

基于辐亮度匹配的无人机载成像 光谱仪外场光谱定标研究

晏磊^{1,2}, 勾志阳^{1,2*}, 赵红颖^{1,2}, 陈伟^{1,2}, 尹中义^{1,2}, 段依妮^{1,2}

(1. 北京大学 地球与空间科学学院 遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871;

2. 北京大学 空间信息集成与 3S 工程应用北京市重点实验室, 北京 100871)

摘要:针对可见光与近红外波段无人机载成像光谱仪,在保证精度的前提下,提出了一种快速优化二维反演算法,利用大气吸收特征作为参照,采用辐亮度匹配的方法,在不需要测量地面反射率数据的情况下,反演了成像光谱仪的重要光谱参数中心波长的偏移量和带宽变化量。利用 2010 年 11 月 14 日于内蒙古乌拉特前旗开展的无人机遥感载荷综合验证场科学实验数据,在实验室光谱定标基础上进行了外场光谱定标。算法时间、成本大大减少,反演效率比常规二维反演算法提高了近 100 倍。通过地面光谱靶标对定标结果进行验证,对带宽为 7 nm 左右的成像光谱仪外场定标精度可达到 0.1 nm,一般优于 0.5 nm。

关键词:无人机;成像光谱仪;辐亮度匹配;光谱定标

中图分类号:TP701 **文献标识码:**A

In-flight spectral calibration of UAV hyperspectral imager based on radiance matching

YAN Lei^{1,2}, GOU Zhi-Yang^{1,2*}, ZHAO Hong-Ying^{1,2}, CHEN Wei^{1,2}, YIN Zhong-Yi^{1,2}, DUAN Yi-Ni^{1,2}

(1. Institute of RS & GIS, School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China

2. Beijing Key Lab of Spatial Information Integration & Its Applications, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: An optimized method was proposed for in-flight spectral calibration of unmaned aerial vehicle (UAV) hyper-spectral imager in visible and near infrared band. Taking simulated radiance as a reference spectrum, the method uses spectrum matching technique to retrieve the most important spectral parameters of center wavelength and bandwidth. With the data in Urad Front Banner, Inner Mongolia on November 14th, 2010, hyper-spectral camera on UAV was calibrated based on the laboratory spectral calibration result. The efficiency of data process was 100 times that of normal algorithm. A method of accuracy evaluation with ground targets was also developed. The in-flight spectral calibration accuracy for a sensor with bandwidth of 7nm was proved to be better than 0.5nm.

Key words: unmaned aerial vehicle (UAV); hyperspectral imager; radiance matching; spectral calibration

PACS: 07. 60. Rd

引言

高光谱遥感影像具有图谱合一的特征,因此受到国内外学者的很大关注,并有了快速发展,被广泛地应用于地学、农业、军事等多个领域^[1-4]。由于仪器在飞行前需要经过运输、安装和调试以及

飞行中所受的大气条件影响,仪器的光谱参数会发生相应的变化。光谱定标的误差直接影响各个波段辐射测量的精度,降低了地物反演的准确度,尤其是在大气吸收峰附近。近几年来随着高光谱数据应用的不断深入和定量化遥感对光谱仪光谱指标要求的提高,有很多学者和机构对于飞行中

收稿日期:2011-09-28,修回日期:2012-03-09

Received date: 2011-09-28, revised date: 2012-03-09

基金项目:国家高技术研究发展计划项目(2008AA121806)

Foundation items: Supported by the National High Technology Research and Development Program of China (2008AA121806)

作者简介(Biography):晏磊(××××-),男,湖北武汉人,博士,教授,主要从事遥感研究。E-mail: liyan@pku.edu.cn.

*通讯作者(Corresponding author):E-mail: gouzhiyang@163.com.

