

临边成像光谱仪信噪比分析及实验研究

薛庆生^{1,2}, 王淑荣^{1*}, 李福田¹, 林冠宇¹, 段民征³

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 100049

3. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘要 临边成像光谱仪是一种对大气遥感探测有重要研究和应用价值的新型空间光学遥感仪器。信噪比是定量评价成像光谱仪成像质量和辐射性能的一项指标, 信噪比的估算和测量对成像光谱仪的研制至关重要。针对临边成像光谱仪从辐射传输和能量转换角度, 建立了信噪比模型, 推导了色散型临边成像光谱仪信噪比计算公式, 编制了信噪比快速计算程序。利用大气辐射传输软件 MODTRAN 4.0 模拟计算出在典型观测条件下仪器入瞳光谱辐亮度, 从理论上估算了已研制成的临边成像光谱仪原理样机在典型观测条件下的信噪比。结果表明, 在典型观测条件下原理样机的信噪比不低于 8。作为实验验证, 利用内照明积分球光源对临边成像光谱仪原理样机进行了信噪比测量, 测量结果证实了理论模型的正确性。

关键词 临边成像光谱仪; 辐射传输; 成像性能; 信噪比

中图分类号: TH744.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2010)06-1697-05

引言

随着技术的高速发展和应用, 大气的探测和研究得到了广泛的发展。特别是由于卫星遥感比地基观测具有更高的空间覆盖率、时间的连续性和任务多样性而具有不可替代的优势, 因而卫星遥感成为获得全球中层大气状况的主要手段^[1]。对大气进行遥感探测有 3 种观测方式, 即天底观测方式、掩星(掩日/月)观测方式和临边观测方式。天底观测方式虽然具有高空间覆盖范围, 但垂直分辨率较低。掩星观测方式虽然具有高的垂直分辨率, 但由于其绕轨道一周只能进行两次有限时间内的观测, 因此其空间覆盖范围很低。临边观测方式是一种新的观测方式, 它既具有天底观测方式的高空间覆盖范围又同时具有掩星观测方式的高垂直分辨率, 因此受到人们的极大关注^[2]。

成像光谱仪是一种“图像和光谱合一”的光学遥感仪器, 它利用入射狭缝将前置望远光学系统和光谱成像系统有机地结合在一起, 能够提供景物连续的光谱图像。成像光谱仪具有其他光学遥感器不能比拟的综合技术性能, 是光学遥感器发展的主流和方向^[3, 4]。以临边观测方式进行大气遥感探测的成像光谱仪称为临边成像光谱仪^[5]。近 10 年来, 用于大气遥感探测的临边成像光谱仪因为其独特的优势逐渐成为美国

和欧洲等发达国家研究的热点, 取得了一定的研究成果, 已成功研制了 OSIRIS^[6] 和 SCIAMACHY^[7] 等临边成像光谱仪。在我国, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所先与中国科学院大气物理研究所联合开展临边成像光谱技术研究, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究临边成像光谱仪的设计、研制, 中国科学院大气物理研究所研究临边反演算法^[8]。

成像光谱仪的信噪比是限制目标探测的一个重要因素, 也是衡量成像光谱仪成像性能的重要指标。在低照度条件下, 如果信号弱到和噪声处于同一数量级, 即使目标几何尺寸再大也不能被探测到。信噪比分析和估算对于光学系统参数、成像器件的选择和后续电子学系统的设计有很重要的意义^[9]。

本文首先从临边成像光谱探测辐射传输和能量转换的角度出发, 提出了信噪比模型, 详细推导了普遍适用的色散型临边成像光谱仪的信噪比计算公式, 编制了信噪比快速计算程序, 为成像光谱仪系统的设计和评价提供依据。然后利用该信噪比模型对已研制成的临边成像光谱仪原理样机在典型观测条件下的信噪比进行了理论计算; 最后作为对理论模型的实验验证, 在实验室利用积分球扩展光源对临边成像光谱仪原理样机进行了信噪比测量。

