

doi:10.3788/gzxb20144310.1028001

氧气吸收通道的高光谱传感器在轨光谱定标

高海亮, 顾行发, 余涛, 谢勇, 孙源, 郑逢杰

(中国科学院遥感与数字地球研究所, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101)

摘 要:通过对 760 nm 氧气吸收特征的分析, 构建波段半高宽分别为 15、10、5 和 2.5 nm 的高光谱传感器模型, 提出了四种光谱匹配类型和六种光谱匹配算法. 基于 MODTRAN 辐射传输模型模拟出包含光谱偏移信息的测量光谱与参考光谱, 计算出不同匹配类型和匹配算法的在轨光谱定标精度. 结果表明, 采用测量表观辐亮度和参考表观辐亮度作为光谱匹配类型, 以相关系数作为光谱匹配算法的光谱定标精度最高.

关键词:光谱定标; 氧气吸收; 光谱匹配; 高光谱遥感; 光谱偏移

中图分类号: TP722.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)10-1028001-8

In-flight Spectral Calibration of Oxygen Absorption Channels of Hyperspectral Sensor

GAO Hai-liang, GU Xing-fa, YU Tao, XIE Yong, SUN Yuan, ZHENG Feng-jie

(State key laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The Oxygen absorption characteristic was analyzed and four hyperspectral sensor models were built with full width at half maximum of 15, 10, 5 and 2.5 nm. Four spectral matching styles and six spectral matching algorithms were proposed. The measured spectrum and referenced spectrum with spectral offset were simulated based on MODTRAN radiative transfer model. The spectral calibrations of hyperspectral sensor with different FWHMs were processed using four spectral matching styles and six spectral matching algorithms. Then the in-flight spectral calibration accuracy was analyzed quantitatively. The results show that the spectral calibration based on correlative coefficient of measured apparent radiance and referenced apparent radiance has the highest accuracy.

Key words: Spectral calibration; Oxygen absorption; Spectral matching; Hyperspectral remote Sensing; Spectral offset

OCIS Codes: 010.0280; 120.0280; 150.1488; 280.0280

0 引言

高光谱遥感是遥感领域研究的热点, 成像光谱技术可获取数百个连续光谱的图像, 在对地面成像的同时, 测量地物的光谱信息. 高光谱遥感中的诊断光谱特征在矿物识别、水体污染监测、污染气体反演等领域具有不可替代的作用^[1-3].

高精度的在轨辐射和光谱定标是高光谱遥感定量应用的前提和基础. 在轨定标精度将直接影响后续量化产品反演的精度. 目前, 针对成像光谱仪的在轨辐射定标主要有星上定标法、太阳定标法、月球定标法和替代定标法四种. 星上定标法是利用内置定标灯或积分球作为定标光源, 利用摆镜, 对内置定标光源成像, 实现成像光谱仪的在轨绝对辐射定标. 星上定标法

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(No. 41201344)、中国科学院遥感应用研究所知识创新工程青年人才领域前沿项目(No. Y1S01800CX)和中科院遥感与数字地球研究所自主研发项目(No. Y3SZ380030)资助

第一作者:高海亮(1982-), 男, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为在轨辐射与光谱定标. Email: gaohl@radi.ac.cn

导师(通讯作者):顾行发(1962-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为辐射定标与定量遥感. Email: guxingfa@radi.ac.cn

收稿日期:2014-01-03; **录用日期:**2014-04-03

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

具有较高的精度,但内置定标灯由于卫星发射过程中的剧烈震动和长时间运行,定标灯自身会发生衰减,导致定标精度越来越低^[4-5]。太阳定标法和月球定标法类似,都是通过调整卫星姿态,分别对太阳或月球成像,实现高精度辐射定标。这两种方法是目前国外成像光谱仪主要采用的定标方法,但太阳定标和月球定标对卫星操控的技术要求非常高,且定标过程中星上漫反射板也可能发生衰减,因此需要利用其他独立的方法进行验证^[6]。替代定标法是利用地面同步测量反射率和大气参量作为标准,通过辐射传输计算,模拟大气层顶的表观辐亮度,实现轨光谱定标。替代定标法中常用的方法是反射率基法,目前已成功用于星载成像光谱仪 Hyperion 和 HSI 的在轨辐射定标。替代定标方法具有较高的可信度,但定标同步实验需要耗费大量的人力物力,且实验受天气和卫星过境时间的限制,定标次数有限^[7-8]。因此,理想的在轨辐射定标是同时利用多种独立的方法,分别进行在轨辐射定标,通过不同方法定标结果的相互验证,确定辐射定标的精度。

在轨光谱定标的目的是确定各波段的中心波长和半高宽,具体方法包括星上光谱定标法、大气临边光谱定标法和基于吸收气体的光谱定标方法。星上光谱定标法是将星上定标灯进入传感器的光路中,加入有吸收特征的滤光片或反射板,确定光谱中心波长位置。星上光谱定标方法需要在卫星平台上安装相应的光谱定标设备,对载荷研制的要求较高^[9]。大气临边光谱定标需要对卫星姿态进行调整,观测经过整个大气层的透过率;利用大气吸收特征曲线,实现轨光谱定标。大气临边法需要具有对卫星姿态精确控制的能力,实现难度较大,可开展的次数有限^[10]。基于吸收气体的光谱定标是利用对地面观测的图像,根据氧气、水汽、二氧化碳等吸收通道的光谱曲线特征,实现轨光谱定标^[11-13]。同星上光谱定标和大气临边光谱定标相比,基于吸收气体的光谱定标不需要增加新的定标设备或调整卫星姿态,实现难度小,可开展的频率高,是一种重要的光谱定标方法。常见的气体吸收特征有 $0.76 \mu\text{m}$ 的氧气吸收通道, 0.94 、 1.14 、 $1.38 \mu\text{m}$ 的水汽吸收通道、 2.01 和 $2.06 \mu\text{m}$ 的二氧化碳吸收通道等。其中,氧气具有含量稳定,吸收特征明显等优点,基于氧气吸收通道的光谱定标是可见近红外波段最主要的光谱定标方法之一。