的光谱定标也进行了深入研究. Barry 等提出了利用大气吸收线和星上参考漫反射板分别与参考数据比较进而得到每个像元中心波长的定标方法^[5]; Guanter 等利用大气吸收特征进行高光谱成像仪光谱通道中心波长偏移量检测^[6]; Harry 等利用光谱辐射计测量特殊材料的玻璃检测波段中心波长位置的漂移及特殊波段光谱响应的变化对 MODIS 进行在轨定标^[7]; Gao 等利用光谱匹配的方法分析高光谱成像仪获得的表观反射率与 MODTRAN 计算的参考光谱之间的差异进行在轨中心波长定标^[8-9]; Robert 等利用反射率反演的方法对星载高光谱传感器光谱通道中心波长和带宽进行了定标^[10]; Green 等利用同步飞行的 AVIRIS 和地面测量对 EO-1 Hyperion 进行了在轨光谱和辐射定标^[11]; 王天星等在前人基础上, 综合优化算法, 对 Hyperion 实现了在不需实测地表反射率的情况下, 同时反演光谱传感器中心波长与带宽^[12].

目前大部分外场光谱定标方法都只是在假设带宽不变的前提下反演光谱通道中心波长的偏移量. 一些算法能够同时反演中心波长偏移量和带宽变化量, 但操作难度大和计算复杂度高. 本文在前人研究基础上, 以无人机载成像光谱仪为研究对象, 在保证精度的前提下提出了一种快速反演算法, 通过飞行实验获得了中心波长和带宽, 并利用地面铺设的多种光谱靶标对定标精度进行了量化评价, 对无人机高光谱遥感数据定量化应用具有重要意义.

1 研究方法

在可见光-近红外波段, 地球本身的辐射可以忽略, 所以只用考虑太阳光的辐射传输. 假定地面为均匀的朗伯体, 遥感器接受的入瞳辐亮度可以表达为:

$$L_s = L_g T(\theta_v) + L_{d\uparrow}, \quad (1)$$

其中, L_g 为地面出射辐亮度, $L_{d\uparrow}$ 为程辐射, $T(\theta_v)$ 为观测方向的大气辐射总透射率.

由于可见光与近红外波段程辐射变化平稳, 无明显峰值, 则 $T(\theta_v)$ 与 L_g 共同作用, 使得传感器入瞳处的表观辐亮度在大气气体吸收波段表现出很明显的吸收特征. 由于传感器测得的 DN 值很容易转换为辐亮度, 可以直接通过辐射传输模型计算辐亮度与传感器获取数据进行对比分析. 利用给定的地表反射率、地理位置、地面海拔、拍摄高度、成像时间、气溶胶光学厚度和水汽含量等参数, 通过 MODTRAN 计算得到式(1)中的传感器入瞳处辐亮

度. 为了得到更为精确和精细的参考光谱, 气体吸收廓线由 HITRAN 数据库逐线积分得到. MODTRAN 输出的高分辨参考光谱通过与待定标传感器的光谱响应函数进行卷积, 然后与成像仪获取的光谱数据进行对比分析.

利用辐亮度进行光谱参数反演的理论模型定义为:

$$L'_{i,j} = \mu \int L_{i,j}(\lambda) f_{i,j}(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

其中, L 代表入瞳处辐亮度, 下标 i, j 分别表示第 j 成像位置的第 i 光谱通道, 上标 t 和 r 分别表示成像光谱仪实测数据和理论参考数据. μ 为归一化因子. λ 为波长. $f_{i,j}(\lambda)$ 为成像光谱仪的光谱响应函数, 采用式(3)的高斯函数表征.

$$f_{i,j}(\lambda) = \exp\left[-\left(\frac{\lambda - (\lambda_c(i,j) + \Delta\lambda)}{(\text{FWHM}_{i,j} + \Delta\text{FWHM})/2 \sqrt{\ln 2}}\right)^2\right], \quad (3)$$

式中 $\lambda_c(i, j)$ 表示实验室定标结果给定的初始中心波长, FWHM (Full Width Half Maximum) 为带宽, $\Delta\lambda$ 为中心波长偏移量, ΔFWHM 为带宽变化量.

式(2)的右边为卷积到传感器光谱分辨率之后的参考辐亮度光谱, 用 $L'_{i,j}$ 表示. 计算 $\Delta\lambda$ 和 ΔFWHM 的二维代价函数表示为:

$$\Delta^2(\Delta\lambda, \Delta\text{FWHM}) = \sum_{i=n_1}^{n_2} [L'_{i,j}(\Delta\lambda, \Delta\text{FWHM}) - L'_{i,j}]^2, \quad (4)$$

式中, n_1 和 n_2 分别为所选特征吸收谱段区间的边界. 对二元函数 Δ^2 搜索求最小值解 $\Delta\lambda$ 和 ΔFWHM .

