

doi:10.3788/gzxb20154403.0328003

# 基于非同步替代光谱定标的地表下垫面影响分析

徐爱俊<sup>1</sup>, 原娟<sup>1,2</sup>, 张文娟<sup>2</sup>, 陈正超<sup>2</sup>, 张雅琼<sup>2</sup>, 李海巍<sup>2</sup>

(1 浙江农林大学, 浙江 临安 311300)

(2 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094)

**摘 要:**对 760nm 附近的氧气吸收带, 选用植被、枯萎植被、人工地物、沙地和雪地五种典型地表类型, 基于模拟数据进行非同步替代光谱定标方法的误差分析, 比较不同地表类型得到的光谱定标准确度, 为高光谱成像仪的非同步替代光谱定标提供定标图像选择策略。结果表明: 运用两种光谱匹配方法——光谱角度匹配和欧氏距离法得到的定标误差基本一致; 730~800 nm 的地表反射率曲线标准差在 0.05 nm 以内时, 定标误差集中在±0.5 nm 范围内; 人工地物类型中个别地物如橄榄绿光泽涂料和植被大面积覆盖的图像数据不适合用于非同步替代光谱定标。

**关键词:**高光谱成像仪; 光谱漂移; 非同步替代光谱定标; 地表下垫面; 光谱匹配; 定标准确度

中图分类号: TP722.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-421(2015)03-0328003-7

## Analysis of Underlying Surface Impact on Non-synchronous Alternative Spectral Calibration

XU Ai-jun<sup>1</sup>, YUAN Juan<sup>1,2</sup>, ZHANG Wen-juan<sup>2</sup>, CHEN Zheng-chao<sup>2</sup>,  
ZHANG Ya-qiong<sup>2</sup>, LI Hai-wei<sup>2</sup>

(1 Zhejiang Agriculture and Forestry University, Linan, Zhejiang 311300, China)

(2 Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

**Abstract:** In order to provide calibration image selection strategy for non-synchronous alternative spectral calibration, the oxygen absorption band near 760 nm was studied, spectral data of five underlying surface types of vegetation, withered vegetation, manmade objects, sand and snow were chosen to analyze. Based on simulated data, the analysis of calibration results and the accuracy was carried out, and spectral calibration errors of different underlying surface types was compared. Results showed that calibration errors based on the spectral angle matching method and the euclidean distance method are almost the same. When standard deviations of surface reflectance are less than 0.05 nm in 730 nm~800 nm, the spectral calibration precision is within ±0.5 nm. The olive green gloss paint and lush vegetation are not suitable to non-synchronous alternative spectral calibration.

**Key words:** Hyperspectral imager; Spectral offset; Non-synchronous alternative spectral calibration; Spectral matching; Underlying surface; Calibration accuracy

**OCIS Codes:** 280.0280; 120.0280; 010.0280; 150.1488

## 0 引言

光谱定标是确定高光谱成像仪各光谱通道中心波长位置和带宽的过程<sup>[1]</sup>, 是辐射定标的前提和基础。成像光谱仪在轨运行期间, 由于设备老化、运行环境温

度、湿度、重力、气压等变化, 会导致通道中心波长发生漂移<sup>[2]</sup>, 实验室光谱定标系数可能不再适用, 在轨运行后需要进行光谱定标。

非同步替代光谱定标一般是基于氧气、水汽、二氧化碳等大气分子的稳定吸收带或太阳 Fraunhofer 吸收

**基金项目:**国家自然科学基金(No. 41271370)、浙江省自然科学基金(Nos. LY14C160005, Y5110145)、浙江省林业智能监测与信息技术研究重点实验室开放基金和浙江农林大学智慧农业研究中心预研项目(No. 2013ZHNL01)资助

**第一作者:**徐爱俊(1976—), 教授, 主要研究方向为林业信息技术。Email: xuaj1976@126.com

**通讯作者:**张文娟(1983—), 副研究员, 博士, 主要研究方向为遥感仿真与定标。Email: zhangwj@radi.ac.cn

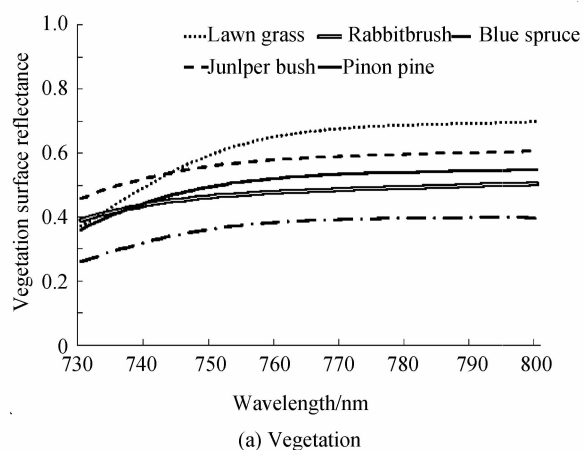
**收稿日期:**2014-08-19; **录用日期:**2014-10-20

<http://www.photon.ac.cn>

线,无需进行地面同步实验,基于图像表观反射率和模拟大气总透过率在吸收带附近的光谱匹配来实现中心波长的标定<sup>[3]</sup>.

