

光谱移位对成像光谱仪辐射测量的影响

冯玉涛^{1,2}, 向阳¹

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2.中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要:棱镜色散成像光谱仪由于光谱弯曲或者装调等原因会使探测器上产生一定的光谱移位, 为了研究光谱移位对系统采集到的光谱辐射能量的影响, 首先给出探测器像元采集辐射能量的表达式。再结合棱镜色散成像光谱仪在短波红外(1.0~2.5 μm)谱段的光谱采样特性, 计算当光谱偏离量为 0.01 d 、0.1 d 和 0.5 d (d 为探测器像元尺寸)时, 系统采集到的辐射能量与没有光谱偏离情况下系统采集到的辐射能量的归一化差值。结果表明:探测器上的光谱偏离导致系统辐射测量精度发生变化, 与没有光谱偏离的情况相比, 系统采集到的光谱辐射能量在大气吸收带的边缘出现了明显的偏差, 且差值随光谱偏离量的增大而增大。当光谱分辨率提高时, 一些较弱的吸收峰附近也会出现明显的辐射能量偏差。光谱分辨率为 10 nm, 对于 0.1 d 的光谱偏离量, 归一化的辐射能量偏差 PV 值达到 0.011; 对于 0.5 d 的光谱偏离量, 归一化的光谱偏离量 PV 值达到 0.04。相对能量偏差达到 50% 以上。实际应用中必须校正由于光谱移位给辐射能量采集带来的偏差, 以满足成像光谱仪光谱辐射测量一致性的要求。

关键词:光谱移位; 短波红外光谱采集; 棱镜色散; 成像光谱仪

中图分类号: TP702; TP721.1 文献标识码: A 文章编号: 1007-2276(2008)06-1083-04

Effects of spectral position offset on radiance measurement of imaging spectrometer

FENG Yu-tao^{1,2}, XIANG Yang¹

(1.State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2.Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Spectral curvature brings the position offset of spectral line on focal plane array detector, which affects the acquired radiant signal by imaging spectrometer with prism dispersion. The expression of acquired signal by detector pixel was given, the normalized error of acquired signal was calculated, and the dispersive spectrum sampling characteristics of imaging spectrometer was combined to calculate the normalized error of acquired signal between with 0.01 d , 0.1 d , 0.05 d offset (d is pixel dimension), and without spectral curvature offset in SWIR (1.0~2.5 μm). The results indicate that spectrum offset of detector results in changed measurement accuracy, compared with no spectral curvature, the scene radiant signal acquired by imaging spectrometer with spectral curvature exhibits distinct error at the edges of atmospherical absorption bands. And the normalized signal errors increase along with the spectral offset. When spectral resolution increases, there is distinct signal errors near some weak atmospherical absorption peaks. When the spectral resolution was 10 nm, for 0.1 d spectral offset, the PV of the normalized error of the measured signal was 0.011; for the 0.5 d spectral offset, the PV of the normalized error of the

收稿日期: 2008-02-10; 修订日期: 2008-04-15

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60538020); 中国科学院创新项目

作者简介: 冯玉涛(1980-), 男, 吉林长春人, 博士生, 主要从事超光谱成像技术、系统性能分析和定标等方面的研究。Email: fytciom@126.com

导师简介: 向阳(1963-), 男, 吉林长春人, 研究员, 博士生导师, 主要从事超光谱成像方法与技术等方面的研究。Email: xiangy@sklao.ac.cn

measured signal was 0.04, the relative error of the measured signal could be above 50%. In the actual application, the radiance error induced by spectral position offset must be adjusted to satisfy the requirement of the consistency of spectral radiance measured by imaging spectrometer.

