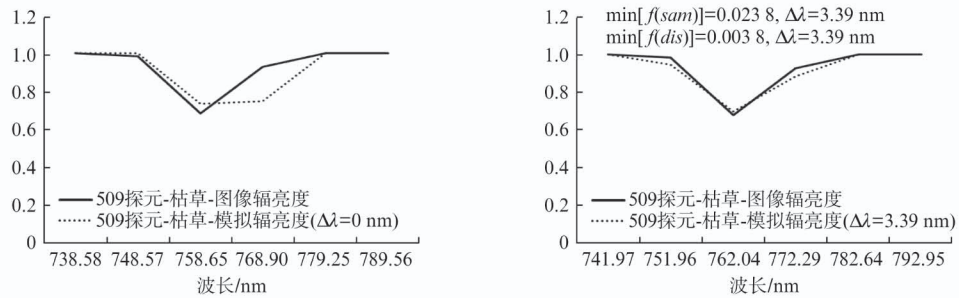


图 10 509 探元在氧气通道的图像辐亮度和基于原始中心波长的模拟辐亮度(左)以及同步光谱定标后的模拟辐亮度(右)
Fig. 10 Image spectrum of sample 509 and a simulated spectrum in the oxygen bands based on the original center wavelength (left) and after synchronous spectral calibration (right)

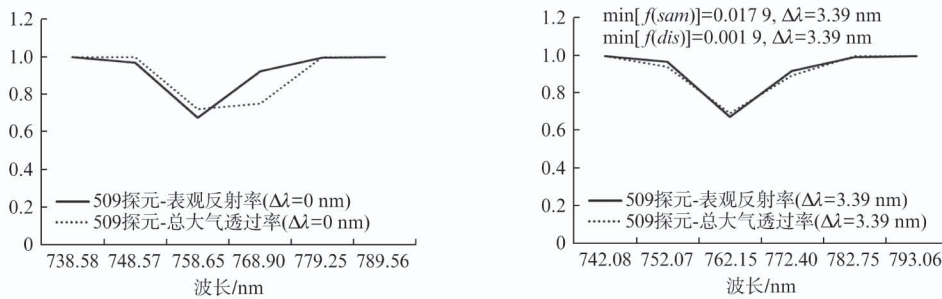


图 11 509 探元在氧气通道基于原始中心波长(左)以及非同步光谱定标后(右)的表现反射率和总大气透过率
Fig. 11 Apparent reflectance and transmittance of sample 509 in the oxygen bands based on the original center wavelength (left) and after non-synchronous spectral calibration (right)

图 8 ~ 11 显示的光谱曲线均为经过了包络线去除后的曲线, $\min[f(sam)]$ 和 $\min[f(sam)]$ 分别表示光谱定标结果 $\Delta\lambda_{\min}$ 对应的光谱夹角 $f(sam)$ 和欧氏距离 $f(dis)$ 值. 基于同步替代光谱定标算法和非同步替代光谱定标算法, 采用光谱夹角和欧氏距离两种测度对应的定标结果一致. 758 探元在氧气通道的同步和非同步光谱定标结果分别为 2.56 nm 和 2.33 nm, 509 探元分别为 3.39 nm 和 3.39 nm, 两种替代光谱定标结果基本一致, 差异在 0.3 nm 以内. 同时, 定标结果表明, 对于不同探元, 中心波长漂移量存在一定差异, 这种光谱定标中的非线性效应通常是由于推帚式面阵 CCD 的 smile 效应造成的^[1].

由于单景图像地物类型的特殊性可能给非同步光谱定标结果带来不确定性, 因此另外选择了成像日期与 2012 年 3 月 6 日相近的两景天宫一号高光谱数据, 进行了多次非同步替代光谱定标, 相应结果见表 4.

表 4 非同步定标结果对比

	2012.2.26	2012.3.1	2012.3.6	平均值	标准差
758 探元	2.33 nm	2.14 nm	2.33 nm	2.27 nm	0.11
509 探元	3.27 nm	3.27 nm	3.39 nm	3.31 nm	0.07

由图 4 可见, 基于三景图像的非同步光谱定标结果相近, 差异小于 0.2 nm, 相同探元非同步定标结果的标准差小于 0.11, 保持了较好的一致性. 最后采用三景图像定标结果的均值作为最终的非同步光谱定标结果: 在 758 探元和 509 探元分别为 2.27 nm 和 3.31 nm.

4.2 替代光谱定标结果精度分析

基于 2012 年 2 月 23 日的天宫一号星上光谱定标结果, 提取得到氧气吸收通道在 758 和 509 探元对应的光谱漂移量, 以该星上定标结果为基准, 对文中两种替代光谱定标结果进行精度对比分析, 对比结果见表 5.

表 5 定标结果对比

	星上定标结果	同步		非同步	
		替代光谱定标	绝对误差	替代光谱定标	绝对误差
758 探元	2.741 nm	2.56 nm	0.181 nm	2.27 nm	0.471 nm
509 探元	2.803 nm	3.39 nm	0.587 nm	3.31 nm	0.507 nm
平均误差		0.384 nm		0.489 nm	

由图 5 可见, 在氧气通道, 同步替代光谱定标结

果在 758 探元的绝对误差为 0.181 nm, 在 509 探元的绝对误差为 0.587 nm, 平均误差为 0.384 nm; 非同步替代光谱定标结果在 758 探元的绝对误差为 0.471 nm, 在 509 探元的绝对误差为 0.507 nm, 平均误差为 0.489 nm. 非同步替代光谱定标结果的平均精度比同步替代光谱定标低 0.105 nm, 二者的平均误差都在 0.5 nm 以内, 与星上定标结果保持了很好的一致性.