本文利用 $0.76 \mu\text{m}$ 的氧气吸收通道开展在轨光谱定标机理研究,对现有的氧气吸收通道光谱定标方法进行归纳和总结,通过模拟不同光谱分辨率的高光谱传感器,提出四种光谱匹配类型和六种光谱匹配算法。最后,模拟出不同光谱分辨率下的测量光谱和参考光谱数据集,实现高光谱传感器的在轨光谱定标,分析总结不同方法的在轨光谱定标精度。

1 氧气吸收通道的光谱定标方法

氧气吸收通道的光谱定标方法可分为两大类。第一类基于大气层顶的测量光谱曲线同参考光谱曲线进行光谱匹配,确定光谱位置的偏移量。这类方法统称为“光谱匹配方法”。第二类方法是对高光谱图像进行大气校正,得到包含光谱偏移信息的地表反射率,采用光谱平滑技术,确定光谱偏移量,也称为光谱平滑方法。

光谱匹配方法于 20 世纪 70 年代提出,最早用于大气吸收峰位置和宽度的确定^[14]。90 年底, Gao & Goetz 利用光谱匹配技术反演出 AVIRIS 机载高光谱图像的大气水汽含量^[15]。20 世纪初,随着高光谱载荷的增多,光谱匹配技术逐步用于高光谱载荷在轨光谱定标的研究。基于匹配技术的光谱定标利用大气中的水汽、氧气、二氧化碳等吸收波段的测量光谱以及太阳夫琅和费特征线进行光谱匹配,确定中心波长的光谱偏移量。Green 等利用阿根廷 Arizaro 试验场同步测量数据,结合 $0.76 \mu\text{m}$ 氧气吸收通道的辐亮度光谱曲线,采用光谱匹配技术,实现了 Hyperion 的在轨光谱定标。Gao 等以表观反射率作为测量光谱,利用辐射传输模型模拟出包含光谱偏移信息的大气透过率,对 AVIRIS, PHILLS 和 Hyperion 三个高光谱传感器进行了在轨光谱定标,确定了氧气吸收通道的光谱偏移量。之后, Gao 等又将技术用于对国际空间站上的近海岸高光谱成像仪 (Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean, HICO) 的在轨光谱定标^[16]。

光谱平滑方法最早由 Guanter 于 2006 年提出。其基本思想是对高光谱图像进行大气校正。由于光谱偏移误差和大气参量误差的影响,反演的反射率曲线存在不同程度的毛刺现象。通过改变中心波长的位置,计算包含光谱偏移信息的大气校正参量,得到新的地表反射率。将光谱偏移量从 -5 nm 以 0.1 nm 的步长增加到 5 nm ,得到不同光谱偏移量下的地表反射率。另外,对不包含光谱偏移信息的反射率曲线进行均值平滑处理,以光谱平滑后的曲线作为参考曲线。将包含光谱偏移的反射率平滑后的反射率曲线进行标准差计算,标准差最小的位置即为光谱定标结果。Guanter 详细介绍了光谱平滑方法的具体过程,并分析了地表反射率类型,光谱偏移量,水汽含量对反演精度的影响,最后给出了 HyMap, AVIRIS, ROSIS 和 PROBA/CHRIS 等多个成像光谱仪的在轨光谱定标结果。Rodger 对光谱平滑方法进行了改进,不仅考虑了光谱偏移的影响,同时考虑了波段半高宽 (Full Width at Half Maximum, FWHM) 的变化。新方法采用二阶导数算法确定光谱偏移量,并对 HyMap 进行在轨光谱定标和水汽含量的反演。

这两类在轨光谱定标方法在机理上有较大的不

同,本文针对第一类方法进行光谱定标机理的研究,分析光谱分辨率、光谱匹配类型和光谱匹配算法对定标结果的影响,确定光谱定标精度。

2 基于氧气吸收通道的光谱定标机理

2.1 氧气吸收特征分析

图1给出了典型的大气总透过率和氧气吸收透过率。大气总透过率受多种因素影响,在蓝绿波段主要受气溶胶和分子散射影响,随着波长增加,气体吸收通道出现明显的吸收峰。氧气吸收峰主要有三个位置,即630、690和760 nm。前两个位置的吸收峰较小,难以用于光谱定标,本文选择氧气吸收峰和邻近的大气窗口通道,光谱范围设为740~790 nm,研究760 nm附近的氧气吸收通道。