Key words: Spectral position offset; SWIR spectral acquisition; Prism dispersion; Imaging spectrometer

0 引言

成像光谱仪是一种“谱像合一”的仪器,能够提供景物连续的光谱图像^[1-2]。按照光谱获得方式的不同,成像光谱仪分为色散型^[3-5]和傅里叶变换型^[6-7]两种。棱镜色散成像光谱仪由于光谱弯曲或者装调等原因,会使探测器上产生一定的光谱移位,这使沿穿轨方向的同一行像元的中心波长和光谱响应函数的峰值半宽彼此产生偏差,从而导致系统光谱灵敏度和辐射测量精度的变化^[8]。在研制色散型成像光谱仪的同时,分析和测量光谱偏离及其对系统性能的影响是十分必要的。Curtiss O. Davis 等在对 PHILLS 超光谱成像仪进行实验室光谱定标过程中,利用低压汞灯测量谱线弯曲导致的光谱偏离,测得的偏离量小于一个像元尺寸^[9]。Robert O. Green 研究了光谱偏离对系统辐射测量精度的影响,指出:光谱定标精度控制在 1% 以内,才不会给辐射测量带来明显的偏差^[10]。上述研究分析都是以光栅为色散元件的系统,色散是线性的,光谱采样是均匀的;而以棱镜为色散元件的成像光谱仪,光谱色散有很强的非线性,光谱采样是不均匀的^[8],这会使光谱偏离对采集光谱辐射能量的影响变得更加复杂。文中将采用四点三阶 Lagrange 插值方法对存在光谱偏离时通道采集到的辐射能量进行二次采样,用辐射能量的归一化差值表示辐射测量误差。在短波红外光谱范围(1.0~2.5 μm)内,具体分析探测器上的光谱偏离对成像光谱仪光谱辐射能量采集的影响。

1 理论推导

1.1 系统采集到的光谱辐射能量

在轨观测时,入射到系统入瞳上的地面景物光谱辐射^[10]可表示为:

$$L_s(\lambda) = [E_s(\lambda)\tau_{\text{atm}}(\lambda)\cos\theta + E_D(\lambda)]\tau_{\text{atm}}(\lambda)\frac{\rho(\lambda)}{\pi} \quad (1)$$

式中: $E_s(\lambda)$ 为大气层外太阳光的光谱辐照度; $E_D(\lambda)$ 为半球天空亮度在地面形成的辐照度; θ 为太阳天顶角; $\rho(\lambda)$ 为被观测地面景物的光谱反射率; $\tau_{\text{atm}}(\lambda)$ 为大气光谱透过率。

设成像光谱仪光学系统的透过率为 $\tau_0(\lambda)$, 探测

器积分时间为 T_{int} , 探测器像元采集到的地面景物像元 i 的第 j 个光谱通道的光谱辐射能量^[10]为:

$$\Phi_j = \frac{\pi d^2 T_{\text{int}}}{4(F/\#)^2} \int_{\lambda_{ja}}^{\lambda_{jb}} f(\lambda - \lambda_j) L_s(\lambda) \tau_0(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

式中: d 为探测器像元尺寸; $F/\# = f/D$ 为望远系统的 F 数, f 和 D 分别为望远系统的焦距和孔径; $f(\lambda - \lambda_j)$ 为光谱通道 j 的光谱响应函数^[10], λ_j 为光谱通道 j 的中心波长; λ_{ja} 和 λ_{jb} 分别为光谱通道 j 的起始和截止波长。由于棱镜色散的非线性,系统的光谱采样不均匀,所以,光谱响应函数取为不对称的高斯函数:

$$f(\lambda - \lambda_j) = \begin{cases} \exp(-4\ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_j)^2}{\Delta\lambda_{ja}^2}), & \lambda \leq \lambda_j \\ \exp(-4\ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_j)^2}{\Delta\lambda_{jb}^2}), & \lambda > \lambda_j \end{cases} \quad (3)$$

当存在光谱偏离时,探测器上穿轨方向同一行不同位置的像元 i 对应的通道光谱响应函数和中心波长是不同的。所以,考虑到光谱偏离的影响,探测器像元 (i, j) 采集到的光谱辐射能量应具体改写为:

$$\Phi_{ij} = \frac{\pi d^2 T_{\text{int}}}{4(F/\#)^2} \int_{\lambda_{ja}}^{\lambda_{jb}} f(\lambda - \lambda_{ij}) L_s(\lambda) \tau_0(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

