

文章编号 1004-924X(2009)01-0020-06

谱线弯曲对成像光谱仪辐射信号采集的影响

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: 为了研究谱线弯曲对棱镜色散成像光谱仪光谱辐射信号采集的影响, 结合复合棱镜的色散特性, 在可见近红外光谱区(400~1 000 nm)内, 分析了当光谱偏离量为 0.01、0.1 和 0.5 d (d 为探测器像元尺寸)时系统采集到的辐射信号与没有谱线弯曲情况下采集到的辐射信号的偏差, 以衡量谱线弯曲下系统辐射测量的变化。实验结果表明: 谱线弯曲引起的探测器上的光谱偏离会导致系统辐射信号采集发生变化。与没有谱线弯曲的情况相比, 采集到的景物辐射信号在大气吸收带的边缘出现明显的偏差, 且信号的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信号偏差。对于光谱分辨率平均为 10 nm 的成像光谱仪, 谱线弯曲引起的光谱偏离量应控制在 0.3 nm 以内。

关键词: 成像光谱仪; 棱镜色散; 辐射信号采集; 谱线弯曲

中图分类号: TP702; TP73 **文献标识码:** A

Effect of spectral curvature on signal acquisition of imaging spectrometer with prism dispersion in VNIR

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 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: To study the effect of spectral curvature on the acquired radiant signal by imaging spectrometer with prism dispersion, the errors of acquired signal between with spectral offset 0.01, 0.05, 0.1 d (d is pixel dimension) and without spectral curvature was calculated by combining with the dispersive characteristics of composite prism in Visible-Near Infrared VNIR (400~1 000 nm). The experimental results indicate that the scene radiant signal acquired by imaging spectrometer with spectral line bend exhibits distinct errors at the edges of atmospherical absorption bands compared with no spectral curvature, and the normalized signal errors increase with the spectral offset. When spectral resolution increases, there are distinct signal errors near some weak atmospherical absorption peaks. These results reported here suggest that spectral curvature should be no more than 0.3 nm for imaging spectrometer with 10 nm resolution.

Key words: imaging spectrometer; prism dispersion; radiant signal acquisition; spectral curvature

收稿日期: 2008-04-29; 修订日期: 2008-06-06.

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(No. 60538020); 中国科学院创新工程资助项目

1 引言

成像光谱仪是一种“谱像合一”的仪器,它利用狭缝将望远镜和光谱仪有机地结合在一起,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,成像光谱仪主要分成色散型^[3-5]和傅里叶变换型^[6]两种类型。棱镜色散成像光谱仪探测器上接收到的直狭缝的单色像通常会有一定的弯曲(谱线弯曲),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^[7]。在研制色散型成像光谱仪的同时,测量和分析谱线弯曲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,利用低压汞灯测量光谱弯曲,测得的谱线弯曲量小于一个像元尺寸^[8]。Robert O. Green 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^[9]。

当存在谱线弯曲时,即使系统光谱定标精度很高,探测器穿轨方向的同一行像元之间仍会存在较大的光谱偏离,这将导致较大辐射测量偏差。本文将结合由 F2 玻璃和熔石英制成的复合棱镜为色散元件的可见近红外成像光谱仪,在光谱分辨率为 10 nm、5 nm 和 2.5 nm 时,具体分析不同弯曲量下,谱线弯曲对棱镜色散成像光谱仪采集景物辐射信号的影响。经分析计算可以看出:存在谱线弯曲时,系统采集到的辐射信号在大气吸收带边缘出现明显的偏差,随着谱线弯曲的加剧,系统的辐射测量精度不断降低,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,但对于光谱分辨率平均为 10 nm 的成像光谱仪,谱线弯曲量应控制在 0.3 nm,否则还需要进一步用校正算法补偿辐射测量的偏差。

2 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

光谱辐射可表示为^[10-11]:

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

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 $\tau_o(\lambda)$,探测器积分时间为 T_{int} ,探测器像元 (i,j) 采集到的地面景物像元 i 的第 j 个光谱通道的辐射信号为^[9]:

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

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^[8], 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,系统的光谱采样是不均匀的,所以,这里光谱响应函数 $f(\lambda - \lambda_j)$ 取为不对称的高斯函数:

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

当存在谱线弯曲时,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,考虑到谱线弯曲的影响,探测器像元 (i,j) 采集到的景物辐射信号应具体改写为:

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

3 谱线弯曲下系统的光谱采样

对于可见近红外谱段,成像光谱仪采用复合棱镜作为色散元件,在探测器上的线色散可表示为:

$$\frac{dI}{d\lambda} = f_2' \left\{ \frac{\sin \alpha_2 \left[n_2 \frac{dn_2}{d\lambda} - (\sin i_1 \cos \alpha_1 + \sin \alpha_1 (n_1^2 - \sin^2 i_1)^{\frac{1}{2}}) \frac{\sin \alpha_1}{(n_1^2 - \sin^2 i_1)^{\frac{1}{2}}} n_1 \frac{dn_1}{d\lambda} \right]}{[n_2^2 - (\sin i_1 \cos \alpha_1 + \sin \alpha_1 (n_1^2 - \sin^2 i_1)^{\frac{1}{2}}) (1 - \sin^2 i_2)^{\frac{1}{2}}]^{\frac{1}{2}}} - \frac{\cos \alpha_2 \sin \alpha_1 n_1 \frac{dn_1}{d\lambda}}{(n_1^2 - \sin^2 i_1)^{\frac{1}{2}} (1 - \sin^2 i_2)^{\frac{1}{2}}} \right\}, \quad (5)$$

$$\sin i_2 = \sin \alpha_2 \sqrt{n_2^2 - (\sin i_1 \cos \alpha_1 + \sin \alpha_1 (n_1^2 - \sin^2 i_1)^{\frac{1}{2}})^2} - \cos \alpha_2 (\sin i_1 \cos \alpha_1 + \sin \alpha_1 (n_1^2 - \sin^2 i_1)^{\frac{1}{2}}), \quad (6)$$

其中, i_1 为准直光线入射角, α_1 和 α_2 , n_1 和 n_2 分别为构成复合棱镜的两个单棱镜的顶角和材料折射率, f_2' 为成像系统的焦距。

由式(5)可得波长和像元位置的关系式为:

$$\lambda_j = \lambda_0 + \int_{x_0}^{x_j} \frac{d\lambda}{dI} dx, \quad (7)$$

其中, 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。

当探测器像元 (i, j) 上存在 σ_i 弯曲量时, 则各像元位置 x_{ij} 对应的波长应由式(7)改写为:

$$\lambda_{ij} = \lambda_0 + \int_{x_0}^{x_j + \sigma_i} \frac{d\lambda}{dI} dx, \quad (8)$$

由式(8)可见, 谱线弯曲引起的光谱偏离使穿轨方向上不同位置的像元 i 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^[12-14]。

4 仿真实验验证

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。用大气辐射传输软件模拟

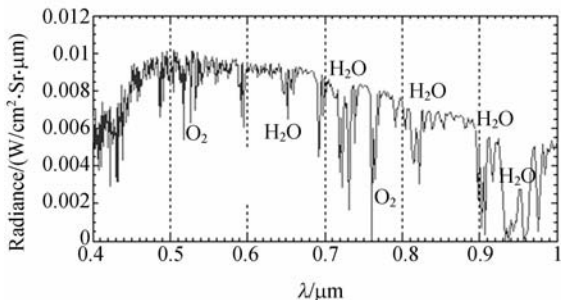


图 1 入射到系统入瞳上的地面景物光谱辐射

Fig. 1 Ground scene spectral radiance injecting on entrance pupil

出 $0.4 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 光谱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。

成像光谱仪所用的复合棱镜由两个分别以 F2 玻璃和石英制成的单棱镜组成, 顶角分别为 $\alpha_1 = 17.5^\circ$ 和 $\alpha_2 = 56.3^\circ$ 。探测器像元尺寸 $d = 30 \mu\text{m}$, 系统 $F/\# = 4$ 。根据式(5)决定复合棱镜成像光谱仪的色散特性, 结合式(7)和(8)求得有、无光谱偏离时各通道的起始和截止波长, 再分别带入式(4)得到对应情况下成像光谱仪采集到的景物辐射信号。然后, 用最大单通道辐射信号对所得数据进行归一化, 再采用四点三阶 Lagrange 插值方法对光谱偏离下系统采集到的辐射信号进行二次采样, 得到无光谱偏离中心波长对应的辐射信号近似值, 用得到的辐射信号近似值与对应的没有光谱偏离情况下通道采集到的辐射信号的差值表示谱线弯曲使辐射信号采集产生的偏差。图 2~7 所示为光谱通道数分别为 60、120 和 240 时, 不同光谱偏离量的归一化的信号和信号差值曲线。