收稿日期: 2009-05-10, 修订日期: 2009-08-20

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2009AA12Z151)项目和中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新项目资助

作者简介: 薛庆生, 1979 年生, 中国科学院长春光学精密机械物理研究所博士研究生 e-mail: qshxue2006@163.com

* 通讯联系人 e-mail: wsr608_@yshoo.com.cn

1 临边成像光谱探测辐射传输特性

1.1 入瞳光谱辐亮度

临边成像光谱仪探测地球临边大气散射光谱辐射, 通过对它的光谱信息解译, 获得大气成分(痕量气体和气溶胶等)的垂直分布信息^[10]。图 1 为临边观测的几何原理图。在紫外-可见波段, 临边成像光谱仪接收到的临边辐射主要是从临边观测路径(line of the sight)上散射到仪器视场内的散射辐射。

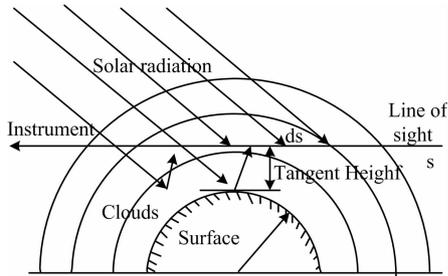


Fig. 1 Limb-viewing geometry for limb imaging spectrometer

MODTRAN 是美国军用和民用部门广泛使用的研究大气影响的软件。MODTRAN 具有在给定输入条件(大气、地表、天文、几何位置)下方便输出从 $0 \sim 50\,000\text{ cm}^{-1}$ 范围内大气透过率和辐亮度的强大能力, 并具有较高的精度, 从而成为大气辐射传输模拟与分析、许多卫星图像处理中广泛使用的大气校正软件的基础计算软件^[11]。

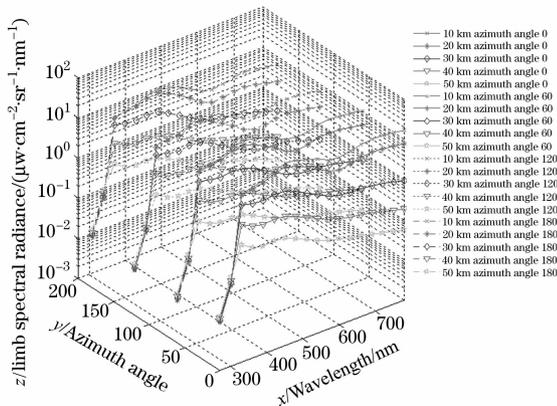


Fig. 2 Vertical profile of limb spectral radiance

利用 MODTRAN4.0 模拟了 270~780 nm 波段典型大气条件下地球临边大气辐射的光谱垂直分布, 模型输出结果是临边成像光谱仪高度处接收到的来自临边观测路径(LOS)上散射体散射的光谱辐亮度, 即仪器入瞳处光谱辐亮度。仪器轨道高度 400 km, 仪器到临边观测点的距离 2 294 km。图 2 是太阳天顶角为 60° , 地表反射率为 0.1, 临边观测相对太阳的方位角分别为 $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ$ 时, 仪器接收到的临边散射辐射的垂直分布。 x 轴为波长(nm), y 轴为临边观测相对太阳方位角。 z 轴为仪器接收到的临边散射光谱辐亮度($\mu\text{w cm}^{-2}\text{ sr}^{-1}\text{ nm}^{-1}$)。

1.2 光学系统辐射传输特性

临边成像光谱仪的 CCD 探测器上一个像元接收到的光能量为像面照度、像元面积和积分时间的乘积, 由目标辐射产生的信号电子数 S_e 可表示为

$$S_e = \left[\int_{\lambda}^{\lambda+\Delta\lambda} E'(\lambda) A_d t_{\text{int}} \eta(\lambda) d\lambda \right] / (hc/\lambda) \quad (1)$$