5 结论

根据以上围绕天宫一号高光谱数据的替代光谱定标实验与结果对比验证研究, 得出结论如下:

(1) 基于成像时间相近的三景天宫一号高光谱数据进行非同步替代光谱定标, 得到的定标结果相近, 差异小于 0.2 nm, 标准差小于 0.11, 说明基于该方法的定标结果具有较好的一致性;

(2) 对于本文中采用的天宫一号高光谱数据, 两种替代光谱定标结果基本一致, 差异不超过 0.3 nm. 以同时期的星上定标结果为基准, 两种替代光谱定标结果的绝对误差在 0.5 nm 以内, 满足基本定标需求, 考虑到天宫一号星上定标系统在长时间运行过程中可能发生衰减, 这两种方法具有较高的应用价值;

(3) 非同步替代光谱定标结果的平均精度比同步替代光谱定标低 0.105 nm, 平均误差在 0.5 nm 以内, 可见, 可采用非同步替代光谱定标方法实现高光谱成像仪的高频次替代光谱定标, 降低在轨同步光谱定标实验的开展频率及成本支出.

由于缺乏多次同步场地实验支持, 本文是基于一次同步场地实验的两个实验区, 进行了两种替代光谱定标方法的精度对比分析, 后续需要通过开展更多同步场地实验, 加大对对比样本, 进一步进行替代光谱定标方法的对比分析研究.

致谢

本论文由载人航天工程天宫一号民用试应用项目支持, 感谢中国科学院空间科学与应用总体部有效载荷应用中心、长春光学精密机械与物理研究所、上海技术物理研究所提供的帮助与支持, 感谢中科院遥感与数字地球研究所张浩老师提供的帮助及宝贵建议.

References

[1] Guanter L, Richter R, Moreno J. Spectral calibration of hy-

- perspectral imagery using atmospheric absorption features [J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(10): 2360–2370.
- [2] ZHENG Yu-Quan. Precise spectral calibration for hyperspectral imager[J]. *Optics and Precision Engineering*(郑玉权. 超光谱成像仪的精细光谱定标. *光学精密工程*), 2010, **18**(11): 2347–2354.
- [3] WANG Ming-Zhi, YAN Lei, YANG Bin, *et al.* Central wavelength shift analysis between Laboratory and Field spectral calibration of grating based imaging spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*(王明志, 晏磊, 杨彬, 等. 光栅色散型成像光谱仪室内外光谱定标中心波长偏移研究. *光谱学与光谱分析*), 2012, **33**(8): 2280–2285.
- [4] Green R O, Pavri B E, Chrien T. On-Orbit Radiometric and Spectral Calibration Characteristics of EO-1 Hyperion Derived with an Underflight of AVIRIS and In Situ Measurements at Salar de Arizaro, Argentina [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, **41**(6): 1194–1203.
- [5] Felde G W, Anderson GP, Cooley TW, *et al.* Analysis of Hyperion data with FLASSH atmosphere correction algorithm. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium* [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2003, **41**(1): 90–92.
- [6] Gao B C, Montes M J, Davis C O. A curve fitting technique to improve wavelength calibrations of imaging spectrometer data [J]. *Proc. 11th Annu. JPL Airborne Earth Sci. Workshop*, 2002: 99–105.
- [7] Gao B C, Montes M J, Davis C O. Refinement of wavelength calibration of hyperspectral imaging data using a spectrum-matching technique [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **90**(4): 424–433.
- [8] Wang T X, Yan G J, Ren H Z, *et al.* Improved methods for spectral calibration on-orbit imaging spectrometers [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing* 2010, **48**(11): 3924–3931.
- [9] Li Z W, Liu L Y, Zhang H, *et al.* Radiometric calibration and validation of TG-1 hyper-spectral imager [J]. *Remote Sensing Technology and Application* (李振旺, 刘良云, 张浩, 等. 天宫一号高光谱成像仪在轨辐射定标与验证. *遥感技术与应用*), 2013, **28**(5): 850–857.
- [10] HE Li Ming, WANG Hua, YAN Guang-Jian, *et al.* Analysis and application for the empirical relative between aerosol optical depth and horizontal meteorological range [J]. *Journal of Remote Sensing*(何立明, 王华, 阎广建, 等. 气溶胶光学厚度与水平气象视距相互转换的经验公式及其应用. *遥感学报*), 2003, **7**(5): 372–378.
- [11] Raymond F K, Roger N C. Spectroscopic determination of leaf biochemistry using band-depth analysis of absorption feature and stepwise multiple linear regression [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, **67**: 267–287.
- [12] Kruse F A, Lefkoff A Knowledge-based geologic mapping with imaging spectrometers. *Remote Sensing Review, Special Issue on NASA Innovative Research Program (IRP) Result*, 1993, **8**: 3–28.
- [13] Keshava N. Distance metrics and band selection in hyperspectral processing with applications to material identification and spectral libraries [J]. *IEEE Transactions in Geosciences and Remote Sensing*, 2004, **42**: 1552–1665.
- [14] MODTRAN4 Version 3 Revision 1 User's manual [R], 2003: 1–2.