由图 2、图 4 和图 6 可见, 当存在谱线弯曲时, 对应光谱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明显; 采集到的景物辐射信号幅值也发生变化, 明显的信号幅值变化主要出现在大气狭窄的吸收峰和宽吸收带的边缘附近。中心波长和信号幅值的变化随光谱偏离量的增加而增加(见表 1)。由图 3、图 5 和图 7 可见, 较大的辐射信号差值主要出现在 O_2 在 $0.76 \mu\text{m}$ 和 H_2O 在 $0.94 \mu\text{m}$ 处的吸收带(图 1)附近, 这些地方入射辐亮度随波长变化剧烈, 对光谱响应函数的卷积非常敏感; 而在 $0.4 \mu\text{m}$ 附近较大的辐射信号差值是由于强烈的色散非线性导致的。在 $0.76 \mu\text{m}$ 处 O_2 的吸收带附近, 光谱通道数为 60 时, 对应 $0.1d$ 和 $0.5d$ 弯曲量的辐射信号归一化偏差分别为 0.02 和 0.08。光谱通道数为 120 时, 对应 $0.5d$ 光谱偏离量的辐射信号归一化偏差在整个光谱范围内有 7 处 > 0.03 。光谱通道数为 240 时, 对应相同光谱偏离量有更多

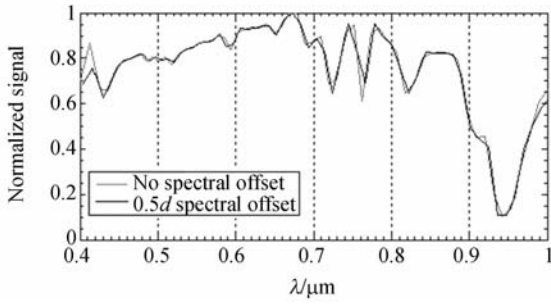


图 2 光谱通道数 60 时,有、无 0.5d 光谱偏离系统采集到的景物辐射信号的归一化曲线

Fig. 2 Normalized curves of scene radiant signal acquired by system without and with 0.5d spectral offset in 60 spectral bands

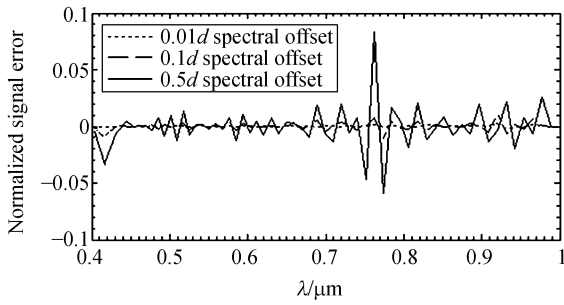


图 3 光谱通道数为 60 时,不同偏离量下系统采集到的信号与没有谱线弯曲时系统采集到的信号的归一化差值曲线

Fig. 3 Normalized error curves of scene radiant signal acquired by system without and with different spectral offsets in 60 spectral bands

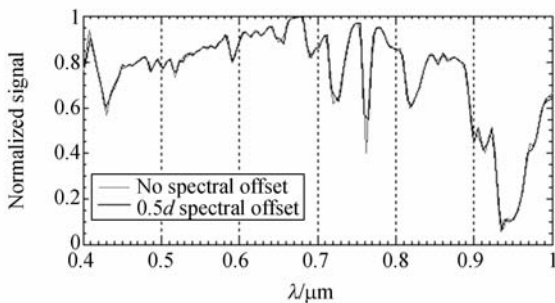


图 4 光谱通道数 120 时,有、无 0.5d 光谱偏离时系统采集到的景物辐射信号的归一化曲线

Fig. 4 Normalized curves of scene radiant signal acquired by system without and with 0.5d spectral offset in 120 spectral bands

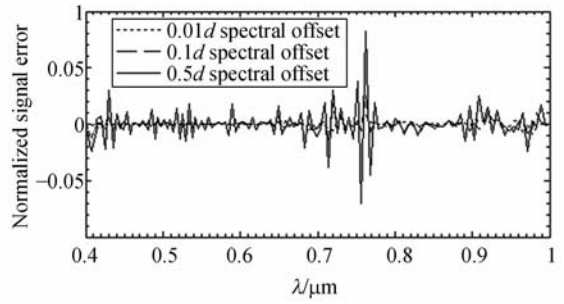


图 5 光谱通道数为 120 时,不同偏离量下系统采集到的信号与没有谱线弯曲时系统采集到的信号的归一化差值曲线

Fig. 5 Normalized error curves of scene radiant signal acquired by system without and with different spectral offsets in 120 spectral bands