根据光栅型色散原理及实验定标分析, 成像光谱仪色散较好地符合线性规律, 中心波长偏移不影响色散关系, 而仅仅产生常数的波长飘移, 因此相同空间位置的各个光谱通道波长偏移量是一样的, 在某一个波长位置检测出了偏移量即可对所有光谱通道的中心波长进行校正.

高光谱载荷光谱性能参数受到中心波长和带宽二者变化的综合影响. 二维代价函数能充分体现这种综合效应, 但时间成本非常高. 处理时间的过长对于算法的改进和精度的提高以及成果的时效性造成很大的影响. 因此需要对光谱参数反演的算法进行优化和改进. 对中心波长和带宽在光谱参数反演过程中相互影响的研究发现, 中心波长的变化对带宽的反演结果影响非常大, 而带宽的偏差对中心波长的反演结果影响相对较小, 尤其是在偏差 0.5 nm 以内的影响非常小.

基于以上分析结果, 对二维代价函数反演光谱参数的算法进行了优化. 首先, 在成像光谱仪数据的空间方向上进行等间距稀疏抽样, 利用抽样数据通

过式(4)同时反演 $\Delta\lambda$ 和 $\Delta FWHM$. 然后将反演结果中的带宽分布情况在空间方向全视场内进行三次多项式拟合,再将拟合的结果作为带宽输入值进行中心波长反演. 中心波长反演过程与二维反演算法近似,不同之处只是将拟合的带宽结果作为已知量,减少了一维的计算. 最后将定标后的中心波长作为已知量进行带宽的反演. 带宽的反演同样只需要在带宽维搜索最小值求解. 优化后的反演算法既考虑中心波长偏移和带宽变化对载荷光谱性能的综合影响,又提高了计算效率.

2 定标数据获取

2.1 高光谱影像数据获取

实验中使用的成像光谱仪为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制,推扫式面阵传感器,谱段范围为 396 ~ 1030 nm,实验室定标平均带宽约为 6 nm,工作频率 50 ~ 100 Hz,光谱通道数为 128,空间方向像素数为 1024,总视场 11.5°.

2010 年 11 月 14 日在内蒙古巴彦淖尔市进行了无人机光学载荷定标飞行实验,飞行高度为 3500 m,地面海拔为 1000 m,工作频率为 100 Hz. 图 1 为无人机成像光谱仪获取的高光谱数据真彩色合成影像. 图中红、黄、绿、蓝四块 15 m × 15 m 的彩色靶标为高光谱定标验证靶标,编号分别为 H01、H02、H03、H04.

2.2 同步大气参数获取

无人机搭载成像光谱仪飞越定标场地上空时,同步测量了定标场地的光学靶标反射率,并获取空中、地面及大气环境数据. 利用 MicrotopII 太阳光度计连续监测太阳光谱信息和地球辐射收支信息,并监测空气能见度和气溶胶的类型,粒径组成和气溶胶光学厚度. 利用当地气象台的探空气球监测了定标场大气温度、湿度、气压等各类大气参数.

2.3 参考表观辐亮度计算

将地面测量的大气参数、地物光谱反射率以及气象、时间、几何等参数带入 MODTRAN 计成像光谱仪入瞳处超精细光谱辐亮度作为光谱定标的参照标准,其中气体吸收廓线由 HITRAN 数据库逐线积分得到. 输入的参数如表 1 所示. 计算得到的超精细光谱辐亮度如图 2 所示.