由于不需要进行地面同步实验,非同步替代光谱定标成为在轨光谱定标的一种重要方法. Gao 等在不需地表实测反射率的情况下,利用光谱匹配法分析成像光谱仪获得的表观反射率与 MODTRAN 计算的参考光谱之间的差异,对机载和星载成像光谱仪进行了光谱定标<sup>[3-4]</sup>. Guanter 等指出成像光谱仪可能存在光学畸变,研究了大气吸收带附近高分辨率成像光谱仪光谱通道中心波长和带宽的偏移检测算法,并成功地运用于 HyMap、AVIRIS、CHRIS 等不同成像光谱仪<sup>[5-7]</sup>. 王天星等在其他学者研究基础上综合优化算法,同时标定 Hyperion 数据中心波长和半波宽<sup>[8-9]</sup>. 高海亮等通过 MODTRAN 模型模拟光谱,运用不同匹配类型和匹配算法定量化计算出在轨光谱定标准确度<sup>[10]</sup>. 已有研究主要采用光谱角度匹配法<sup>[11]</sup> (Spectral Angle Matching, SAM) 和欧式距离法<sup>[12]</sup> (Euclidean Distance, ED) 等对算法进行分析优化,但较少对表观反射率图像上地物的选择以及不同光谱匹配方法的选择带来的误差影响进行研究. 在该方法中,不同地表类型由于自身组分的差异而具有不同的光谱特征,从而导致大气吸收带附近的表观反射率存在差异,进而可能对定标结果产生影响.

为分析不同地表下垫面类型对光谱定标结果误差的影响,本文针对 760nm 为中心的氧气吸收带,选取了五种地表类型共 24 组地物光谱数据,基于大气辐射传输模型,模拟得到相应表观反射率,并分别加入  $-4\text{ nm}\sim+4\text{ nm}$  的模拟漂移量,运用 SAM 和 ED 两种匹配方法,将其与相同大气条件下的透过率进行对比,得到检测漂移量,进而分析不同地表类型、光谱匹配方法对非同步替代光谱定标误差的影响,给出非同步替代光谱定标中图像地物选择依据.



## 1 数据

### 1.1 高光谱成像仪氧气吸收通道光谱参量

实验基于天宫一号高光谱成像仪的光谱参量分析不同下垫面对非同步替代光谱定标方法准确度的影响. 天宫一号高光谱成像仪可见近红外 (Visible Near Infrared, VNIR) 谱段数据光谱范围为  $400\sim1\ 000\text{ nm}$ , 光谱分辨率约  $10\text{ nm}$ , 有效波段数为 64 个, 选取  $760\text{ nm}$  氧气吸收带附近的 6 个通道, 保证所选通道涵盖完整的吸收带. 各个通道的中心波长与半波宽情况如表 1.

表 1 TG-1 中心波长和半波宽 (nm)

Table 1 The center wavelength and FWHM of TG-1 sensor (nm)

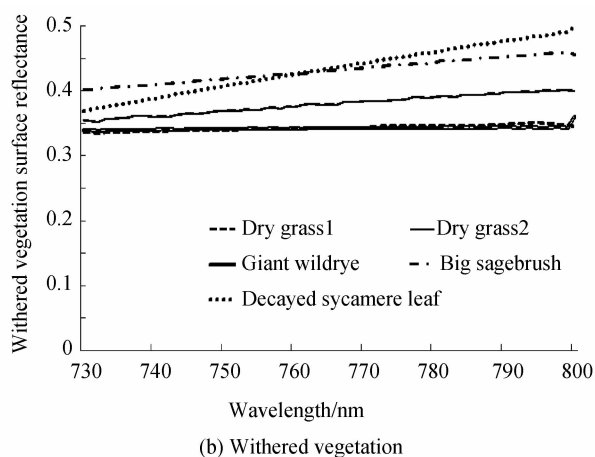
Center wavelength	738.54	748.51	758.58	768.84	779.20	789.54
FWHM	9.28	9.42	9.46	9.61	9.66	9.55

### 1.2 地表反射率数据

选用植被、枯萎植被、人工地物、沙地和雪地五种地表类型,共 24 组地物光谱反射率进行分析,地表反射率数据来自 Veg 波谱库和 JHU 光谱库. 其中,沙地类型中的敦煌数据取自地面光谱仪 ASD 测得的我国辐射定标场敦煌区域的实测反射率,地表反射率曲线见图 1.

这 24 种地物分别是草坪植被、金花矮灌木、蓝叶云杉、铅笔柏、矮松; 枯草 1、枯草 2、滨麦灰色叶、大艾草枯萎树叶、腐烂的无花果叶子; 橄榄绿光泽涂料、沥青、混凝土建筑、柏油、裸露的红砖; 敦煌实测数据、浅灰色棕壤土、深棕色砂质壤土、棕色粉沙壤土、棕色精细砂壤土; 新雪、霜、中粒雪、粗粒雪.