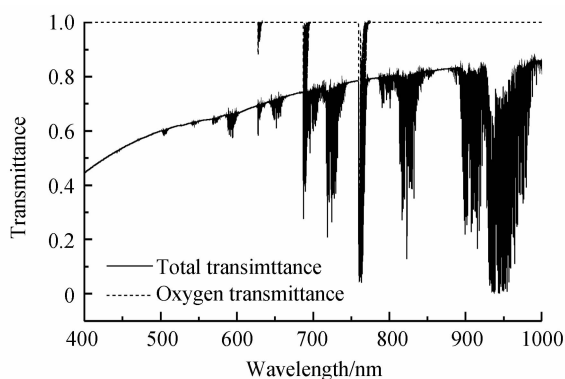


图1 大气总透过率与氧气吸收透过率

Fig. 1 Total transmittance and oxygen absorption transmittance

2.2 高光谱传感器模型构建

通常情况下,光谱分辨率小于10 nm的成像光谱仪称为高光谱传感器,小于1 nm的成像光谱仪称为超光谱传感器。高光谱传感器的光谱响应函数一般利用高斯函数,根据中心波长和波段半高宽 FWHM 确定。高斯函数可表示为

$$S_i(\lambda) = \exp \left[- \left(\frac{\lambda - \lambda_{c,i}}{\sigma_i / (2 \sqrt{\ln 2})} \right)^2 \right] \quad (1)$$

式中, $S_i(\lambda)$ 为第*i*个通道的高斯型光谱响应函数, $\lambda_{c,i}$ 为第*i*个通道的中心波长, σ_i 表示第*i*个通道的波段半高宽 FWHM。

分别模拟波段半高宽分别为15、10、5和2.5 nm的高光谱传感器模型,对应的光谱参量如表1所示。假

表1 高光谱传感器波段设置

Table 1 Band setting of hyperspectral sensor

Sensor type	FWHM /nm	Begin wavelength/nm	End wavelength/nm	Number
Sensor 1	15	740	790	4
Sensor 2	10	740	790	6
Sensor 3	5	740	790	11
Sensor 4	2.5	740	790	21

设波段半高宽不发生变化,当传感器中心波长偏移量为 δ 时,新的光谱响应函数表示为

$$S_i(\lambda; \delta) = \exp \left[- \left(\frac{\lambda - \lambda_{c,i} - \delta}{\sigma_i / (2 \sqrt{\ln 2})} \right)^2 \right] \quad (2)$$

式中, $S_i(\lambda; \delta)$ 是包含光谱偏移信息的光谱响应函数, δ 是光谱偏移量。

2.3 光谱匹配类型

光谱定标需要确定测量光谱类型和参考光谱类型。总结现有的光谱定标方法,光谱匹配类型可分为以下几类:

匹配类型 1:测量表观辐亮度与参考表观辐亮度

匹配类型 2:测量表观辐亮度与参考大气透过率

匹配类型 3:测量表观反射率与参考表观反射率

匹配类型 4:测量表观反射率与参考大气透过率

2.4 光谱匹配算法

目前,常用的光谱匹配算法有标准差法、相关系数法、最小距离法、极值法、光谱夹角法和协方差法^[17]:

1)标准差法(Standard Deviation, SD)

标准差法计算测量光谱与参考光谱差值的标准差,当标准差最小时对应的中心波长即为新的中心波长位置。标准差法 SD 可表示为

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^2} \quad (3)$$

式中, d_i 表示测量光谱与参考光谱的差值 $d_i = L_m^i - L_r^i$, \bar{d} 表示所有差值的平均值, N 表示进行光谱匹配的波段数。

2)相关系数法(Correlation Coefficient, CC)

相关系数法计算测量光谱与参考光谱的相关系数,相关系数最大时对应的偏移量即为光谱定标结果。相关系数法 CC 的计算公式为

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^N (L_m^i - \bar{L}_m) (L_r^i - \bar{L}_r)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (L_m^i - \bar{L}_m)^2 \sum_{i=1}^N (L_r^i - \bar{L}_r)^2}} \quad (4)$$

式中, L_m^i 表示第*i*个通道的测量光谱, \bar{L}_m 表示所有通道测量光谱的均值; L_r^i 表示第*i*个通道的参考光谱, \bar{L}_r 表示所有通道参考光谱的均值。

3)最小距离法(Least Distance, LD)

最小距离法以测量光谱与参考光谱差值的平方和的根作为对应的光谱距离,当距离最小时对应的中心波长即为新的中心波长位置。最小距离法 LD 的计算公式为

$$LD = \sqrt{\sum_{i=1}^N (L_m^i - L_r^i)^2} \quad (5)$$

4)极值法(Extreme Value, EV)

极值法利用三次样条曲线对测量光谱和参考光谱进行曲线拟合,计算响应拟合曲线的极值(波谷)位置,当测量光谱的极值位置与参考光谱极值位置重合时,

对应的光谱偏移量即为光谱定标结果.

$$EV = P_m - P_r \quad (6)$$

式中, P_m 和 P_r 分别表示测量光谱和参考光谱的极值位置. P_m 可利用式(7)计算得到

$$P_m = \delta(k) \text{ where } SL_m(k) = \min(SL_m) \quad (7)$$

式中, $\delta(k)$ 为第 k 个光谱漂移量, $SL_m(k)$ 表示样条差值曲线的第 k 个值, $\min(SL_m)$ 表示样条插值曲线的最小值, k 表示样条插值曲线最小值所在位置. SL_m 是对测量光谱 L_m 进行样条插值 $Spline(L_m)$. 参考光谱的极值位置 P_r 采用类似的计算公式.