3 结果与分析

通过对光谱定标场统计数据进行分析发现,光谱辐亮度曲线明显的吸收特征主要是 760 nm 附近

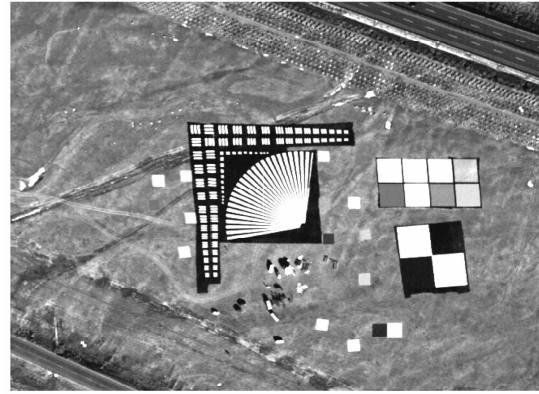


图 1 靶标区高光谱真彩色合成影像

Fig. 1 True color synthetic image from hyperspectral data of test site

表 1 MODTRAN 计算的主要输入参数

Table 1 Main parameters for MODTRAN

输入参数名称	参数值
大气模式	中纬度冬季
大气路径类型	斜程(Slant Path)
运行模式	计算辐亮度
CO ₂ 含量	390 ppm
海拔高度	1.03 km
传感器高度	3.54 km
传感器观测角度	180°(垂直向下)
地表反射率	Dead grass
气溶胶模式	乡村 VIS = 23 km
波长范围	300 ~ 1100 nm
光谱采样间隔	1 cm ⁻¹
FWHM	1 cm ⁻¹
目标区经度	108.856°
目标区纬度	40.635°
时间(GMT)	2.65 h

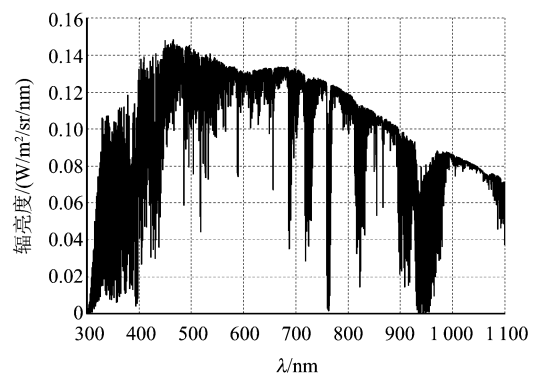


图 2 辐射传输计算的超精细光谱辐亮度

Fig. 2 Simulated precise spectrum

的氧吸收线以及 940 nm 附近的水汽吸收线,而水汽吸收线受温度、压强的变化影响比较明显,其光谱特征比较分散. 760 nm 氧吸收线受温度压强的影响较

小,因此,光谱定标计算选取 760 nm 附近的氧气吸收线做为标准参照光谱. 在 2010 年 1 月实验室光谱定标结果基础上进行了无人机成像光谱仪的外场光谱定标.

在高光谱影像上选择 10 行穿轨方向上的数据进行反演,对反演结果求平均得到信噪比较高的定标参数. 光谱匹配时,搜索区间设为-5 nm 到 5 nm,步长设置为 0.1 nm. 计算得到空间方向各像元中心波长的偏移和带宽如图 3 和图 4 所示. 由于噪声的影响,中心波长偏移量和带宽计算结果存在波动. 为了消除空间像元响应不同引起的条带对检测的影响,可对定标结果进行三次多项式拟合.

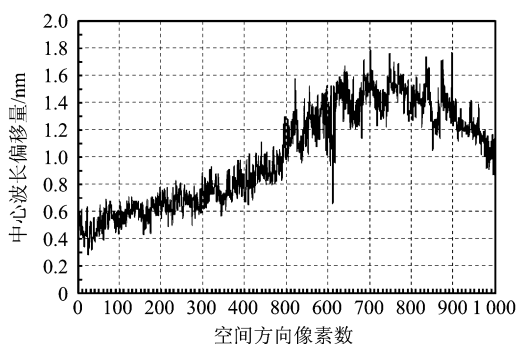


图 3 第 75 波段光谱偏移量随空间方向的变化
Fig. 3 Center wavelength shifts of band 75 in cross-track direction

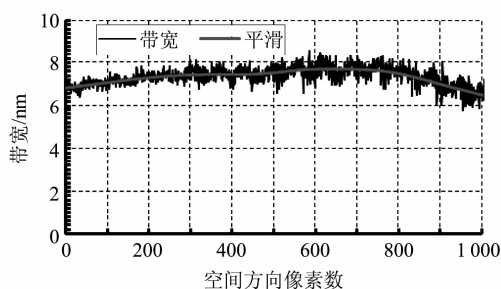


图 4 反演带宽在空间方向上的分布情况
Fig. 4 Band width of band 75 in cross-track direction

光谱定标结果显示,飞行中成像光谱仪各通道的中心波长发生了偏移,所有空间像元中心波长都比实验室光谱定标值偏大. 光谱通道的带宽在 7 nm 左右.