1.2 光谱移位

对于短波红外谱段,色散棱镜采用熔石英制成的单棱镜,在探测器上的线色散可表示为:

$$\frac{dl}{d\lambda} = f'_2 \times \frac{n \sin \alpha}{(n^2 - \sin^2 i_1)^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(\sin \alpha (n^2 - \sin^2 i_1)^{\frac{1}{2}} - \cos \alpha \sin i_1 \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \frac{dn}{d\lambda} \quad (5)$$

式中: i_1 为准直光线入射角; α 和 n 分别为单棱镜的顶角和材料折射率; f'_2 为成像系统的焦距。

由公式(5)可得波长和像元位置的关系式为:

$$\lambda_j = \lambda_0 + \int_{x_0}^{x_j} \frac{d\lambda}{dl} dx \quad (6)$$

式中: x_0 为光谱范围起始波长 λ_0 的位置坐标; x_j 为探

测器像元 j 的位置坐标。

假设探测器沿轨方向列像元 i 上存在光谱偏离量 σ_i 时,则各像元位置 x_{ij} 对应的波长应由公式(6)改写为:

$$\lambda_{ij} = \lambda_0 + \int_{x_0}^{x_j + \sigma_i} \frac{d\lambda}{dl} dx \quad (7)$$

由公式(7)可见,光谱偏离导致穿轨方向上不同位置的像元的中心波长彼此产生偏差,其对应的光谱响应函数的峰值半宽也会产生变化。而且,对于棱镜色散成像光谱仪,不同光谱通道的中心波长的偏离和光谱采样间隔的变化都是不同的^[11-13]。

2 计算分析

假定成像光谱仪在轨观测环境为中纬度夏季标准大气模型、太阳高度角为 30° 、海拔 100 m、地表温度 300 K、地面景物光谱反射率为 0.3、乡村气溶胶、可见度 23 km。在上述观测环境下,模拟 $1.0 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 光谱范围总的地面反射辐射作为入射到系统入瞳上的光谱辐照度,如图 1 所示。

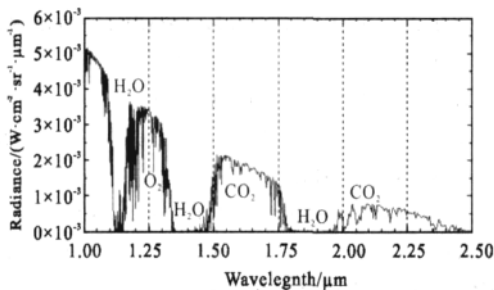


图 1 入射到系统入瞳上的地面景物光谱辐射

Fig.1 Ground scene spectral radiance injecting on the entrance pupil

设成像光谱仪所用单棱镜顶角 $\alpha=60^\circ$ ^[8], 探测器像元尺寸 $d=30 \mu\text{m}$ 。根据公式(5)决定的单棱镜成像光谱仪的色散特性,结合公式(6)和(7)求得没有和存在光谱偏离时各通道的起始和截止波长,再分别带入公式(4)得到对应情况下成像光谱仪采集到的光谱辐射能量。然后,用最大单通道辐射能量值对所得数据进行归一化,再采用四点三次 Lagrange 插值方法对光谱偏离下系统采集到的光谱辐射能量进行二次采样,得到无光谱偏离中心波长对应的辐射能量近似值,用此值与对应的没有光谱偏离情况下通道采集到的辐射能量的差值表示辐射测量产生的偏差。图 2~图 4 为光谱通道数分别为 60、120 和 180 时,对应不同光谱偏离量的归一化辐射能量差值曲线。

当光谱存在 $0.01d$ 、 $0.1d$ 和 $0.5d$ 的偏离量时,相对光谱没有偏离的情况,对应通道的中心波长发生变

化,并且在光谱采样间隔较大的通道,中心波长的变化较大,系统采集到的光谱辐射能量幅值也发生变化,明显的幅值变化主要出现在大气吸收带的边缘附近,并且中心波长和能量幅值的变化随光谱偏离量的增加而增加。由图 2~4 可见:光谱偏离量大的能量差值曲线对偏离量小的能量差值曲线呈现包络状,并且随

