

文章编号: 0253-2239(2010)05-1304-04

# 短波红外成像光谱仪的景物辐射采集特性

梁爽<sup>1,2</sup> 安志勇<sup>1</sup> 冯玉涛<sup>2</sup> 于秋水<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022; <sup>2</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要** 为了研究棱镜色散的非线性对短波红外(1.0~2.5 μm)成像光谱仪采集景物辐射能量和信噪比(SNR)的影响,首先推导出系统采集辐射能量和光谱采样计算表达式,并在短波红外光谱范围内进行了计算分析。结果表明,在相同的光谱通道数前提下,与等间隔光谱采样方法相比,单棱镜色散成像光谱仪探测器像元采集到的景物辐射能量,在1.0~1.85 μm光谱范围比较高,在1.85~2.5 μm光谱范围比较低,信噪比具有类似的特点;随着光谱采样通道数的增加,大气的弱吸收特征越来越明显地表现出来。

**关键词** 成像光谱仪;棱镜色散;辐射能量采集;信噪比;短波红外波段

中图分类号 TN214, TH744.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103005.1304

## Scenery Radiation Acquisition Features of Short-Wave Infrared Imaging Spectrometer

Liang Shuang<sup>1,2</sup> An Zhiyong<sup>1</sup> Feng Yutao<sup>2</sup> Yu Qiushui<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

<sup>2</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

**Abstract** In order to study the effect on scenery radiation energy acquisition and signal-to-noise ratio of short-wave infrared (1.0~2.5 μm) imaging spectrometer caused by prism nonlinear dispersion, the expressions of radiation energy collection and spectrum sampling calculation are deduced, which are calculated and analyzed in the range of short-wave infrared spectrum. It is indicated that when the number of spectral channels is same, compared to equal interval spectral sampling method, the scenery radiation energy collected by a single prism dispersive imaging spectrometer detector is relatively higher in the 1.0~1.85 μm range, but it is relatively lower in the 1.85~2.5 μm range, and the signal-to-noise ratio has similar characteristics. The weak absorption feature of atmosphere is more and more clearly apparent, when the number of spectral sampling channels increases.

**Key words** imaging spectrometer; prism dispersion; radiation-energy acquisition; signal-to-noise ratio (SNR); short-wave infrared spectrum

## 1 引 言

成像光谱仪利用狭缝将望远镜和光谱仪有机地结合在一起,因而能够提供景物连续的光谱图像<sup>[1]</sup>。按照获得光谱方式的不同,空间成像光谱仪可分成

两种,即色散型<sup>[2]</sup>和傅里叶变换型<sup>[3]</sup>。目前,色散型成像光谱仪多采用光栅进行分光。随着探测器光谱响应范围的扩大,采用棱镜进行分光的成像光谱仪会越来越多。

收稿日期: 2009-05-20; 收到修改稿日期: 2009-07-17

基金项目: 国家自然科学基金(60538020)资助课题。

作者简介: 梁爽(1974—),男,博士研究生,主要从事精密测控技术与仪器等方面的研究。

E-mail: liangsh-ciomp@hotmail.com

导师简介: 安志勇(1943—),男,教授,博士生导师,主要从事精密测控技术与仪器等方面的研究。

E-mail: an\_zhiyong@126.com

成像光谱仪探测器采集到的景物光谱辐射能量和信噪比(SNR)是评价成像光谱仪性能的重要指标。目前,人们主要研究了计算不同谱段景物光谱辐照度的一般方法<sup>[4]</sup>、环境和大气条件对景物辐射能量传输的影响<sup>[5]</sup>、计算不同类型成像光谱仪信噪比的一般方法<sup>[6,7]</sup>、系统光学参数和电子学噪声对景物辐射能量采集和信噪比的影响等<sup>[5,6,8]</sup>和系统实验室定标方法<sup>[9,10]</sup>。其中,对于色散型成像光谱仪,主要针对的是光栅色散成像光谱仪。众所周知,光栅光谱仪对景物光谱的采样是等间隔的,而棱镜光谱仪对景物光谱的采样则是不等间隔的<sup>[11]</sup>,所以棱镜色散成像光谱仪探测器像元采集到的景物辐射能量以及信噪比都将与均匀光谱采样的情况不同。本文将针对棱镜色散成像光谱仪,在短波红外(1.0~2.5 μm)光谱范围内分析探测器像元采集景物辐射能量和信噪比的特性。