定标过程中对常规算法和优化算法的计算时间做了比较. 在高光谱影像数据上选择 10 行穿轨方向数据(1024 × 10 个像元,每个像元有 128 个波段)利用优化算法进行计算,对其中一行数据在空间方向

上进行等间距稀疏抽样得到 102 个像素数据作为常规算法计算的样本. 程序用 MATLAB 语言编写. 测试程序的计算机参数为: Inter(R) Core(TM)2 Duo CPU E7500, 2.93 GHz, 2.93 GHz; 1.98 GB 内存; Windows XP 操作系统. 测试的结果如表 2 所示. 根据算法优化原理和本文中搜索区间及步长的设置,由于减少了一维运算,反演效率理论上可以提高 100 倍. 由表 2 可以看出,优化后的反演效率实际提高了 94 倍. 利用常规反演算法计算同样的数据量需要约 1500 h,时间成本过高. 优化后的算法大大提高了反演效率.

表 2 反演效率比较

Table 2 Comparison of efficiency

	常规算法	优化算法
计算数据量/像素	102	10240
计算时间/h	15	16

为了评价外场光谱定标的准确性,采用地面反射率反演的方法对定标精度进行量化评价. 利用外场光谱定标前后的光谱参数反演得到光谱刃边靶标 H01、H02、H03、H04 的反射率以及地面实测光谱分别如图 5 ~ 图 8 所示. 由于光谱定标之前无法准确计算场地绝对辐射定标系数,利用实验室辐射定标系数计算的反射率曲线与实测反射率在数值上存在一定差异,但不影响对吸收波段的刻画. 本次定标在深秋近冬季且纬度较高地区,植被已基本干枯,地面测量的光谱反射率在 760 nm 附近比较平滑,未见陡峰. 从图 5 ~ 图 8 中可以看出,利用外场光谱定标前的光谱参数反演的四块靶标反射率曲线在 760 nm 附近都产生了明显的凸起和凹陷,而利用外场定标后的光谱参数计算得到的反射率曲线在该吸收波段比较平滑.