5) 光谱夹角法(Spectrum Angle, SA)

光谱夹角法通过计算测量光谱与参考光谱之间的光谱夹角, 将光谱夹角最小时对应的光谱偏移量作为光谱定标结果. 光谱夹角可表示为

$$SA = \cos \theta = \frac{\sum_{i=1}^N L_m^i L_r^i}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (L_m^i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (L_r^i)^2}} \quad (8)$$

6) 协方差法(Covariance, CO)

协方差法计算测量光谱与参考光谱的协方差, 当协方差最大时对应的中心波长即为新的中心波长位置. 协方差计算公式为

$$CO = \sum_{i=1}^N (L_m^i - \bar{L}_m) \cdot (L_r^i - \bar{L}_r) \quad (9)$$

3 光谱定标精度分析

利用 MODTRAN 构建不同光谱分辨率下的测量光谱和参考光谱, 量化计算四种光谱匹配类型和六种光谱匹配算法的在轨光谱定标精度. 假设高光谱传感器的波段 FWHM 不变, 中心波长位置分别偏移 1 nm 和 4 nm, 计算对应的光谱定标反演精度.

3.1 测量光谱与参考光谱模拟

在光谱定标过程中, 较难获取精确的地表和大气参量, 因此, 在模拟测量光谱和参考光谱时, 刻意采用了不同的地表和大气参量. 测量光谱与参考光谱的辐射传输模型输入参量如表 2.

表 2 测量光谱与参考光谱辐射传输模拟输入参量

Table 2 Radiative transfer parameters for measured spectrum and reference spectrum

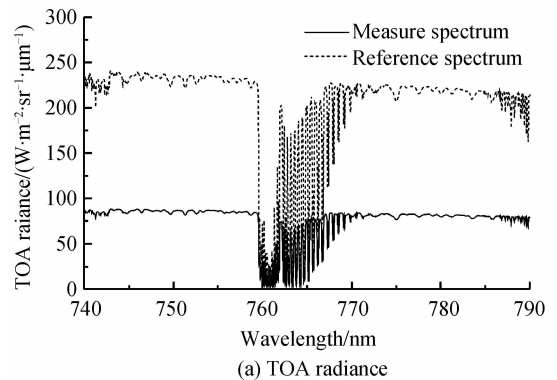
Parameter	Measured spectral input value	Reference spectral input value	Description
MODEL	6	2	Atmosphere model. 6 1976 U. S. Standard; 2 Mid latitude Summer
CO ₂ MX	360	330	CO ₂ mixing ratio/ppmV
H ₂ O STR	1.0	2.0	Vertical water vapor column/(gm • cm ⁻²)
O ₃ STR	0.280	0.35	Vertical ozone column/atm-cm
IHAZE	10	1	Aerosol model . 10 DESERT extinction; 1 RURAL extinction
VIS	50	23	Surface meteorological range/km
SALB	Gobi spectrum *	Desert spectrum	Ground reflectance/1
SZN	30	30	Solar Zenith/(°)
SAZ	150	150	Solar Azimuth/(°)
VZN	0	0	View Zenith/(°)
VAZ	98	98	View Azimuth/(°)
GNDALT	1250	1200	Ground Altitude/m

* Spectrum measured at Dunhuang test site on Aug 26, 2009

测量光谱和参考光谱的输入参量, 除太阳、观测角度外, 其他参量都采用不同的值, 以分析在包含地表和大气参量误差情况下的光谱定标精度. 由于敦煌辐射校正场具有面积大、地表均匀, 已开展多年在轨辐射定标等优点, 在模拟光谱时, 引入了敦煌辐射校正场的部分参量如地表反射率和海拔高度, 今后可利用该场地进行高光谱传感器的在轨光谱定标.

图 2 给出了利用辐射传输模型模拟得到的测量光谱与参考光谱曲线, 光谱分辨率为 1 cm⁻¹. 图 2(a) 为表观辐亮度光谱, 图 2(b) 为表观反射率光谱, 图 2(c) 为大气透过率光谱. 可以看出, 不论是表观辐亮度, 表观反射率还是大气透过率, 测量光谱值与参考光谱值的绝对值都存在较大的差异. 这是因为输入的地表和

大气参量都刻意选择不同的参量值. 今后进行光谱定标时, 地表和大气误差应小于本次误差, 对应的光谱定标精度应优于本次反演结果.