由图 1 可知,五种地表类型中除植被和人工地物中的橄榄绿光泽涂料以外,其它地物反射率曲线在该区域内都比较平缓,没有明显起伏. 其中植被在  $735\text{ nm}$  附近起伏较大,橄榄绿光泽涂料在  $760\text{ nm}$  附近起伏最大.



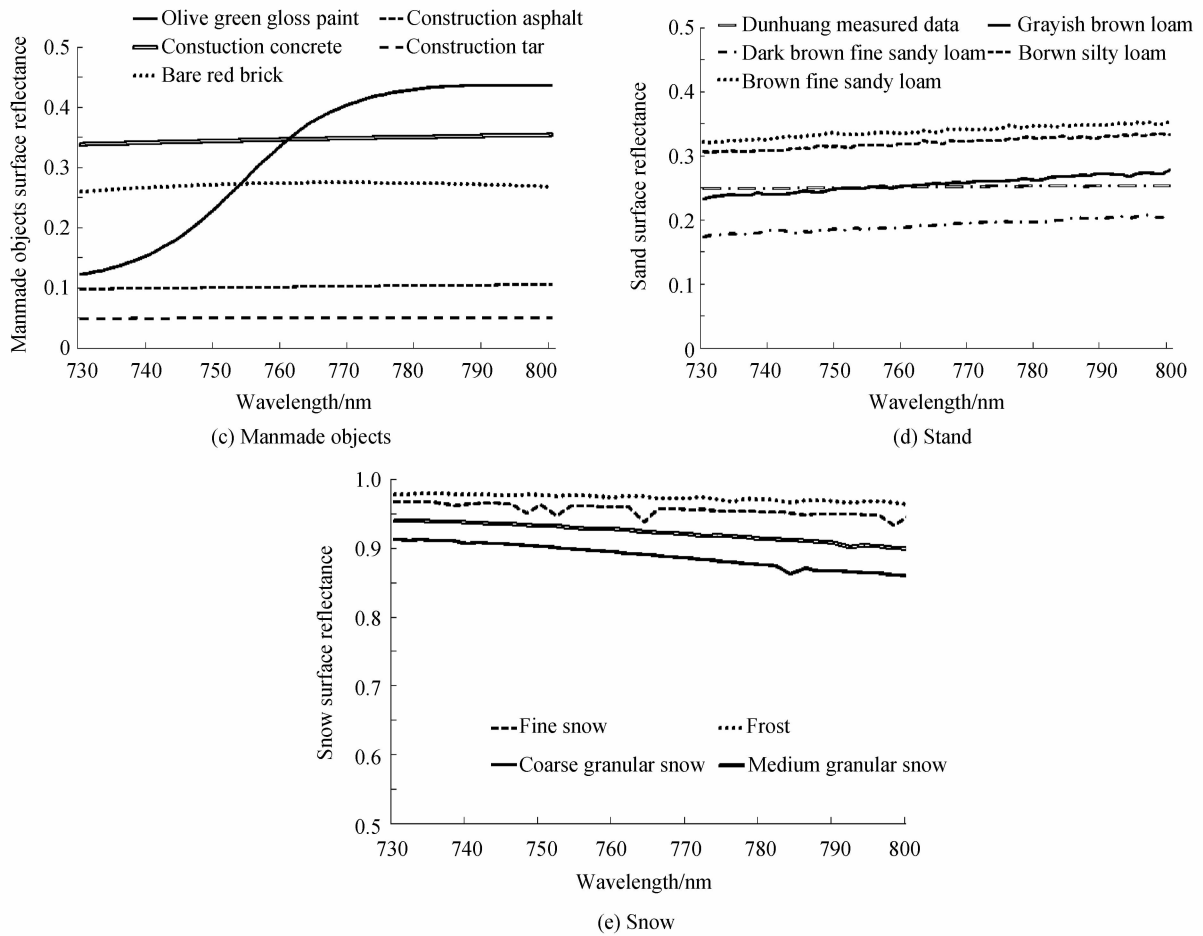


图1 五种地表类型的地表反射率  
Fig.1 Surface reflectance data of five underlying surface types

## 2 地表下垫面影响分析方法

对于采用的24组地物的地表反射率数据,设定光谱漂移量为±4 nm,±3 nm,±2 nm,±1 nm,0 nm共九种情况,基于大气辐射传输模型,计算得到对应的TOA辐亮度,进而基于式(1)~(5)进行非同步光谱定标<sup>[3]</sup>,求得对应的光谱漂移量,通过定标结果与设定的光谱漂移量的对比分析,实现不同的地表下垫面类型、不同光谱匹配方法对定标结果的影响分析,具体思路见图2。

### 2.1 模拟数据集构建

#### 2.1.1 光谱响应函数生成

依据中心波长漂移范围-4.0 nm~+4.0 nm,对TG-1六个通道对应的中心波长,以0.1 nm为步长,基于式(1)高斯拟合生成一系列漂移量下六个通道的光谱响应函数  $SRF(\lambda_{i,k})$ <sup>[8]</sup>。