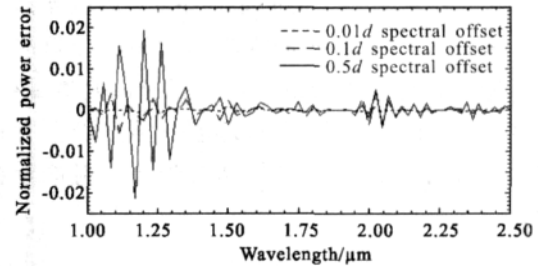


图 2 光谱通道数为 60 时的归一化差值曲线

Fig.2 Normalized error curves as spectral bands are 60

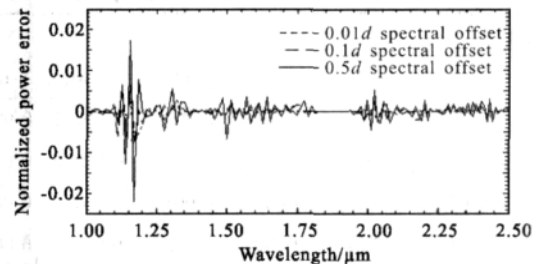


图 3 光谱通道数为 120 时的归一化差值曲线

Fig.3 Normalized error curves as spectral bands are 120

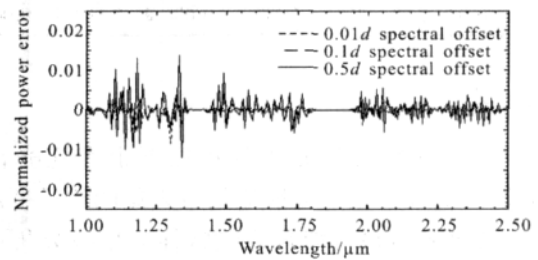


图 4 光谱通道数为 180 时的归一化差值曲线

Fig.4 Normalized error curves as spectral bands are 180

着光谱通道数的增加,包络现象越明显。这说明:(1) 光谱分辨率一定时,当存在光谱偏离,系统采集到的光谱辐射能量出现明显偏差的位置大致相同,主要出现在 H_2O 位于 $1\ 100$ 、 $1\ 400$ 、 $1\ 900 \text{ nm}$ 吸收带(图 1)的边缘附近;(2) 随着光谱偏离量的增加,能量的偏差不断增大;(3) 当系统光谱通道数增加时,光谱分辨率提高,一些弱吸收峰附近也会出现明显的辐射能量偏差。

表 1 列出光谱通道数为 60、120 和 180 时,不同光谱偏离量的归一化差值的 PV 值和 RMS 值,可以看出:当光谱通道数相同时,随着光谱偏离量的增大,归一化辐射能量偏差的 PV 值和 RMS 值都增大,说

明在一定的光谱分辨率条件下,光谱偏离量越大对光谱辐射能量采集的影响越严重,辐射测量精度变化越大。另外,当光谱偏离量相同时,若光谱偏离量小于 $0.3d$,能量差值的 PV 值和 RMS 值随光谱通道数的增加而增大;若光谱偏离量大于 $0.3d$,能量差值的 PV 值和 RMS 值随光谱通道数的增加而减小。这说明:在光谱偏离量一定的条件下,由通道光谱采样间隔的变化量和通道光谱响应函数的积分效应共同决定了归一化能量差值的大小。若光谱偏离量很大,由公式(7)可知:某些通道的光谱采样间隔会有很大变化,从而导致该通道采集到的景物辐射能量亦随之变化。

表 1 不同通道数和偏离量时辐射能量的归一化误差

Tab.1 Normalized error of radiant energy with different spectral bands and spectral offset