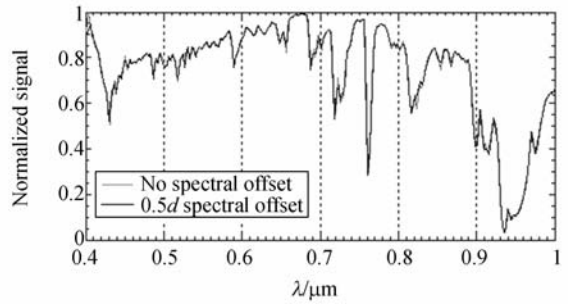


图 6 光谱通道数 240 时,有、无 0.5d 光谱偏离系统采集到的景物辐射信号的归一化曲线

Fig. 6 Normalized curves of scene radiant signal acquired by system without and with 0.5d spectral offset in 240 spectral bands

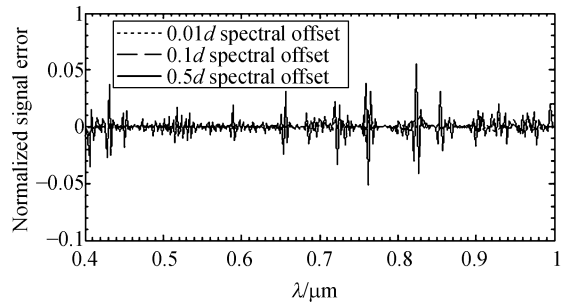


图 7 光谱通道数为 240 时,不同偏离量下系统采集到的信号与没有谱线弯曲时系统采集到的信号的归一化差值曲线

Fig. 7 Normalized error curves of scene radiant signal acquired by system without and with different spectral offsets in 240 spectral bands

的波长位置出现明显的信号偏差。另外,当光谱

分辨率提高时,0.43 μm 处太阳 H_γ 的 Fraunhofer 线附近出现了较明显的信号偏差。表 1 列

出光谱通道数为 60、120 和 240 时,不同弯曲量下有、无谱线弯曲时系统采集到的辐射信号的归一化差值。从表中可以看出,整个光谱范围内,当光谱通道数相同时,随着光谱偏离量的增大,信号差值的 PV 值和 RMS 值都增大,说明在一定的光谱分辨率条件下,谱线弯曲程度越大对景物辐射信号采集的偏差越严重。对于光谱通道数为 60 时,对应光谱采样间隔为 10 nm,按照 Robert O. Green 给出的标准,当辐射能量的相对偏差 PV 值 $< 5\%$ 时,辐射能量的偏差可以忽略^[9]。当谱线

弯曲量 $< 0.03d$ 时,经二次采样后的辐射能量的偏差(相对偏差的 PV 值为 4.95%)就能达到上述标准。当光谱偏离量 $< 0.3d$ 时,信号差值的 PV 值和 RMS 值随光谱通道数的增加而增大;而当光谱偏离量 $> 0.3d$ 时,信号差值的 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,不是始终满足光谱分辨率越高信号差值越大的规律,若光谱偏离量很大,由式(8)可知通道的光谱采样间隔会有很大变化,这时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信号差值的大小。

表 1 不同通道数和偏离量时辐射信号的归一化偏差

Tab.1 Normalized errors of radiant signal with different spectral bands and different spectral offset

偏离量	通道数	60	120	240	
0.01d	PV 值	0.012 7	0.017 0	0.053 2	
0.03d		0.014 1	0.021 5	0.058 4	
0.05d		0.015 8	0.025 6	0.064 7	
0.1d		0.025 7	0.040 7	0.081 4	
0.2d		0.064 5	0.067 1	0.063 8	
0.3d		0.110 6	0.115 1	0.088 8	
0.4d		0.162 3	0.157 1	0.121 3	
0.5d		0.205 9	0.190 6	0.156 4	
0.01d		RSM 值	0.001 7	0.002 3	0.003 8
0.03d			0.002 0	0.002 9	0.005 2
0.05d	0.002 7		0.003 1	0.007 2	
0.1d	0.004 0		0.004 8	0.007 6	
0.2d	0.008 3		0.007 9	0.008 5	
0.3d	0.014 2		0.012 9	0.010 7	
0.4d	0.020 0		0.016 3	0.012 0	
0.5d	0.026 7		0.018 3	0.013 0	