其中, $E'(\lambda)$ 为像面光谱辐照度, A_d 为探测器像元的面积, t_{int} 为积分时间, $\eta(\lambda)$ 为 CCD 的量子效率。 $h = 6.63 \times 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}$ 为普朗克常数, $c = 3 \times 10^8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 为光速, λ 为波长。像面光谱辐照度 $E'(\lambda)$ 可以表示为

$$E'(\lambda) = L(\lambda) \tau_0(\lambda) \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f} \right)^2 \quad (2)$$

其中, $L(\lambda)$ 为仪器接收到的地球临边光谱辐亮度, $\tau_0(\lambda)$ 为光学系统的光谱辐射传输效率, D/f 为光学系统的相对孔径。将(2)式代入(1)式得

$$S_e = \frac{\pi A_d t_{\text{int}} \lambda}{4hc} \left(\frac{D}{f} \right)^2 \int_{\lambda}^{\lambda+\Delta\lambda} L(\lambda) \tau_0(\lambda) \eta(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

由于 CCD 探测器一个像元所占的光谱带宽很窄, 可以不用积分, 故(3)式可改写为

$$S_e = \frac{\pi A_d t_{\text{int}} \lambda}{4F_N^2 hc} L(\lambda) \tau_0(\lambda) \eta(\lambda) \Delta\lambda \quad (4)$$

其中 $F_N = f/D$ 为光学系统的 F_N 数。可以看出, 目标信号电子数 S_e 与光学系统 F_N 数的平方成反比, 与像元面积 A_d 和积分时间 t_{int} 成正比。

2 信噪比分析和估算

2.1 信噪比分析及公式推导

在辐射传输和光电转换过程中, 不可避免地会受到各种随机因素的干扰, 这些干扰表现为各种类型的噪声^[12]: 光子散粒噪声、暗电流噪声、读出噪声, 热噪声、及量化噪声等。这些噪声成为限制辐射探测精度的主要原因, 所以人们习惯用信噪比作为衡量成像光谱仪辐射探测能力的重要指标。上述噪声中除了量化噪声外, 其他都属于探测器噪声, 而探测器噪声是噪声的主要来源, 在这里仅就探测器噪声对信噪比的影响加以分析和估算。为了便于计算信噪比并使各个噪声源的影响具有可比性, 在仿真时统一采用电子数作为信号和噪声标准差的单位。假设噪声源是相互独立的, 则总的噪声方差为各噪声源方差的和。

只考虑 CCD 芯片内, 总的随机噪声主要包括光子散粒噪声 σ_{shot} 、暗电流噪声 σ_{dark} 和读出噪声 σ_{read} 。总的随机噪声电子数可以表示为

$$\begin{aligned} \sigma &= \sqrt{\sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{dark}}^2 + \sigma_{\text{read}}^2} \\ &= \sqrt{S_e + n_{\text{dark}} + \sigma_{\text{read}}^2} \end{aligned} \quad (5)$$

通常计算 CCD 的信噪比时, 只考虑时域上的随机噪声。因为空间分布的图形噪声是可以补偿的。所以系统的信噪比可以表示为

$$\text{SNR} = S_e / \sqrt{S_e + n_{\text{dark}} + \sigma_{\text{read}}^2} \quad (6)$$

在满足临边成像光谱仪要求的空间分辨率和光谱分辨率的前提下, 采用像元合并技术(on-chip binning), 可以提高系统的信噪比。像元合并技术就是将 CCD 阵列相邻的像素上

的电荷在读出时作为一个值读出，此时信噪比模型为

$$SNR_{\text{binning}} = \frac{MS_e}{\sqrt{MS_e + Mn_{\text{dark}} + \sigma_{\text{read}}}} \quad (7)$$