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

$$(0 \leq k \leq \frac{2\lambda_{range}}{\Delta\lambda})$$

式中  $\Delta\lambda$  为步长,  $-\lambda_{range} \sim +\lambda_{range}$  为漂移范围,  $fwhm$  为

每个通道  $i$  的半波宽,  $SRF(\lambda_{i,k})$  为中心波长  $\lambda_c(i)$  在漂移量为  $-\lambda_{range} + k * \Delta\lambda$  时的光谱响应函数。

#### 2.1.2 高分辨率大气层顶(TOA)辐亮度计算

选用具有波谱范围广、准确度高等特点<sup>[13]</sup>的MODTRAN作为大气辐射传输模型。依据天宫一号获取的敦煌定标场数据成像条件,给定模型的大气条件、观测几何、地面高程及成像日期等参量,基于24组地表反射率数据,运用大气辐射传输模型MODTRAN计算得到波长730~800 nm范围内的24组0.1 nm分辨率TOA辐亮度  $L(\lambda)$ 。MODTRAN参量设置见表2。

表2 MODTRAN主要参量

Table 2 Main Input parameters of MODTRAN

Parameter	Input value
Atmosphere model	Mid-latitude winter pattern
CO <sub>2</sub> mixing ratio/ppmv	390
Aerosol model	RURAL extinction VIS=23 km(2013. 10. 22)
Surface altitude/km	1.238
Sensor altitude/km	100
View zenith	180°
Solar Zenith	60°
Ground reflectance	Vegetation; Withered vegetation; Manmade objects; Sand; Snow

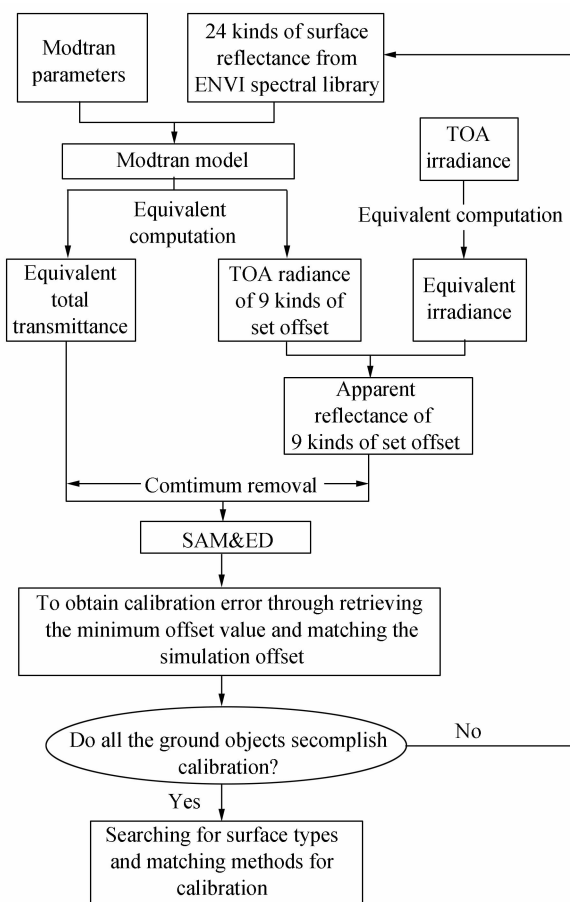


图2 地表下垫面类型引起的非同步替代光谱定标准确度分析流程

Fig. 2 The flowchart of the effect of underlying surface types on Non-synchronous alternative spectral calibration accuracy

### 2.1.3 不同漂移量下的辐亮度等效计算

以一组  $L(\lambda)$  为例, 结合  $SRF(\lambda_{i,k})$  通过式(2)进行等效计算<sup>[14]</sup>, 分别获得地物设定光谱漂移量为  $\pm 4 \text{ nm}, \pm 3 \text{ nm}, \pm 2 \text{ nm}, \pm 1 \text{ nm}, 0 \text{ nm}$  的 9 种待检测等效辐亮度  $L_{eq}E(\lambda)$ 。

同时, 针对来自 Thuil 2002 年太阳辐照度数据并经过日地距离校正后的高分辨率 TOA 太阳辐照度  $E(\lambda)$ , 通过式(2)进行等效计算, 获得检测漂移量范围  $-4.0 \text{ nm} \sim +4.0 \text{ nm}$ , 步长为  $0.1 \text{ nm}$  的 TOA 太阳辐照度  $E_{eq}(\lambda_{i,k})$ 。

$$I_{eq}(\lambda_{i,k}) = \frac{\int_{\lambda_{i,start}}^{\lambda_{i,end}} SRF(\lambda_{i,k}) \cdot I(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{i,start}}^{\lambda_{i,end}} SRF(\lambda_{i,k}) d\lambda} \quad (2)$$

式中,  $I(\lambda)$  表示等效前光谱数据,  $I_{eq}(\lambda_{i,k})$  表示等效后光谱数据,  $\lambda_{i,start}$  和  $\lambda_{i,end}$  分别代表  $I(\lambda)$  的起始波长和终止波长。