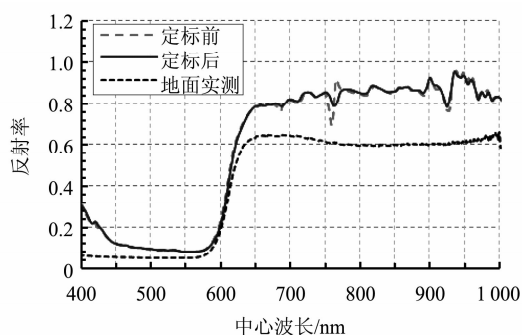


图 5 红色靶标(H01)反射率
Fig. 5 Reflectance of the red target H01

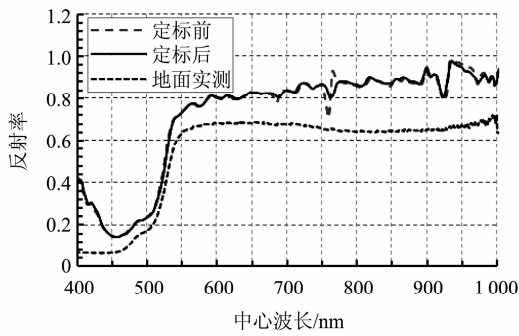


图6 黄色靶标(H02)反射率
Fig.6 Reflectance of the yellow target H02

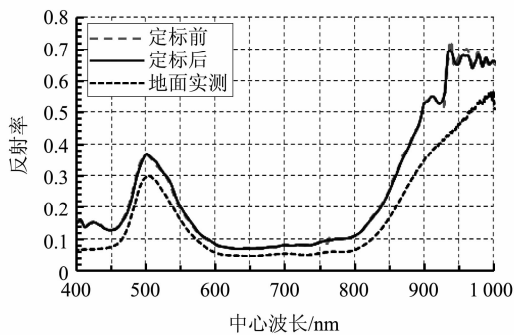


图7 绿色靶标(H03)反射率
Fig.7 Reflectance of the green target H03

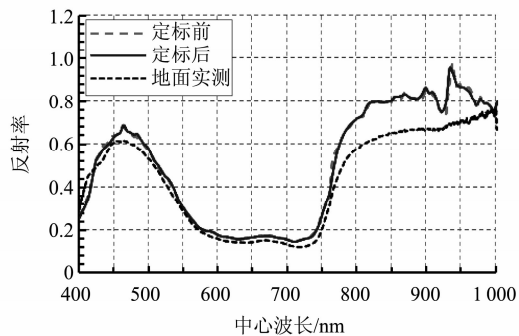


图8 蓝色靶标(H04)反射率
Fig.8 Reflectance of the blue target H01

对基于外场定标后的光谱参数反演的反射率曲线做平滑处理,得到的平滑反射率曲线作为理想值对反射率反演结果进行精度评价.评价结果显示,以外场定标前的光谱参数反演的反射率在氧吸收波段附近最大误差为13%~18%,而基于外场光谱定标参数反演的反射率在氧吸收波段的最大误差为1.1%~4.8%.图9和图10分别为外场定标后反演反射率误差最大的H04靶标和误差最小的H03

靶标.图中红色虚线为基于外场定标前光谱参数反演反射率的误差,黑色实线为基于外场定标参数反演反射率的误差.对光谱参数变化量与反射率反演误差之间关系的研究发现,反演反射率误差随着光谱参数变化量的增大而接近于线性增大.对于5~7 nm带宽的高光谱传感器,0.5 nm的光谱参数变化量在760 nm氧吸收带附近会产生近5%的反演反射率误差.参照误差分析结果,基于辐亮度匹配的无人机载成像光谱仪外场光谱定标的精度可以达到0.1 nm,一般优于0.5 nm.

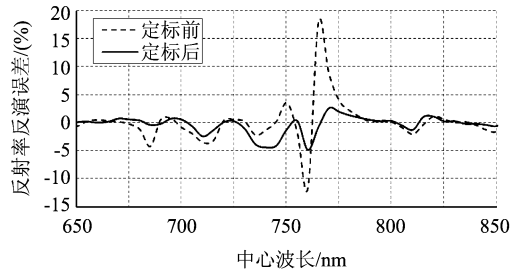


图9 蓝色靶标(H04)氧吸收波段反演反射率误差
Fig.9 Errors in reflectance inversion of the blue target H04

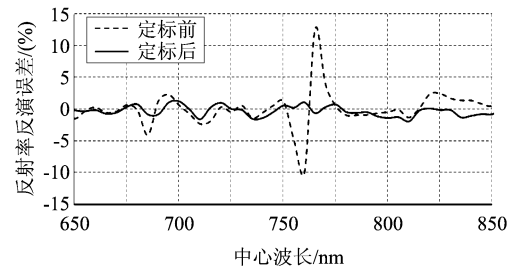


图10 红色靶标(H03)氧吸收波段反演反射率误差
Fig.10 Errors in reflectance inversion of the green target H03

4 结论

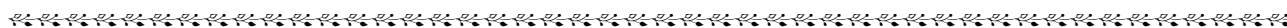
采用基于大气吸收线的光谱辐亮度匹配方法对无人机载成像光谱仪进行了外场光谱定标.通过研究定标过程中光谱参数之间的相互作用,提出了优化的光谱参数反演方法.飞行实验光谱定标结果显示,成像光谱仪各通道的中心波长发生了偏移,所有空间像元中心波长都比实验室光谱定标值偏大.带宽在7 nm左右,比实验室定标结果大1 nm.

定标过程中对常规算法和优化算法的计算时间做了比较.优化算法的反演效率比常规算法反演效率提高了94倍,接近于100倍的理论值.