其中， M 为合并的像元的个数。

2.2 信噪比的理论计算

下面以一个具体的已研制成的临边成像光谱仪原理样机为例计算信噪比。该临边成像光谱仪用来遥感大气中臭氧、气溶胶等大气成分的垂直分布，对这些大气成分较敏感的波段分别在 600 和 300 nm 附近，故其工作波段分为紫外波段 (270~390 nm) 和可见波段 (540~780 nm) 两个波段，临边垂直方向覆盖范围为 10~50 km。如图 3 所示，原理样机的光学系统由前置望远光学系统和光谱成像系统组成。其中前置望远光学系统采用折射式的像方远心结构，光谱成像系统采用改进的 Czerny-Turner 型物方远心结构^[13] 实现与前置望远光学系统光瞳匹配。前置望远光学系统前有旋转滤光片轮，通过切换滤光片实现紫外波段和可见波段分别探测，可见波段利用光栅的一级衍射，紫外波段利用光栅的二级衍射。原理样机的光学性能参数如表 1 所示。

前置望远光学系统采用的是在紫外和可见段具有高透过率的 CaF₂ 和 F-silica 光学材料。在工作波段内，前置望远系统的光谱透过率大于 90%。用 Lamb950 紫外-可见-近红外分光光度计对原理样机的光学元件的光谱传输特性进行了测量。紫外、可见滤光片的光谱透过率、准直镜和成像镜(均镀 Al+MgF₂ 膜)的光谱反射率、平面衍射光栅(刻线密度为 300 g·mm⁻¹)的衍射效率及光学系统整体的光谱传输效率如图 4 所示。

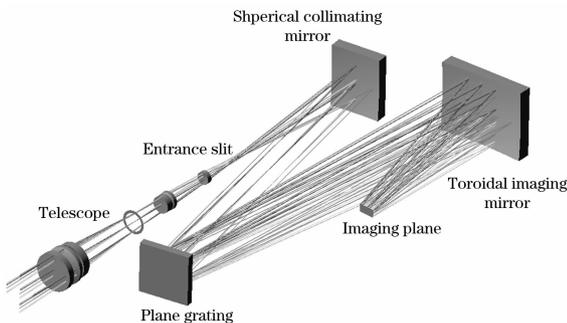


Fig. 3 Layout of optical system of limb imaging spectrometer

Table 1 Parameter of limb imaging spectrometer prototype

Spectral range	270~390 nm(2nd order) 540~780 nm(1st order)
Spectral resolution	1.4 nm(1 st order) 0.7 nm(2 nd order)
I FOV	0.2 mrad
Total Field of View	2.3°
Entrance pupil diameter of telescope	24 mm
Focal length of telescope	120 mm
Focal length of system	124.8 mm
Slit dimensions	5 mm×50 μm
Grating density	300 g·mm ⁻¹
Detector array size	1 025×1 024
Detector pixel size	13 μm×13 μm(2×2 合并使用)
Outline dimension	450 mm×250 mm×200 mm
Mass	8 kg