### 2.1.4 表观反射率计算

$L_{eq}(\lambda)$  与  $E_{eq}(\lambda_{i,k})$  通过(3)式计算得到光谱漂移量为  $\pm 4 \text{ nm}, \pm 3 \text{ nm}, \pm 2 \text{ nm}, \pm 1 \text{ nm}, 0 \text{ nm}$  的传感器入瞳处模拟表观反射率  $\rho_{ref}(\lambda_{i,k})$ , 即待检测光谱数据。

$$\rho_{ref}(\lambda_{i,k}) = \frac{\pi \cdot L_{eq}E(\lambda)}{\mu \cdot E_{eq}(\lambda_{i,k})} \quad (3)$$

式中,  $\mu$  为太阳天顶角的余弦。

## 2.2 等效大气透过率构建

基于表 2 中 MODTRAN 参量, 得到  $730 \sim 800 \text{ nm}$  范围内  $0.1 \text{ nm}$  高分辨率大气总透过率  $T(\lambda)$ , 结果见图 3。

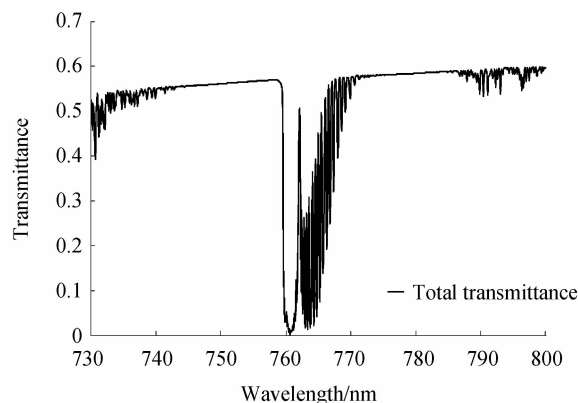


图3 MODTRAN 计算得到的大气总透过率  
Fig. 3 Atmospheric total transmittance calculated by MODTRAN

通过式(2)等效计算, 获得检测漂移量范围  $-4.0 \text{ nm} \sim +4.0 \text{ nm}$ , 步长为  $0.1 \text{ nm}$  的大气总透过率  $T_{eq}(\lambda_{i,k})$ 。

## 2.3 光谱匹配计算与漂移量检测

为了将  $\rho_{ref}(\lambda_{i,k})$  和等效  $T_{eq}(\lambda_{i,k})$  归一化到一致的光谱背景上, 需要做包络线去除<sup>[15]</sup>, 以增强其光谱曲线的氧气吸收特性, 有利于光谱曲线之间特征数值的比较. 基于包络线去除后的  $\rho_{ref}(\lambda_{i,k})$  和  $T_{eq}(\lambda_{i,k})$ , 采用 SAM 和 ED 即式(4)和式(5)来计算其数值之间的距离, 完成光谱匹配测度, 检索出 9 种设定漂移量下光谱匹配值最小时对应的中心波长漂移量  $\lambda_{shift}$ , 与之对应的待检测漂移值做误差分析, 得到一种地物的实验结果。

$$SAM_k = \arccos \frac{\sum_{i=1}^n T_{eq}(\lambda_{i,k}) \cdot \rho_{ref}(\lambda_{i,k})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n T_{eq}(\lambda_{i,k})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n \rho_{ref}(\lambda_{i,k})^2}} \quad (4)$$

$SAM_k \in (0, \frac{\pi}{2})$

$$ED_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n (T_{eq}(\lambda_{i,k}) - \rho_{ref}(\lambda_{i,k}))^2} \quad (5)$$

式中,  $n$  表示通道数. 当  $SAM_k$ 、 $ED_k$  最小时, 表示光谱最匹配。

## 2.4 适合定标的地物检测

按照上述过程依次得到 24 组地物的定标误差, 分析每一种地物在不同漂移量下的误差走势并判断适合进行定标的地表类型。

### 3 结果准确度分析

#### 3.1 光谱匹配算法的准确度影响分析

表3给出了24组地物基于两种匹配方法得到的9种设定漂移量下的平均定标准准确度.可以看出,植被平均误差分别为0.158 nm和0.176 nm,枯萎植被为0.162 nm和0.182 nm,人工地物为0.327 nm和

表3 基于SAM和ED两种匹配算法的24组地物平均光谱定标误差 (nm)

Table 3 Spectral calibration accuracy of 24 ground objects based on SAM and ED (nm)

Surface types	Ground objects	SAM	ED
Vegetation	Lawn grass	0.144	0.167
	Rabbitbrush	0.167	0.189
	Blue spruce	0.189	0.167
	Juniper bush	0.167	0.189
	Pinon pine	0.122	0.167
Average value		0.158	0.176
Withered vegetation	Dry grass1	0.167	0.167
	Dry grass 2	0.167	0.2
	Giant wildrye	0.167	0.2
	Big sagebrush	0.167	0.189
	Decayed sycamore leaf	0.144	0.156
Average value		0.162	0.182
Manmade objects	Olive green gloss paint	0.722	0.744
	Construction asphalt	0.222	0.222
	Concrete	0.167	0.189
	Construction tar	0.344	0.344
	Bare red brick	0.178	0.167
Average value		0.327	0.333
Sand	Dunhuang measured data	0.2	0.2
	Grayish brown loam	0.211	0.2
	Dark brown fine sandy loam	0.156	0.156
	Brown silty loam	0.178	0.178
	Brown fine sandy loam	0.2	0.2
Average value		0.189	0.187
Snow	Fine snow	0.167	0.189
	Frost	0.178	0.189
	Medium granular snow	0.189	0.189
	Coarse granular snow	0.167	0.178
	Average value		0.175

0.333 nm,雪地为0.175 nm和0.186 nm.针对大多数地物,光谱角度匹配法比欧氏距离法得到的定标准准确度略高,但相差不大,其差异小于0.06 nm.