## 2 理论推导

空间色散型成像光谱仪(简称“成像光谱仪”)原理如图 1 所示,望远镜将地面一行像元成像到光谱仪的入射狭缝上,通过入射狭缝的景物光谱辐射经过准直、色散和成像后,在探测器上,沿平行狭缝方向  $y(i)$  形成景物像元的影像,沿垂直狭缝方向  $x(j)$  形成景物像元的光谱<sup>[1]</sup>。探测器像元  $(i, j)$  采集到的地面景物像元  $i$  的第  $j$  个光谱通道的辐射能量为

$$\Phi_{ij} = \frac{\pi d^2 T_{\text{int}}}{4F^2} \int_{\lambda_{ja}}^{\lambda_{jb}} L_i(\lambda) f(\lambda - \lambda_j) \tau_o(\lambda) d\lambda. \quad (1)$$

式中  $\tau_o(\lambda)$  为光学系统的透射率,  $T_{\text{int}}$  为探测器积分时间,  $L_i(\lambda)$  为入射到系统入瞳上的光谱辐照度,  $d$

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,  $\lambda_{ja}$  和  $\lambda_{jb}$  分别为像元  $i$  光谱通道  $j$  的起始和截止波长,  $\lambda_j$  为光谱通道  $j$  的中心波长,  $f(\lambda - \lambda_j)$  为光谱通道  $j$  的光谱响应函数。由(1)式,可求得探测器像元  $(i, j)$  产生的信号电子数为

$$N_{ij} = \frac{\pi d^2 T_{\text{int}}}{4F^2 hc} \int_{\lambda_{ja}}^{\lambda_{jb}} L_i(\lambda) f(\lambda - \lambda_j) \tau_o(\lambda) \eta(\lambda) \lambda d\lambda, \quad (2)$$

式中  $\eta(\lambda)$  为探测器的量子效率,  $c$  为光速,  $h$  为普朗克常数。

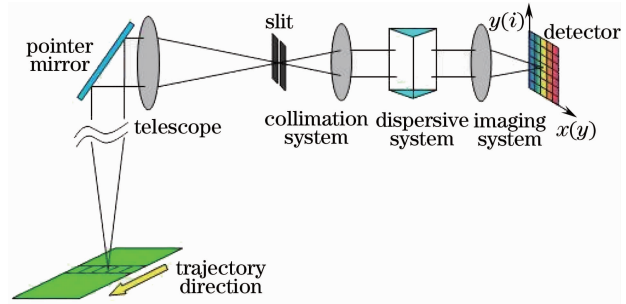


图 1 空间色散型成像光谱仪原理图

Fig. 1 Principle of prism dispersion imaging spectrometer

根据信噪比的一般定义<sup>[6,7]</sup>为

$$R_{\text{SN}} = \frac{N_{ij}}{\sqrt{N_{\text{oe}}^2 + N_{\text{e}}^2}}, \quad (3)$$

式中  $N_{\text{oe}} = N_{ij}^{1/2}$  为探测器的光电转换噪声,  $N_{\text{e}}$  为系统电子学噪声电子数。

## 3 计算分析

当成像光谱仪采用单棱镜作为色散元件时,在探测器上的线色散可表示为

$$\frac{dl}{d\lambda} = f'_2 \frac{n \sin \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i_1} \sqrt{1 - (\sin \alpha \sqrt{n^2 - \sin^2 i_1} - \cos \alpha \sin i_1)^2}} \frac{dn}{d\lambda}, \quad (4)$$