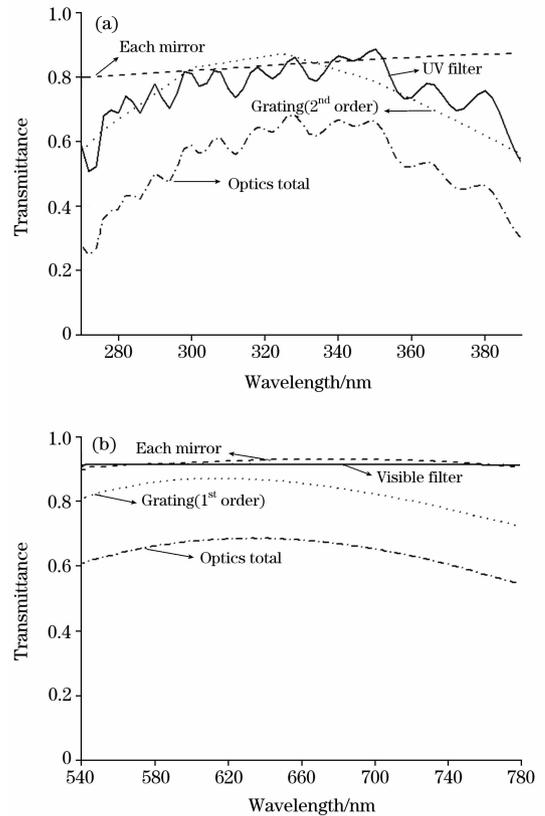


Fig. 4 Spectral transmissivity curve for the prototype
(a) UV band; (b) Visible band

临边成像光谱仪原理样机采用的 CCD 为英国 E2V 公司的紫外增强型 E2VCCD4720 探测器，其量子效率曲线如图 5 所示。E2VCCD4720 探测器的其他性能参数为：暗电流电子数 $n_{\text{dark}} = 1e^-/\text{pixel}/s(-20^\circ\text{C})$ ，读数噪声 $\sigma_{\text{read}} = 3e^- \text{ rms}/\text{pixel}(-20^\circ\text{C})$ ，满阱电子数 100 000 e⁻，动态范围 $D_R = 50\ 000 : 1$ ，像元数 1 024×1 024(2×2 合并使用)，像元尺寸 13 μm×13 μm。

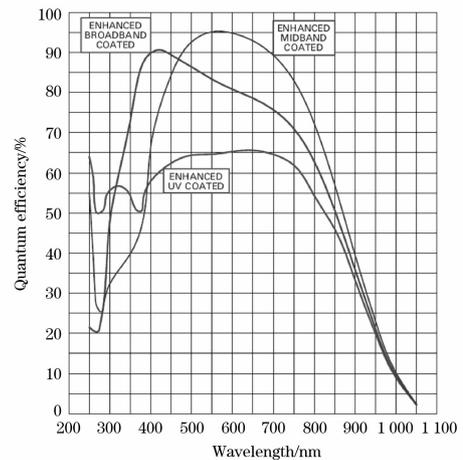


Fig. 5 Quantum efficiency curve of E2vCCD4720

利用 Matlab 编制了临边成像光谱仪信噪比快速计算程序，程序流程图如图 6 所示。入瞳临边光谱辐亮度、光学系

统参数和 CCD 探测器的参数作为输入,不同观测方位角和不同临边高度下的理论信噪比曲线图 7 所示。从图 7 的理论计算结果可以看出,最小信噪比大于 8,最大信噪比达 500 以上且无饱和现象发生,满足目标探测要求。