5 结 论

棱镜色散成像光谱仪若存在谱线弯曲,会给系统采集景物辐射信号带来影响。本文的研究表明,谱线弯曲导致的探测器上的光谱偏离使通道采集到的景物辐射信号与对应没有谱线弯曲的情况相比,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信号偏差。谱线弯曲给辐射信号采集带来的偏差,影响系统的辐射测量精度,虽然通过二次采样可以一定程度上校正辐射测量的误差,但对于谱线弯曲较严重的色散型成像光谱仪,应该对采集到的景物辐射信号采取进一步的校正,以提高系统的辐射测量精度。

参考文献:

[1] 李幼平,禹秉熙,韩昌元,等. 成像光谱仪工程权衡优化设计的光学结构[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(6):974-979.
LI Y P, YU B X, HAN CH Y, *et al.*. Tradeoff optimization design of optical configuration on imaging spectrometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 274-279. (in Chinese)

[2] 于斌,曹召良,禹秉熙. 二元光学透镜在超光谱成像仪中的应用[J]. 光学 精密工程, 2003, 11(2):157-161.
YU B, CAO ZH L, YU B X. Application of binary optical lens in hyperspectral imager[J]. *Opt. Pre-*

cision Eng., 2003, 11(2): 157-161. (in Chinese)

[3] WILLOUGHBY C T, ARMO J M, FOLKMAN M A. Hyperspectral imaging payload for the NASA small satellite technology initiative program [J]. *IEEE*, 1996, 2: 67-76.

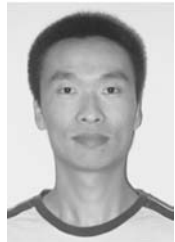
[4] DAVIS C O. A spaceborne imaging spectrometer for environmental assessment of the coastal ocean [J]. *SPIE*, 1996, 2817: 224-230.

[5] FOLKMAN M, PEARIMAN J. EO-1/Hyperion hyperspectral imager design, development, characterization, and calibration [J]. *SPIE*, 2001, 4151: 40-50.

[6] OTTEN III L J, SELLAR R G, RAFERT J B. MightySat Fourier transform hyperspectral imager

- payload performance [J]. *SPIE*, 1995, 2583: 566-575.
- [7] BLECHINGER F, HARNISCH B, KUNKEL B. Optical concepts for high resolution imaging spectrometers [J]. *SPIE*, 1995, 2480: 165-179.
- [8] 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.
- [9] GREEN R O. Spectral calibration requirement for earth-looking imaging spectrometers in the solar-reflected spectrum [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(4): 683-690.
- [10] COOKE B J, BRYAN E L, CHRISTOPH C B. Methodology for rapid infrared multi-spectral, electro-optical imaging system performance analysis and synthesis [J]. *SPIE*, 1996, 2743: 52-86.
- [11] 李幼平, 禹秉熙, 王玉鹏, 等. 成像光谱仪辐射定标影响量的测量链与不确定度[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(5): 822-828.
- LI Y P, YU B X, WANG Y P, *et al.*. Measurement chain of influence quantities and uncertainty of radiometric calibration for imaging spectrometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 822-828. (in Chinese)
- [12] NEVILLE R, SUNB A, STAENZA L K. Detection of spectral line curvature in imaging spectrometer data [J]. *SPIE*, 2003, 5093: 144-154.
- [13] MOUROULIS P, MCKERNS M M. Pushbroom imaging spectrometer with high spectroscopic data fidelity: experimental demonstration [J]. *Opt. Eng.*, 2000, 39(3): 808-816.
- [14] 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): 2210-2220.

作者简介:



冯玉涛(1980—),男,吉林长春人,博士研究生,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。E-mail: fytciom@126.com

导师简介:

向阳(1963—),男,吉林长春人,理学博士,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。E-mail: xiangy@sklao.ac.cn

●下期预告

多次散射情况下非视线光传输模拟

何新,贾红辉,常胜利,尹红伟,杨俊才
(国防科技大学理学院,湖南长沙410073)

基于蒙特卡罗方法,针对发射与接收没有公共视场的情形,对两种典型的收发无公共视场的情况进行了仿真模拟,解决了单次散射近似不适用的传输问题。对于1 W的光源,大气吸收系数 $k_a=1.2 \text{ km}^{-1}$ 、散射系数 $k_s=1.5 \text{ km}^{-1}$ 时,对于收发器背向情况,信号能量在距离为50 m处约为0.27 nW,随距离增大呈指数衰减;对于接收视场受限情况,200 m远处信号能量约0.23 nW,并随距离增大迅速增强。实验测试结果验证了模拟结果的正确性。适用于较复杂地形条件,为发射和接收无公共散射体情况下的光传输提供一种理论模拟方法。