式中  $\alpha$  为单棱镜的顶角,  $i_1$  为准直光线的入射角,  $f'_2$  为成像系统的焦距,如图 2 所示。  $n = n(\lambda)$  为单棱镜材料的折射率,对于用于短波红外的熔石英材料可表示为

$$n^2 = 1 + \frac{A \lambda^2}{\lambda^2 - B} + \frac{C \lambda^2}{\lambda^2 - D} + \frac{E \lambda^2}{\lambda^2 - F}, \quad (5)$$

式中  $A, B, C, D, E$  为材料参数。

由(4)式和(5)式推得光谱通道  $j$  的中心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  $\lambda_0$  的位置坐标,  $x_j$  为探测器像元  $j$  的位置坐标。

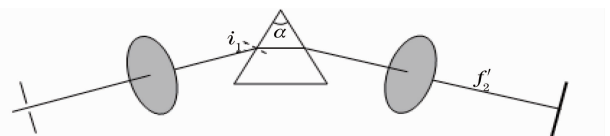


图 2 单棱镜光谱仪示意图

Fig. 2 Schematic of single prism spectrometer

短波红外成像光谱仪所用单棱镜一般由熔石英制成,顶角  $\alpha=60^\circ$ 。根据(4)式和(6)式,计算得到光谱通道数为 75,100,150 和 200 时的光谱采样曲线,如图 3 所示。从图 3 中可见,由于单棱镜的线色散是非线性的,所以光谱采样间隔随着波长增加而先变大又变小。与相同光谱通道数的均匀光谱采样情况相比,在  $\lambda < 1.85 \mu\text{m}$  光谱范围,单棱镜色散成像光谱仪的光谱采样间隔大于对应的均匀采样间隔,相应的光谱分辨率比等均匀的低;在  $\lambda > 1.85 \mu\text{m}$  光谱范围,光谱采样间隔小于对应的均匀采样间隔,相应的光谱分辨率比均匀采样的高。

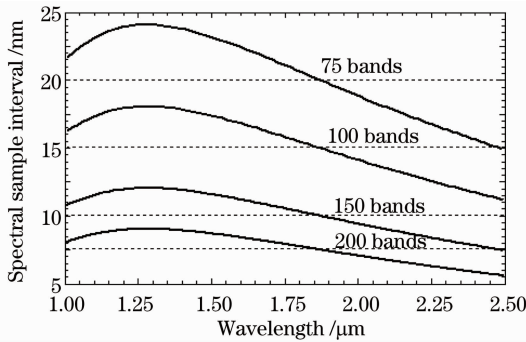


图 3 色散棱镜的光谱采样曲线

Fig. 3 Spectral sampling curves of dispersion prism

将在  $1.0\sim 2.5 \mu\text{m}$  光谱范围内,具体计算和分析棱镜色散成像光谱仪探测器像元采集到的景物辐射能量的特性和信噪比的特性。为简明起见,假定  $\tau_o(\lambda)$  和  $\eta(\lambda)$  都不随波长变化,并取  $\tau_o(\lambda) = 0.3, \eta(\lambda) = 0.7, N_c = 150$ 。同时假定观测环境为中纬度北纬  $30^\circ$  夏季,海拔 100 m,地表温度 300 K,乡村气溶胶 23 km 多重散射,入射到系统入瞳上的上行光谱辐射强度如图 4 所示。将由(4)式和(6)式求得的  $\lambda_{ji}$  和  $\lambda_{j0}$  代入(1)式,求得探测器像元  $(i, j)$  采集到的景物辐射能量曲线,如图 5 所示,再由(2)式和(3)式算得信噪比曲线,如图 6 所示。

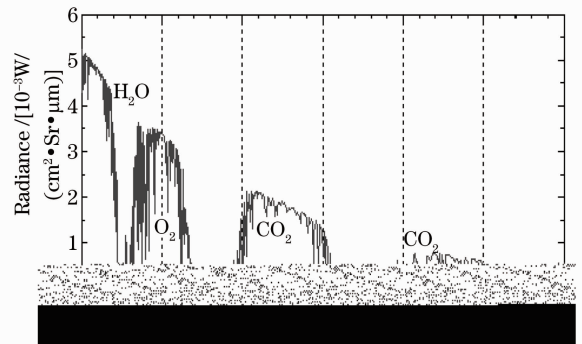


图 4 入射到系统入瞳上的上行光谱辐射强度

Fig. 4 Upwelling spectral radiance upon the entrance pupil of the imaging spectrometer