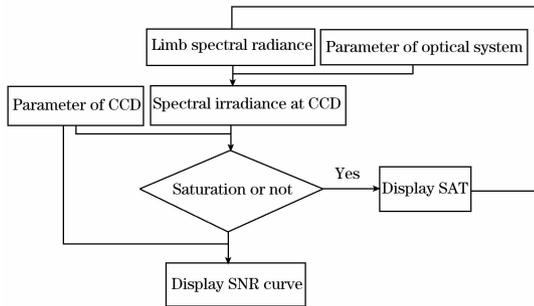


Fig. 6 Flow chart of SNR algorithm

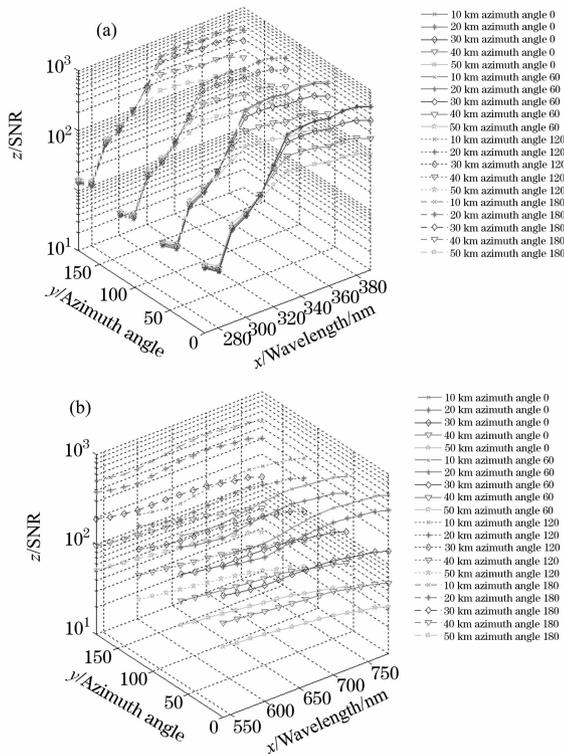


Fig. 7 SNR curve of theoretical calculation for the prototype
(a) UV wavelength-band; (b) Visible wavelength-band

3 信噪比测量

为了验证上述理论模型的正确性,利用积分球光源对临边成像光谱仪原理样机进行了信噪比测量。整个测量过程在暗室进行,用积分球光源充满临边成像光谱仪的孔径和视场,通过调整积分球输出的光谱亮度来模拟临边光谱辐亮度 $L(\lambda)$,临边成像光谱仪采集多幅相应亮度下的图像。每个像

元的灰度值平均值作为仪器的光谱响应的信号值 $V(\lambda)$,而对应像元灰度随时间随机涨落的均方根值作为噪声 N ,然后用信号值与噪声 N 的比值求得仪器的信噪比,即

$$\text{SNR}(\lambda) = V(\lambda)/N \quad (8)$$

测量得到的临边成像光谱仪的实验信噪比曲线如图 8 所示。比较图 7 和图 8 可知,理论和实验信噪比都随入射辐射信号的增大而增加,由实际测量得到的信噪比与理论计算结果基本相符。在太阳天顶角为 60° ,临边观测相对太阳的方位角为 60° ,地表反射率为 0.1 这种亮度较低的情况下,临边成像光谱仪的信噪比大于 8,能够满足目标探测的要求。

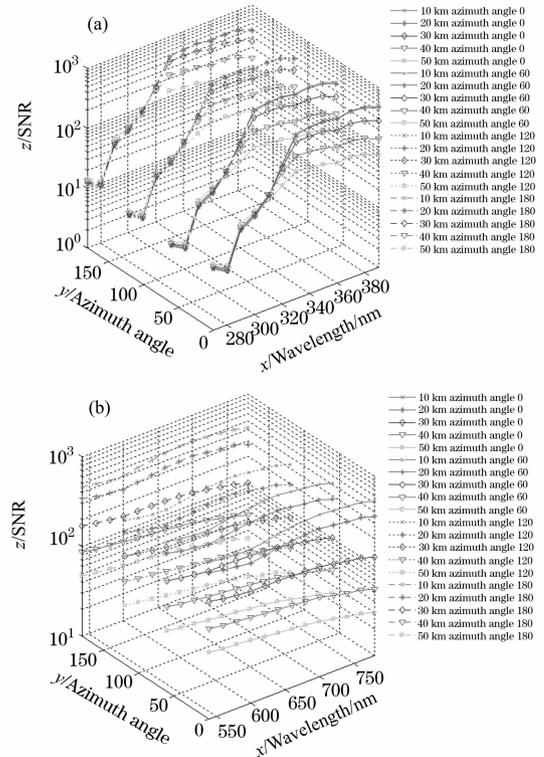


Fig. 8 SNR curve of experiment result for prototype (a) UV wavelength-band; (b) Visible wavelength-band