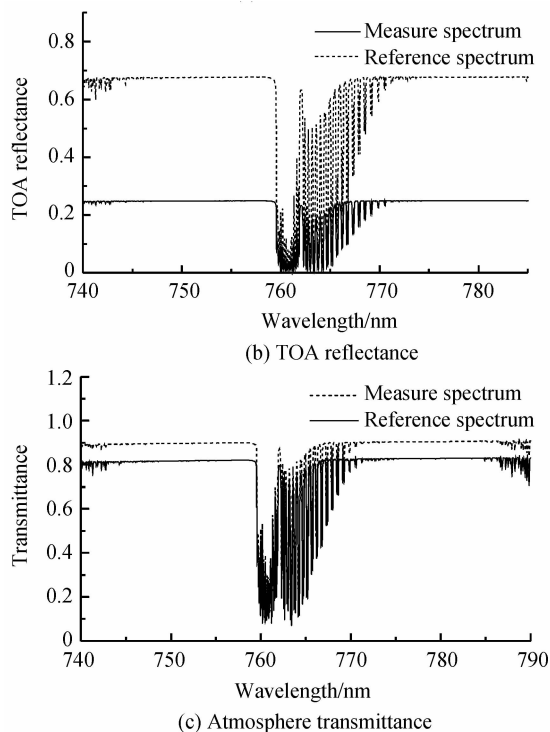


图2 模拟的测量光谱和参考光谱

Fig. 2 Measured spectrum and reference spectrum

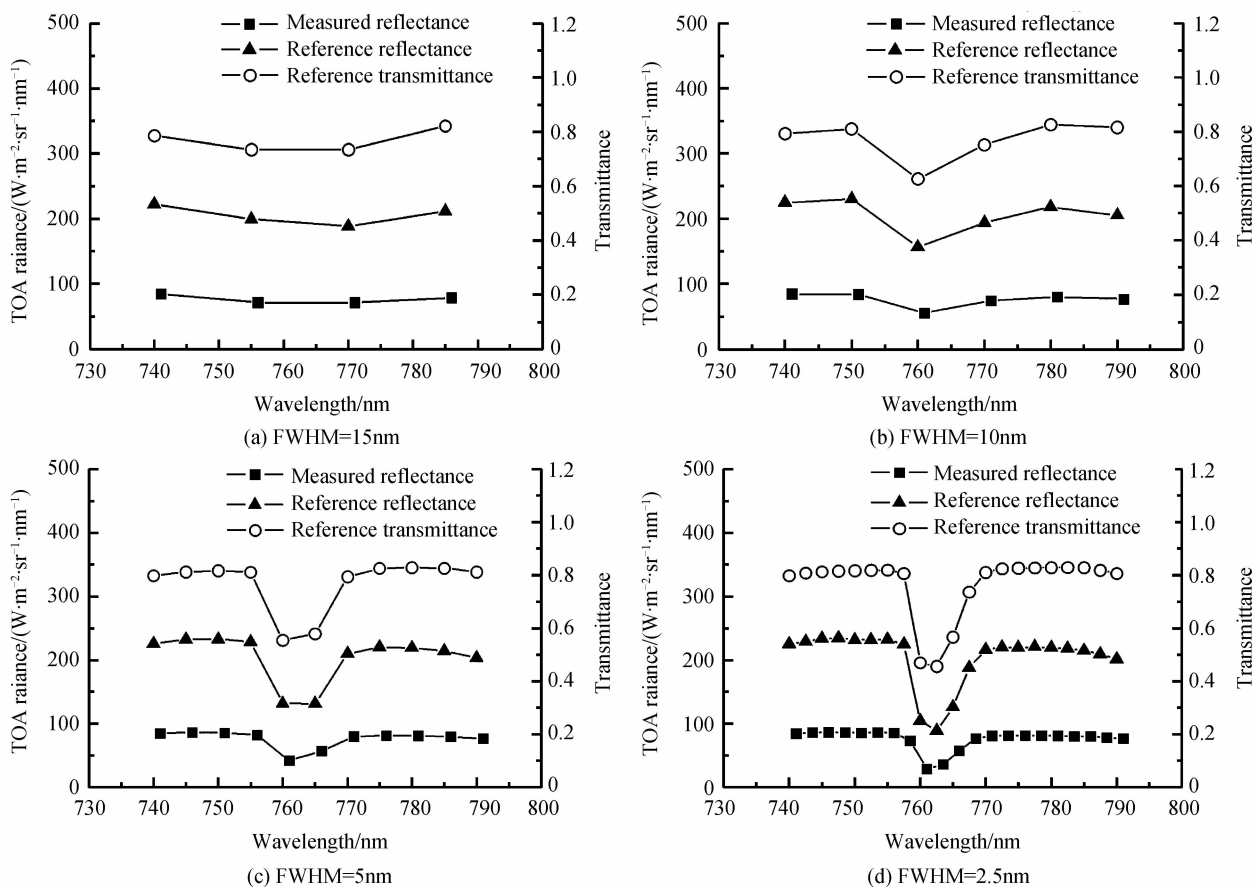


图3 不同光谱分辨率下的表观辐亮度与大气透过率

Fig. 3 Apparent radiance and atmospheric transmittance with different band widths

等效测量光谱由测量光谱曲线同通道光谱响应函数光谱卷积得到. 等效测量光谱的计算公式为

$$L_m = \frac{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} S(\lambda; \delta) L_m(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} S(\lambda; \delta) d\lambda} \quad (10)$$

式中, $S(\lambda; \delta)$ 是包含光谱偏移量 δ 的高斯型光谱响应函数; $L_m(\lambda)$ 为辐射传输模型模拟得到的测量光谱曲线, 光谱分辨率和光谱响应函数相同; L_m 表示等效测量光谱. 分别对半高宽为 15、10、5、2.5 nm 的高斯型光谱响应函数和测量光谱曲线进行光谱卷积, 得到不同光谱分辨率下的等效测量光谱. 等效参考光谱计算过程类似.

图3给出了不同光谱分辨率下的等效测量表观辐亮度, 等效参考表观辐亮度和等效参考大气透过率. 其中测量光谱的中心波长位置偏移 1nm, 参考光谱采用标称的中心波长和FWHM. 可以看出, 参考表观辐亮度和参考大气透过率的曲线形状非常接近. 但当波长位置发生偏移时, 测量辐亮度和参考辐亮度的曲线形状有明显的差异. 因此, 可通过光谱匹配技术进行波长位置的反演.

图4给出了不同光谱分辨率下测量表观反射率、参考表观反射率和参考大气透过率曲线. 同图3结果类似, 参考表观反射率和参考大气透过率具有类似的

光谱曲线形状; 而当光谱位置发生偏移时, 测量表观反射率和参考表观反射率的曲线形状有明显的差异.