#### 3.2 地表下垫面类型的准确度影响分析

结合五种地表类型共24组地物,基于两种光谱匹配方法得到不同光谱漂移量下平均误差如图4.

由图4可以看出,大多数地物表现出的误差趋势基本吻合,除个别异常值外,植被、枯萎植被、人工地物、沙地和雪地这五种地表类型的绝对误差分别控制在0.7 nm、0.5 nm、0.7 nm、0.55 nm、0.4 nm范围内,且随着漂移量变大,误差值逐渐变大.标准差是各单位标准值与其平均数离差平方的算术平均数的平方根,它反映了数据集的离散程度.将地表反射率平缓程度用标准差来衡量,与24种地物定标平均误差之间的关系如图5.

图5中每一列点代表每一组地物地表反射率的标准差对应的9个漂移误差值.由于标准差越小,代表数据变化越平缓.可知,标准差在0.05 nm范围以内的地物,得到的定标准准确度集中在-0.5 nm~+0.5 nm之间;标准差大于0.05 nm的六组地物,即5组植被和人工地物中的橄榄绿光泽涂料,定标准准确度不稳定,范围在-2.5 nm~+1 nm之间.表明地表反射率平缓的地物得到的定标准准确度较好.图中标准差在0.05 nm范围以内的点较密集,是由于自然界大部分常见地物的反射率曲线都比较平缓,所以标准差小于0.05 nm范围的点比大于0.05 nm的点多.

1) 人工地物中橄榄绿光泽涂料,误差结果全部呈现负值,且待检测正漂移值越大,异常值越明显,与其他地物结果有很大不同.这是由于其地表反射率在氧气吸收通道760 nm附近出现明显的上升趋势,进而反映到表观反射率的波形,与大气透过率波形匹配时,由于两者波形本身差异引起了一定误差,这表明地物在吸收通道反射率若存在明显的起伏,会给非同步定标带来一定的影响.可见部分人工地物如橄榄绿光泽涂料不适合用做定标.

2) 5组植被的地表反射率标准差均在0.05 nm以上,其绝对误差在0.7 nm范围内,虽然误差值没有呈现出类似橄榄绿光泽涂料的偏大现象,但误差趋势线在负漂移时出现明显抖动现象.该结果是由于植被地表反射率在735 nm附近有明显上升趋势,该趋势部分影响到760 nm附近氧气吸收特性造成的.可见植被也不适合用做定标.

3) 其他三种地表类型表现的误差趋势大致吻合,其中雪地类型的定标误差很一致.经过光谱角度匹配后的枯萎植被、沙地和雪地的整体绝对误差分别控制在0.4 nm、0.5 nm和0.4 nm范围内,经过欧氏距离匹配后的枯萎植被、沙地和雪地的整体绝对误差分别控