4 结论

从辐射传输的角度分析了临边成像光谱仪成像探测的机理,利用大气辐射传输软件 MODTRAN4.0 计算了临边成像光谱仪在工作波段内的人瞳临边光谱辐亮度,通过分析临边成像光谱仪成像过程中的辐射传输和光电转换关系,推导出色散型成像光谱仪信噪比的通用计算公式,信噪比理论计算和测量结果表明:理论模型和实际情况基本符合,临边成像光谱仪能在太阳天顶角为 60° ,临边观测相对太阳的方位角为 60° ,地表反射率为 0.1 这种亮度较低的情况下,信噪比大于 8,能够满足目标探测的要求。

参 考 文 献

- [1] LÜ Da-ren, CHEN Ze-yu, BIAN Jian-chun, et al(吕达仁, 陈泽宇, 卞建春, 等). Chinese Journal of Atmospheric Sciences(大气科学), 2008, 32(4): 782.
- [2] CHEN Sheng-bo. SPIE, 2006, 6031: R-1.
- [3] FENG Yu-tao, XIANG Yang(冯玉涛, 向阳). Opt. Precision Eng. (光学精密工程), 2009, 17(1): 20.
- [4] ZHENG Yu-quan(郑玉权). Opt. Precision Eng. (光学精密工程), 2005, 13(6): 650.
- [5] Dittman G D, Leitch J, Chrisp M, et al. SPIE, 2002, 4814: 120.
- [6] Liewellyn E J, Liloyd N D, Degenstein D A, et al. Can. J. Phys., 2004, 82: 411.
- [7] Bovensmann H, Buchwitz M, Frerick J, et al. SPIE, 2004, 5235: 160.
- [8] XUE Qing-sheng, WANG Shu-rong, LU Feng-qin(薛庆生, 王淑荣, 鲁凤芹). Acta Optica Sinica(光学学报), 2009, 29(1): 35.
- [9] ZHANG Ji-long, WANG Ming, TIAN Er-ming, et al(张记龙, 王明, 田二明, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2009, 29(1): 20.
- [10] Didier R, Robert L. SPIE, 2007, 6745: 6745: 09-1.
- [11] GUO Xia, WANG Pu-cai, LÜ Da-ren(郭霞, 王普才, 吕达仁). Journal of Atmospheric and Environmental Optics(大气与环境光学学报), 2007, 2(6): 479.
- [12] CAI Wen-gui, LI Yong-yuan, XU Zheng-hua(蔡文贵, 李永远, 许振华). Technologies and Applications of CCD(CCD 技术及应用). Beijing: Publishing House of Electronics Industry(北京: 电子工业出版社), 1992. 12.
- [13] XUE Qing-sheng, WANG Shu-rong, LU Feng-qin. Applied Optics, 2009, 48(1): 11.

Analysis and Experimental Validation of Signal-to-Noise for Limb Imaging Spectrometer

XUE Qing-sheng^{1, 2}, WANG Shu-rong^{1*}, LI Fu-tian¹, LIN Guang-yu¹, DUAN Ming-zheng³

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 100049, China
3. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract Limb imaging spectrometer is an important new remote sensor for research and application. Signal-to-noise ratio (SNR) is one of the key parameters to quantitatively evaluate the image quality and radiometric performance of an imaging spectrometer. The estimation and testing of SNR are very important for developing an imaging spectrometer. From the perspectives of radiative transmission and energy conversion, the SNR model is proposed, and the SNR equation of dispersive-type limb imaging spectrometer is derived, and the SNR values under several observing conditions for an limb imaging spectrometer prototype developed are theoretically evaluated based on atmospheric radiative transfer code MODTRAN 4.0. The results show that the SNR of the prototype under typical viewing geometry is not less than 8. As experimental validation, SNR testing was performed using an internally illuminated integrating sphere, and the experimental results have proved the correctness of this theoretical model.

Keywords Limb imaging spectrometer; Radiative transfer; Imaging performance; SNR

(Received May 10, 2009; accepted Aug. 20, 2009)

* Corresponding author