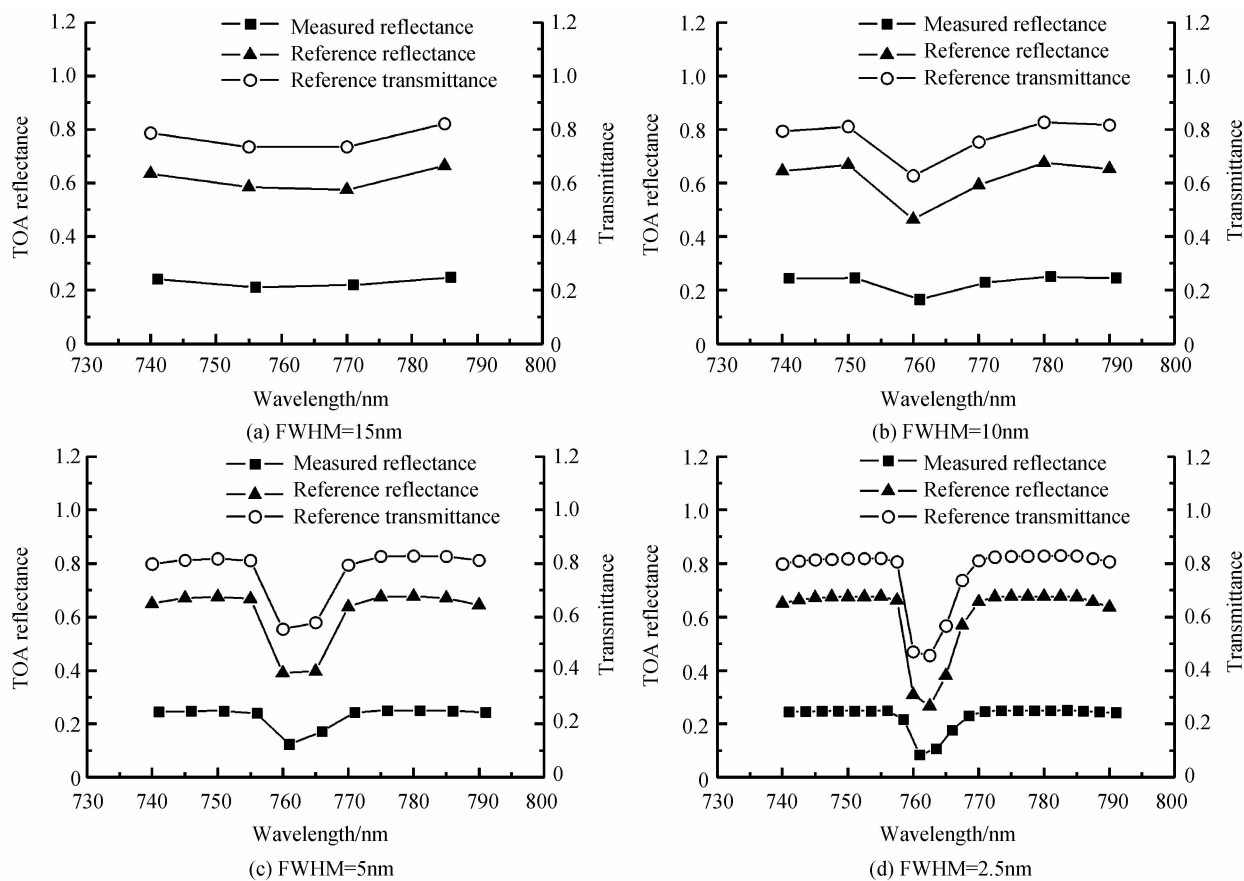


图4 不同光谱分辨率下的表观反射率与大气透过率

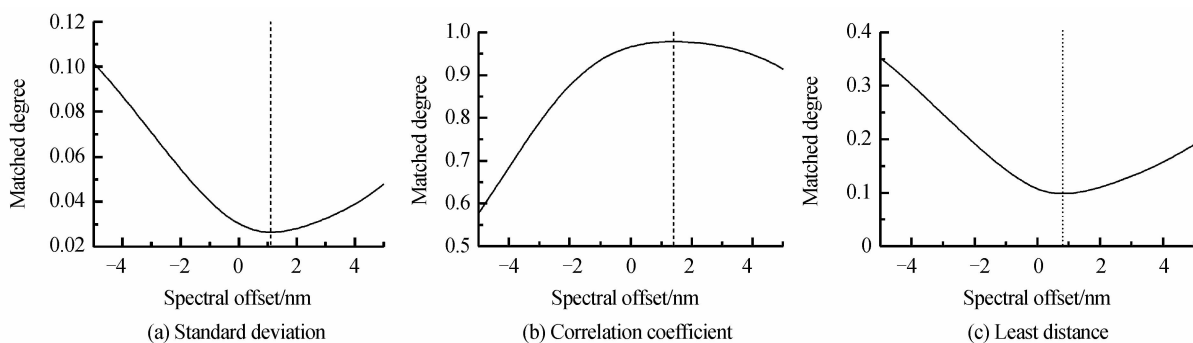
Fig. 4 Apparent reflectance and atmospheric transmittance with different band widths

3.2 光谱匹配计算

以 10 nm 光谱分辨率的高光谱传感器为例, 计算标准偏差法、相关系数法、最小距离法、极值法、光谱夹角法和协方差法等六种光谱匹配算法的光谱定标结果. 采用的光谱匹配类型为测量表观辐亮度与参考表观辐亮度. 其中参考光谱的光谱偏移量为 -5 nm 到 5 nm, 步长 0.1 nm.

辐亮度的实际偏移量为 1 nm. 图 5 中的直线表示不同光谱评价指标随光谱偏移量的变化趋势, 图中的虚线为反演的光谱偏移量. 其中, 标准偏差法、光谱夹角法的反演光谱偏移量为 1 nm, 相关系数法、极值法和最小距离法的反演偏移量为 1.1 nm, 协方差法反演结果为 2.3 nm. 结果表明, 除协方差外, 其他方法都能精确地反演出光谱偏移量, 反演误差小于 0.1 nm.