通过反演地物、光谱靶标反射率对定标精度进行了定量评价,对于带宽 7 nm 左右的无人机载成像光谱仪外场光谱定标的精度可以达到 0.1 nm,一般优于 0.5 nm.

REFERENCES

- [1] Davis C O, Bowles J, Leathers R A, *et al.* Ocean PHILLS hyperspectral imager: design, characterization, and calibration[J]. *Optics Express*, 2002, **10**(4): 210 – 221.
- [2] Gu Y F, Wang C, Wang S Z, *et al.* Kernel-based regularized-angle spectral matching for target detection in hyperspectral imagery[J]. *Pattern Recognition Letters*. 2011, **32**(2): 114 – 119.
- [3] Tiwari K C, Arora M K, Singh D. An assessment of independent component analysis for detection of military targets from hyperspectral images[J]. *Original Research Article International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2011, **13**(5): 730 – 740.
- [4] Zhang L F, Yan L, Yang S W. Narrowband vegetation index performance using the AVIRIS hyperspectral remotely sensed data[J]. *Proc. SPIE*, 2006. 6419: 64190M1 – M7.
- [5] Barry P S, Shepanski J, Segal C. Hyperion on-orbit validation of spectral calibration using atmospheric lines and on-board system[J]. *Proc. SPIE*, 2002, 4480: 231 – 235.
- [6] Guanter L, Richter R, Moreno J. Spectral calibration of hyperspectral imagery using atmospheric absorption featuresp [J]. *Applied Optics*. 2006, **45**(10): 2360 – 2370.
- [7] Montgomery H, Che N Z, Parker K, *et al.* The algorithm for MODIS wavelength on-orbit calibration using the SRCA [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, **38**(2): 877 – 884.
- [8] 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.
- [9] 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**: 424 – 433.
- [10] Nevillea R A, Sun L X, Staenza K. Detection of spectral line curvature in imaging spectrometer data [J]. *Proc. SPIE*. 2003, 5093: 144 – 154.
- [11] 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 Transaction on Geoscience and Remote Sensing*. 2003, **41**(6): 1194 – 1203.
- [12] Wang T X, Yan G J, Ren H Z, *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.



(上接 516 页)

Italy, 2009: 298 – 299.

- [6] Shin Y M, Baig A, Gamzina D *et al.* MEMS fabrication of 0.22 THz sheet beam TWT circuit [C], 2010 *IEEE International Vacuum Electronics Conference*, Monterey, California, USA, 2010: 185 – 186.
- [7] Shin Y M, Barnett L R, Baig A, *et al.* 0.22 THz sheet beam TWT amplifier: system design and analysis [C], 2010 *IEEE International Vacuum Electronics Conference*, Bangalore, India, 2011: 61 – 62.
- [8] Ruan C J, Wang S Z, Han Y, *et al.* Investigation on focus and transport characteristics for the high transmission rate sheet electron beam [J], *Acta Phys. Sin.* (阮存军, 王树忠, 韩莹, 等. 高传输通过率带状电子注聚焦与传输特性的研究, *物理学报*), 2011, **60**(8): 084105 – 1 – 13.
- [9] Zhou J, Bhatt R, Chen C P. Cold-fluid theory of equilibrium and stability of a high-intensity periodically twisted

ellipse-shaped charged-particle beam [J]. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, 2006, **9**(3): 304401 – 1 – 9.

- [10] Nguyen K T, Pasour J A, Antonsen T M, *et al.* Intense sheet electron beam transport in a uniform solenoid magnetic field [J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 2009, **56**(5): 744 – 752.
- [11] Gokhale A, Vyas P, Panikar J, *et al.* Numerical investigation of space charge electric field for a sheet beam electron beam between two conducting planes [J]. *PRAMANA journal of physics*, 2002, **58**(1): 67 – 77.
- [12] ZHANG Xiao-Feng, RUAN Cun-Jun, LUO Ji-Run, *et al.* Beam-wave interaction and simulation program for sheet beam klystron [J], *Acta Phys. Sin.* (张小锋, 阮存军, 罗积润, 等. 带状注速调管注波相互作用及其计算程序的研究, *物理学报*), 2011, **60**(6): 068402 – 1 – 10.