Spectral offset	PV			RMS		
	60	120	180	60	120	180
$0.01d$	0.007 9	0.010 6	0.019 7	0.001 2	0.001 4	0.002 0
$0.05d$	0.006 9	0.020 5	0.023 3	0.001 3	0.002 5	0.003 2
$0.1d$	0.010 7	0.022 8	0.026 3	0.001 9	0.002 5	0.003 3
$0.2d$	0.013 1	0.024 9	0.030 3	0.002 5	0.003 3	0.003 9
$0.3d$	0.020 9	0.033 6	0.028 7	0.003 7	0.004 3	0.003 8
$0.4d$	0.030 2	0.040 9	0.027 0	0.004 7	0.004 1	0.003 9
$0.5d$	0.039 2	0.035 7	0.033 5	0.006 2	0.004 1	0.004 4

3 结 论

若棱镜色散成像光谱仪探测器上存在光谱偏离,会给系统采集光谱辐射能量带来影响。通过对短波红外谱段光谱辐射能量采集特性的模拟分析可以看出:探测器上有、无光谱偏离时,通道采集到的光谱辐射能量在大气吸收带边缘出现明显的偏差,随着光谱偏离量的增加,辐射能量的偏差不断增大。当光谱通道数增多时,光谱分辨率提高,一些弱吸收带附近也会出现明显的辐射能量偏差。光谱偏离给辐射能量采集带来的偏差,影响系统的辐射测量精度,虽然通过二次采样可以在一定程度上校正辐射测量的误差,对于光谱偏离较大的色散成像光谱仪,应该对采集到的光谱辐射能量进一步校正,以提高系统的辐射测量精度。

参考文献:

- [1] GOETZ A F H,VANE G,SOLOMON J E,et al.Imaging spectrometry for Earth Remote Sensing [J].*Science*,1985, **228** (4704):1147.
- [2] XU Hong, WANG Xiang -jun.Applications of multispectral/hyperspectral imaging technologies in military[J].*Infrared and Laser Engineering*,2007,**36**(1):14-15.(in Chinese)
- [3] WILLOUGHBY C T,MARMO J,FOLKMAN M A.Hyperspectral imaging payload for the nasa small satellite technology initiative program [C]//*Aerospace Applications Conference,Proceedings of IEEE*,1996, **2**(3-10):67-76.
- [4] DAVIS C O.A spaceborne imaging spectrometer for environmental assessment of the coastal ocean [C]//*Proceedings of SPIE, Infrared Spaceborne Remote Sensing IV*,1996,**2817**:224-230.
- [5] FOLKMAN M A,PEARLMAN J,LIAO L B,et al.EO-1/Hyperion hyperspectral imager design, development, characterization, and calibration[C]//*Proceedings of SPIE,Hyperspectral Remote Sensing of the Land and Atmosphere*,2001,**4151**:40-50.
- [6] OTTEN III L J,SELLAR R G,RAFERT B.MightySat 11.1 Fourier transform hyperspectral imager payload performance[C]//*Proceedings of SPIE,Advanced and Next-Generation Satellites*,1995,**2583**:566-575.
- [7] WU Hang-xing,HUA Jian-wen,WANG Mo-chang.New space-borne remote sensing Fourier transform infrared spectrometer[J].*Infrared and Laser Engineering*,2004,**33**(4):397-398.(in Chinese)
- [8] BLECHINGER F,HARNISCH B,KUNKEL B.Optical concepts for high resolution imaging spectrometers [C]//*Proceedings of SPIE, Imaging Spectrometry*,1995,**2480**:165.
- [9] 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.
- [10] GREEN R O.Spectral calibration requirement for Earth -looking imaging spectrometers in the solar -reflected spectrum [J].*Applied Optics*,1998,**37**(4):683.
- [11] NEVILLE R A,SUNB L,STAENZA K.Detection of spectral line curvature in imaging spectrometer data [C]//*Proceedings of SPIE,Advances in Resist Technology and Processing XX*,2003,**5093**:144.
- [12] MOUROULIS P,MCKERNS M M.Pushbroom imaging spectro - meter with high spectroscopic data fidelity: experimental dem - onstration[J].*Opt Eng*,2000,**39**(3):808-816.
- [13] MOUROULIS P, GREEN R O,CHRIEN T G.Design of pushbroom imaging spectrometers for optimum recovery of spectroscopic and spatial information[J].*Applied Optics*,2000,**39**(13):2210.