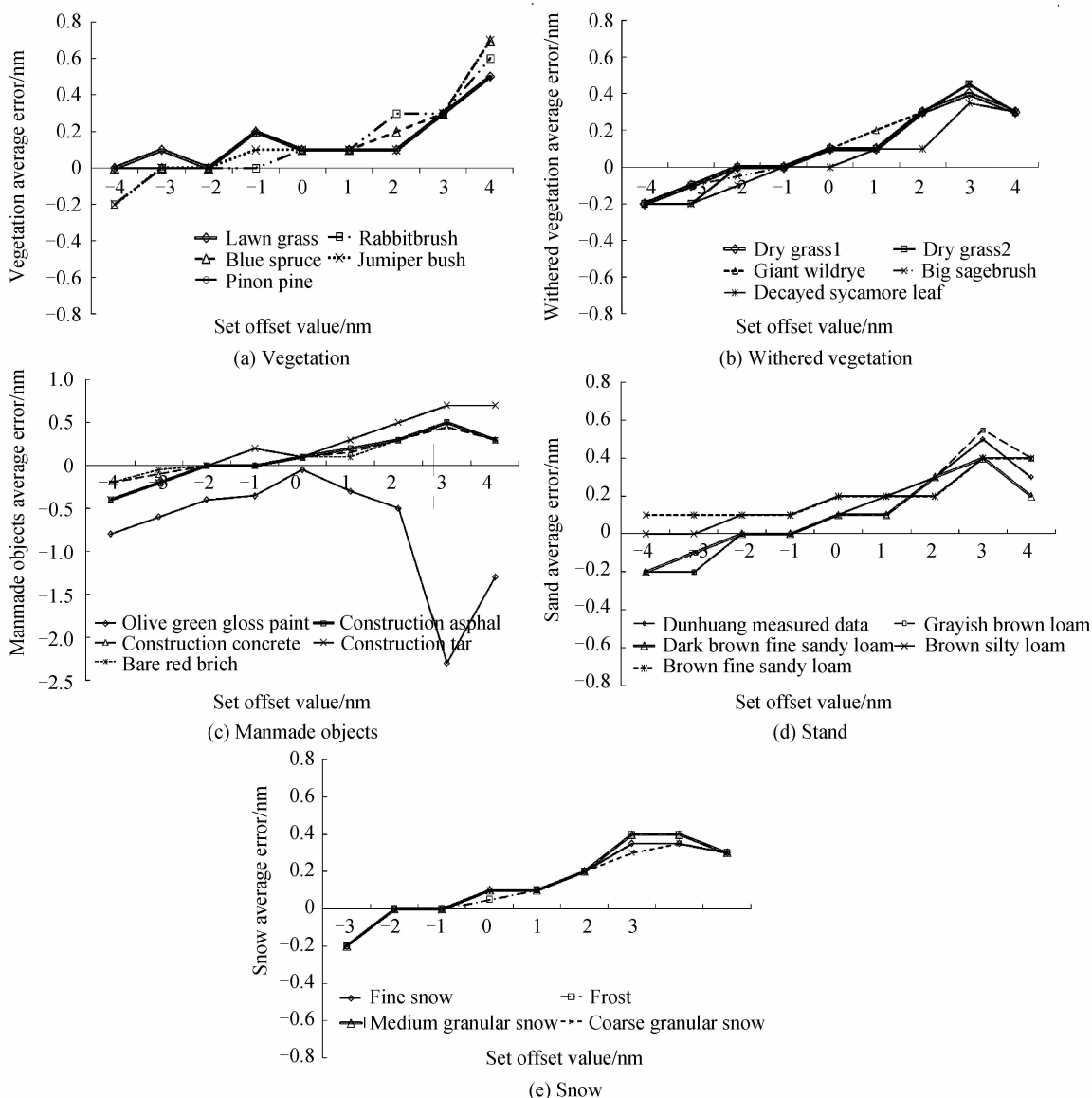


图 4 基于两种匹配方法的非同步替代光谱定标结果平均误差图

Fig. 4 The average error of Non-synchronous alternative spectral calibration based on SAM and ED

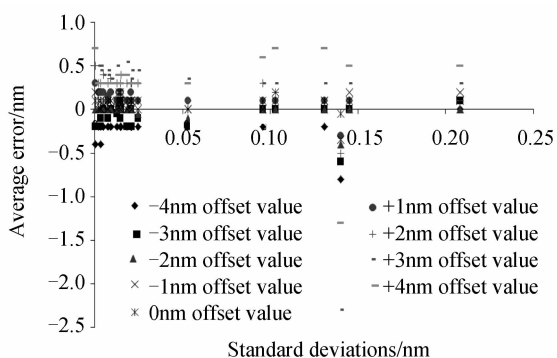


图 5 24 组地物地表反射率标准差与定标平均误差之间的关系

Fig. 5 The relationship of standard deviation of surface reflectance and average error based on 24 surface types  
制在 0.6 nm, 0.6 nm 和 0.4 nm 范围内,故这三种地表类型均可以作为定标的地表下垫面。

4) 运用敦煌试验场的实测地面数据得到的定标结果,与沙地其他种类的定标结果保持了很好的一致性,说明定标准确度与数据来源无关。

### 3.3 设定漂移值+4 nm 时的异常分析

针对多数地物在+4 nm 附近定标误差出现了明显减小的现象,以敦煌为例,其光谱角度匹配结果见图6。

图 6 中的直线表示光谱评价指标随光谱漂移量的变化趋势.可以看出,SAM 曲线在+4 nm 附近出现明显抖动,抖动值较接近,没有明显的波谷值,是导致误差值变小的原因.由于光谱响应函数是由中心波长和半波宽高斯模拟而成的,若实际光谱响应函数不对称且不规则时,理想高斯模拟的光谱响应函数可能会对最终的定标结果产生误差影响<sup>[16]</sup>,这有可能是造成这种现象的原因。

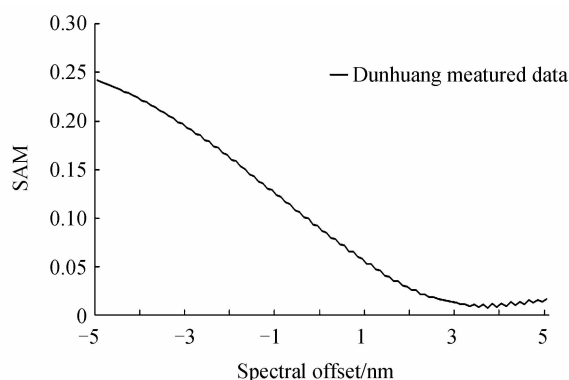


图6 敦煌实测数据+4 nm处光谱角度匹配结果  
Fig. 6 The result of Dunhuang data with SAM method while the spectral offset value is +4 nm