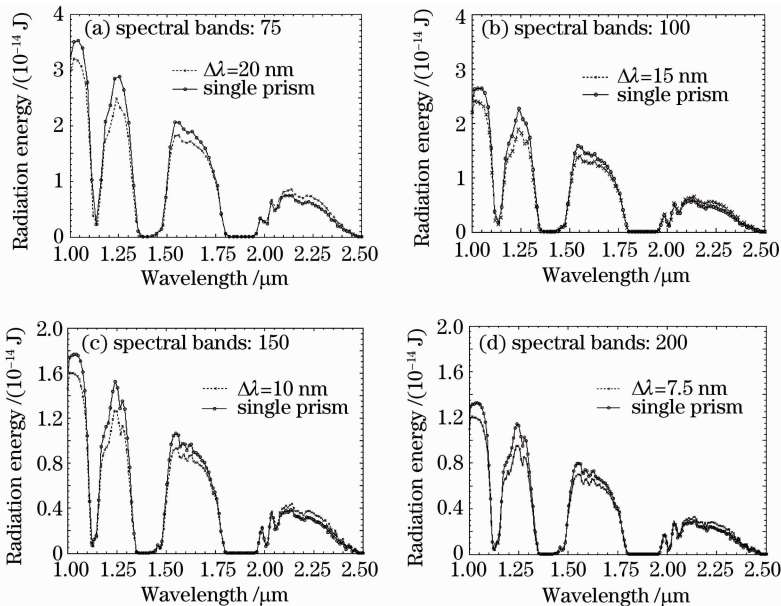


图 5 探测器采集到的景物辐射能量曲线

Fig. 5 Scenery radiation energy curves acquired by detector

由图 5,图 6 可见,在  $1.000\sim 1.85 \mu\text{m}$  光谱范围内,由于单棱镜成像光谱仪的光谱采样间隔大于相应均匀光谱采样间隔,所以探测器像元采集到的景物辐射能量大于均匀采样的情况,而大气的一些弱吸收特征被平滑掉了;在  $1.85\sim 2.5 \mu\text{m}$  光谱范

围内,单棱镜成像光谱仪的光谱采样间隔小于相应均匀光谱采样的间隔,并迅速变小,所以探测器像元采集到的景物辐射能量明显低于均匀采样的情况,而大气的弱吸收特征比等采样间隔表现得明显。随着光谱采样通道数的增加,不明显的大气弱吸收特