图 5 给出了六种光谱匹配算法的定标结果. 测量



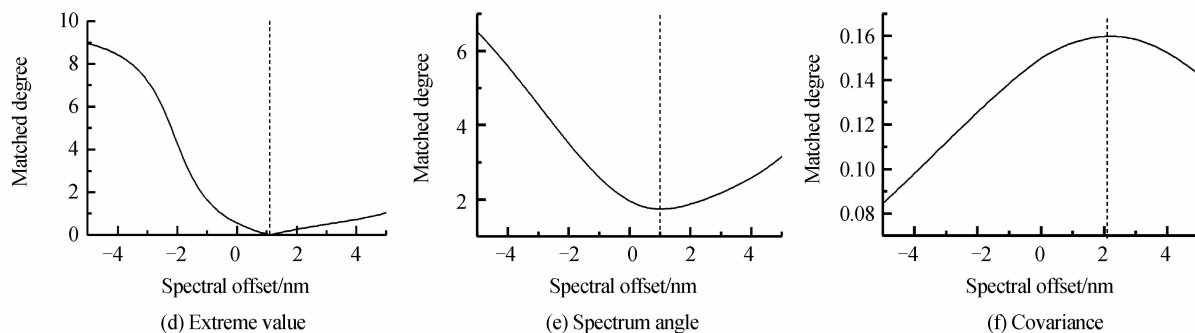


图 5 六种光谱匹配算法光谱定标结果

Fig. 5 Spectral calibration result with six spectral matching indexes

3.3 光谱定标精度分析

将测量光谱偏移量设为 1 nm 和 4 nm,计算不同光谱偏移量下的反演结果.分别采用四种光谱匹配类型和六种光谱匹配算法,对不同光谱分辨率的传感器模型进行在轨光谱定标,反演结果见表 3.从中可得出:

1) 六种光谱匹配算法中,协方差法效果最差,其他匹配算法结果较为一致.

2) 四种光谱匹配类型中,类型 1 和类型 3 的定标精度较高,类型 2 和类型 4 的精度较低.

3) 光谱定标精度随传感器光谱分辨率的提高而增加.

表 3 不同光谱分辨率高光谱传感器光谱定标结果

Table 3 Spectral calibration result of hyperspectral sensor with different FWHMs

FWHM/nm	Spectral matching index	Offset/nm	SD/nm	CC/nm	LD/nm	EV/nm	SA/nm	CO/nm
15	Match Style 1	1	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1	4
		4	-0.1	-0.2	0	-0.2	0	1
	Match Style 2	1	-0.4	-0.4	-0.7	-0.8	-0.3	4
		4	0.3	0.1	-0.1	-2	0.5	1
	Match Style 3	1	0.1	0.1	0.1	0	0.1	4
		4	-0.1	-0.3	-0.2	-0.3	-0.1	1
	Match Style 4	1	0.2	-0.1	0.1	-0.3	0.2	4
		4	1	-0.2	1	-0.8	1	1
10	Match Style 1	1	0	0.1	0.1	0.1	0	1.3
		4	0.1	0.1	0.1	0	0.2	-1.2
	Match Style 2	1	0.3	-0.2	0.2	-0.8	0.4	1.2
		4	-1.2	-1	-1.6	-1.2	-1.2	-1.3
	Match Style 3	1	0	0	0	0.1	0	1.5
		4	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	-1
	Match Style 4	1	0.7	-0.1	0.6	-0.2	0.7	1.3
		4	-0.8	-0.2	-1	-0.2	-0.9	-1.2
5	Match Style 1	1	0	-0.10	0	0	0	0.2
		4	0	0	0	0	0	-0.1
	Match Style 2	1	-0.1	-0.2	-0.1	-0.2	-0.1	0.1
		4	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.4
	Match Style 3	1	0	0.1	0.1	0	0	0.3
		4	0	0	0	0	0	-0.1
	Match Style 4	1	0	-0.1	0	-0.1	0	0.2
		4		-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2
2.5	Match Style 1	1	0	0	0	0	0	-0.2
		4	0	0	0	0	0	-0.5
	Match Style 2	1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.2	-0.3
		4	-0.3	-0.1	-0.3	-0.1	-0.3	-0.6
	Match Style 3	1	0	0	0	0	0	-0.2
		4	0	0	0	0	0	-0.5
	Match Style 4	1	-0.2	-0.1	-0.2	-0.4	-0.2	-0.3
		4	-0.2	-0.1	-0.2	-0.3	-0.2	-0.6

表 4 为不同光谱匹配算法的平均光谱定标精度.结果表明,相关系数法精度最高,平均光谱定标精度为 0.141 nm;之后分别为标准差法、光谱夹角法、最小距

离法、极值法;协方差法定标精度最差,平均误差高达 1.088 nm.因此,在进行光谱定标计算时,建议采用相关系数法作为光谱匹配算法.