## 4 结论

本文以天宫一号光谱参量为对象,针对地表下垫面类型即不同地表反射率条件下运用两种光谱匹配方法进行定标误差对比研究,得到以下结论:

1) 对于个别情况,光谱角度匹配法比欧氏距离法得到的结果准确度高。总体上,在非同步光谱定标中,采用SAM和ED引起的定标误差差异非常小。

2) 基于24种地物的误差分析可知,地表反射率在760 nm氧气吸收通道附近有明显起伏,会对非同步光谱定标有较大影响,带来的误差可以达到2 nm。而730~800 nm的地表反射率曲线标准差在0.05 nm以内时,定标误差集中在±0.5 nm范围内。

3) 非同步定标图像选择时,要选择地表反射率平缓的地物,如枯萎植被、沙地、雪地等,这些地物的整体误差小于0.6 nm;植被由于其反射率的不平缓影响到氧气吸收带,导致误差偏大,故尽量避开植被。这项研究为今后适合定标的地物选择提供有利的参考依据。

由于我国地处中纬度地区,故本文针对中纬度冬季模式和夏季模式两种模式下的光谱定标结果进行了准确度对比分析。经实验证实,大气模式的不同对定标误差造成的差别不会超过0.1 nm,因此文中没有特别分析大气模式的影响,进一步的研究中,考虑将大气模式细化,并重点考虑气溶胶、水汽等典型因子,开展影响分析。

### 参考文献

- [1] CHRIEN T G, GREEN R O, EASTWOOD M L Accuracy of the spectral and radiometric laboratory calibration of the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS)[C]. SPIE, 1990, **1298**: 37-49.
- [2] ZHANG Jun-qiang, SHAO Jian-bing, YAN Chang-xiang, et al. Data processing of on-orbit spectral calibration of spaceborne high resolution imaging spectrometer [J]. *Chinese Optics*, 2011, **4**(2): 175-181.  
张军强,邵建兵,颜昌翔,等.成像光谱仪星上光谱定标的数据处理[J]. *中国光学*, 2011, **4**(2): 175-181.
- [3] GAO B C, MONTES M J, DAVIS C O. Refinement of wavelength calibrations of hyperspectral imaging data using a spectrum-matching technique [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **90**(4): 424-433.
- [4] GAO B C, MONTES M J, DAVIS C O. A curve fitting technique to improve wavelength calibrations of imaging spectrometer data [J]. *JPL Airborne Earth Sci Workshop*, 2002, **3**(4): 99-105.
- [5] GUANTER L, SEGL K, SANG B, et al. Scene-based spectral calibration assessment of high spectral resolution imaging spectrometers [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(14): 11594-11606.
- [6] GUANTER L, ESTELLES V, MORENO J. Spectral calibration and atmospheric correction of ultra-fine spectral and spatial resolution remote sensing data. Application to CASI-1500 data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, **109**: 54-65.
- [7] MORENO L, RICHTER R, MORENO J. Spectral calibration of hyperspectral imagery using atmospheric absorption features [J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(10): 2360-2370.
- [8] WANG Tian-xing, YAN Guang-jian, REN Hua-zhong, et al. Retrieval of spectral characteristics of hyperspectral sensor and retrieval of reflectance spectra [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(10): 2714-2718.  
王天星,阎广建,任华忠,等.高光谱传感器光谱性能参量反演与反射率恢复[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(10): 2714-2718.
- [9] WANG Tian-xing, YAN Guang-jian, REN Hua-zhong, et al. Improved methods for spectral calibration of on-orbit imaging spectrometers [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, **48**(11): 3924-3931.
- [10] GAO Hai-liang, GU Xing-fa, YU Tao, et al. In-flight spectral calibration of oxygen absorption channels of Hyperspectral Sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(10): 1028001.  
高海亮,顾行发,余涛,等.氧气吸收通道的高光谱传感器在轨光谱定标机理[J]. *光子学报*, 2014, **43**(10): 1028001.
- [11] KRUSE F A, LEFKOFF A Knowledge-based geologic mapping with imaging spectrometers [J]. *Remote Sensing Review*, 1993, **8**: 3-28.
- [12] 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**(7): 1552-1565.
- [13] SUN Yi-yi, DONG Hao, BI Zhao-hui, et al. Inter-comparison of models for radiative transfer in the atmosphere [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(2): 149-153.  
孙毅义,董浩,毕朝辉,等.大气辐射传输模型的比较研究[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(2): 149-153.
- [14] CHEN Wei, YAN Lei, GOU Zhi-yang, et al. In-flight absolute radiometric calibration of UAV multispectral sensor [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, **32**(12): 3169-3174.  
陈伟,晏磊,勾志阳,等.无人机多光谱传感器场地绝对辐射定标研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, **32**(12): 3169-3174.
- [15] 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**(3): 267-287.
- [16] 梁顺林. 定量遥感[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 10.