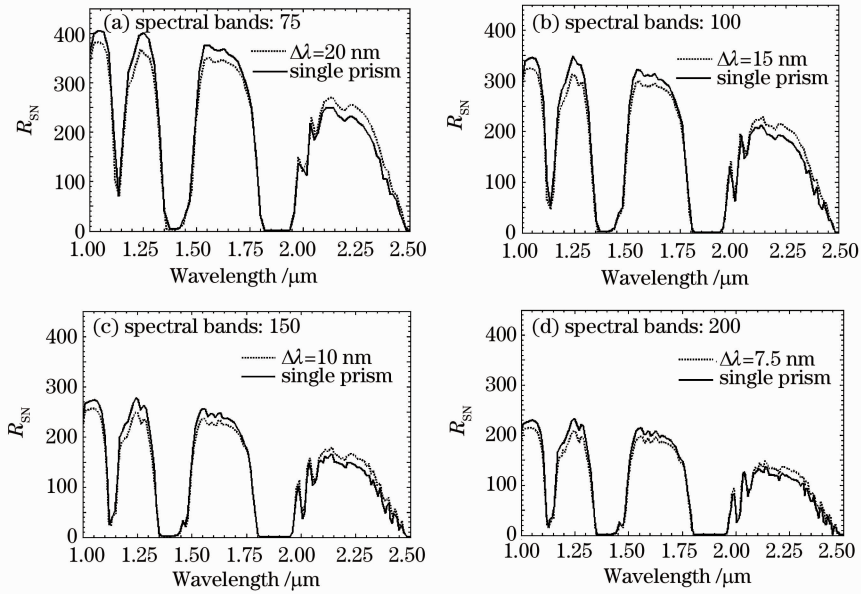


图 6 成像光谱仪信噪比曲线

Fig. 6 Signal-to-noise ratio (SNR) of the imaging spectrometer

征越来越多地显现,对于信噪比也有相似的结论。

## 4 结 论

在短波红外光谱范围内,成像光谱仪采用单棱镜作为色散元件,光谱采样间隔随着波长的增大而非线性变化,这导致在光谱范围短波部分,像元采集的景物辐射能量大于相应均匀采样的情况,因而信噪比也就高;在光谱范围长波部分,像元采集的景物辐射能量和信噪比越来越小于相应均匀采样的情况。在相同条件下,若成像光谱仪以光栅为色散元件,由于衍射光栅的色散是线性的,其能量采集和系统的信噪比与均匀采样的情况相近。但是由于光栅衍射效率的影响,系统采集到的能量和信噪比在整个光谱范围内都要低于均匀采样的情况。

## 参 考 文 献

- 1 Alexander F. H. Goetz, Gregg Vane, Jerry E. Solomon *et al.*. Imaging spectrometry for earth remote sensing [J]. *Science*, 1985, **228**(4704): 1147~1153
- 2 Charles T. Willoughby, Jay Marmo, Mark A. Folkman. Hyperspectral imaging payload for the NASA small satellite technology Initiative program [C]. Aerospace Applications Conference Proceedings IEEE, 1996, **2**: 67~79
- 3 Leonard John Otten III, R. Glenn Sellar, J. Bruce Rafert. MightySat II. 1 Fourier-transform hyperspectral imager payload performance[C]. *SPIE*, 1995, **2583**: 566~575

- 4 Bradley J. Cooke, Bryan E. Laubscher, Christoph C. Borel *et al.*. Methodology for rapid infrared multi-spectral, electro-optical imaging system performance analysis and synthesis[C]. *SPIE*, 1996, **2743**: 52~86
- 5 Terrence S. Lomheim, Erich D. Hernandez-Baquero. Translation of spectral radiance levels, band choices, and signal-to-noise requirements to focal plane specifications and design constraints[C]. *SPIE*, 2002, **4486**: 263~307
- 6 A. T. Pritt, Jr., P. N. Kupferman, S. J. Young *et al.*. Imaging LWIR spectrometers for remote sensing applications[C]. *SPIE*, 1997, **3063**: 138~149
- 7 R. Glenn Sellar, Glenn D. Boreman. Comparison of relative signal-to-noise ratios of different classes of imaging spectrometer [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(9): 1614~1624
- 8 Jens Nieke, Michael Solbrig, Andreas Neumann. Noise contributions for imaging spectrometers[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(24): 5191~5194
- 9 Wand Xianhua, Qiao Yanli, Philippe Goloub *et al.*. Radiometric calibration of sunphotometer system applied to aerosol robotic network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 87~91
- 王先华, 乔延利, Philippe Goloub 等. 应用于全球气溶胶测量网的太阳辐射计辐射定标系统[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 87~91
- 10 Xu Qiuyun, Zheng Xiaobing, Zhang Wei *et al.*. Radiometric characteristics test of integrating sphere source using wavelength-tunable laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1310~1314
- 徐秋云, 郑小兵, 张伟等. 利用可调谐激光的积分球光源辐射特性测试[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1310~1314
- 11 F. Blechinger, B. Harnisch, B. Kunkel. Optical concepts for high resolution imaging spectrometers [C]. *SPIE*, 1995, **2480**: 165~179