表4 不同光谱匹配算法的平均光谱定标精度/(nm)
Table 4 Spectral calibration accuracy of different spectral matching techniques/(nm)

FWHM	Offset	SD	CC	LD	EV	SA	CO
15	1	0.2	0.175	0.3	0.3	0.175	4
	4	0.375	0.2	0.325	0.825	0.4	1
10	1	0.25	0.1	0.25	0.3	0.275	1.325
	4	0.575	0.35	0.725	0.375	0.625	1.175
5	1	0.025	0.1	0.05	0.075	0.025	0.2
	4	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.2
2.5	1	1	0.1	0.075	0.1	0.175	0.1
	4	1	0.125	0.05	0.125	0.1	0.125
Average		0.216	0.141	0.241	0.278	0.225	1.088

表5为四种光谱匹配类型的平均光谱定标精度,由于协方差法精度最低,在计算平均定标误差时只计算前五种匹配算法.结果表明,光谱匹配类型1的光谱定标精度最高,平均误差为0.05 nm;之后为光谱匹配类型3,平均误差为0.063 nm;类型4和类型2的误差较大,分别为0.328 nm和0.440 nm.因此,在进行光谱定标时,建议采用光谱匹配类型1,即测量表观辐亮度和参考表观辐亮度作为光谱匹配类型.

表5 不同光谱匹配类型的平均光谱定标精度/(nm)
Table 5 Average spectral calibration accuracy of different spectral matching style/(nm)

FWHM	Offset	Match Style1	Match Style 2	Match Style 3	Match Style 4
15	1	0.14	0.52	0.08	0.18
	4	0.1	0.6	0.2	0.8
10	1	0.06	0.38	0.02	0.46
	4	0.1	1.24	0.16	0.62
5	1	0	0.14	0.04	0.04
	4	0	0.2	0	0.1
2.5	1	0	0.22	0	0.22
	4	0	0.22	0	0.2
Average		0.050	0.440	0.063	0.328

3 结论

本文针对760 nm附近的氧气吸收通道,开展不同光谱分辨率传感器的光谱定标机理研究.分析了400~1 000 nm氧气吸收峰的位置,构建了15、10、5和2.5 nm光谱分辨率的高光谱传感器模型.提出四种光谱匹配类型和六种光谱匹配算法,通过辐射传输模拟,计算出各种方法的光谱定标精度.结果表明,光谱匹配算法中,相关系数法光谱定标精度最高,协方差法定标精度最低.四种光谱匹配类型中,测量表观辐亮度和参考表观辐亮度的光谱定标精度最高.

参考文献

- [1] CUDAHY T J, HEWSON R, HUNTINGTON J F, *et al.* The performance of the satellite-borne Hyperion hyperspectral VNIR-SWIR imaging system for mineral mapping at Mount Fitton, South Australia[C]. IGARSS, 2001, 1: 314-316.
- [2] ZHANG Bing, SHEN Qiqn, LI Jun-sheng, *et al.* Retrieval of three kinds of representative water quality parameters of Lake

Taihu from hyperspectral remote sensing data[J]. *Journal of Lake Science*, 2009, 21(2): 182-192.

- 张兵,申茜,李俊生,等.太湖水体3种典型水质参量的高光谱遥感反演[J].湖泊科学,2009,21(2):182-192.
- [3] DATT B, MCVICAR T R, VAN NIEL T G, *et al.* Preprocessing EO1 Hyperion hyperspectral data to support the application of agricultural indexes[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(6): 1246-1259.
- [4] GAO Jing, JI Zhong-ying, WANG Zhong-hou, *et al.* On-board calibration system of spatially modulated Fourier transform spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(5): 902-906.
- 高静,计忠瑛,王忠厚,等.空间调制干涉光谱成像仪的星上定标系统[J].光子学报,2010,39(5):902-906.
- [5] JARECKE P, YOKOYAMA K, BARRY P. On-orbit Solar Radiometric Calibration of the Hyperion Instrument [C]. SPIE, 2002, 4480: 225-230.
- [6] KIEFFER H H, JARECKE P, PEARLMAN J. Initial lunar calibration observations by the EO-1 Hyperion imaging spectrometer[C]. SPIE, 2002, 4480: 247-258.
- [7] GREEN R O, PAVRI B E, CHRIEN T G. 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.
- [8] GAO Hai-liang, GU Xing-fa, YU Tao, *et al.* Radiometric calibration for HJ-1A Hyperspectrum Imager and uncertainty analysis[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(11): 2826-2833.
- 高海亮,顾行发,余涛,等.超光谱成像仪在轨辐射定标及不确定性分析[J].光子学报,2009,38(11):2826-2833.
- [9] GAO Jing, JI Zhong-ying, CUI Yan *et al.* Wavelength calibration of spatially modulated imaging Fourier transform spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(11): 2853-2856.
- 高静,计忠瑛,崔燕,等.空间调制干涉光谱成像仪光谱定标技术研究[J].光子学报,2009,38(11):2853-2856.
- [10] BARRY P, SHEPANSKI J, SEGAL C. Hyperion on-orbit validation of spectral calibration using atmospheric lines and an on-board system[C]. SPIE, 2002.
- [11] 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.
- [12] GUANTER L, RICHTER R, MORENO J. Spectral calibration of hyperspectral imagery using atmospheric absorption features [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(10): 2360-2370.
- [13] RODGER S. A new method of in-scene atmospheric water vapor estimation and post-flight spectral recalibration for hyperspectral sensors Application to the HyMap sensor at two locations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115: 536-547.
- [14] CHANG Y S, SHAW J H. A nonlinear least squares method of determining line intensities and half-widths[J]. *Applied Spectroscopy*, 1997, 31: 213-220.
- [15] GAO B C, GOETZ A F H. Column atmospheric water vapor and vegetation liquid water retrievals from airborne imaging spectrometer data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95: 3549-3564.
- [16] GAO B C. Spectral calibrations of HICO data using atmospheric bands and radiance adjustment based on HICO and MODIS data comparisons[C]. IGARSS, 2010.
- [17] 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.