

基于阈值理论的远紫外成像光谱仪灵敏度和信噪比研究

于磊^{1,2}, 林冠宇¹, 曲艺¹, 王淑荣^{1*}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 130039)

摘要: 基于阈值理论, 提出了构建双探测器型 120~180 nm 远紫外(FUV)成像光谱仪的灵敏度和信噪比(SNR)计算模型的方法。首先研究了接收信号的光电流分布以及系统噪声的概率分布, 然后引入探测概率和虚警概率因子, 从而建立了仪器的灵敏度与 SNR 的计算模型。并根据电离层中粒子辐射波长的亮度范围, 获得仪器的理论最小探测功率, 它反映了仪器的灵敏度能够满足探测需求。为了验证计算模型的正确性, 建立了实验系统进行验证, 结果表明, 该方法的计算结果和实验结果间的误差在能够接受的范围内, 计算模型合理有效。

关键词: 远紫外(FUV); 成像光谱仪; 灵敏度; 信噪比(SNR); 阈值理论

中图分类号: TH753 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2011)01-0042-05

Study on sensitivity and signal-noise ratio for a far ultraviolet imaging spectrograph with two detectors based on threshold theory

YU Lei^{1,2}, LIN Guan-yu¹, QU Yi¹, WANG Shu-rong^{1*}

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

Abstract: A 120 nm–180 nm far ultraviolet (FUV) imaging spectrograph with two detectors was developed. A method for establishing an analysis model of its sensitivity and signal-noise ratio (SNR) was proposed based on the signal statistical detection theory and the threshold detection theory. First, the distribution of photoelectric current of accepted signals and the probability of the system noises were studied. Then the mathematical models of sensitivity and SNR of the instrument were deduced by introducing detection probability factor and false alarm rate factor. The minimum detection power could be obtained by the intensity range of the particle radiation wavelengths. And it proved that the sensitivity of the instrument could meet the need of the detection. To verify the calculation precision of the model, the SNR of the instrument was analyzed by using the method, and the related experiment was performed to compare the two results. The results indicate that the errors between theoretic calculation and experimental results are in the acceptable range, and the analysis model is feasible.

Key words: far ultraviolet(FUV); imaging spectrograph; sensitivity; signal-noise ratio (SNR); threshold theory

1 引言

电离层的组成及其结构变化的观测对人类有重要的科学意义和应用价值。无论是空间天气预报、军事探测、航海或是商务应用, 电离层组分都能产生重要的影响。由于电离层中粒子光谱谱段主要集中在远紫外(FUV)波段(120~180 nm), 而大气层对该波段有强烈吸收作用, 这就使得地面观测难以获得光谱数据, 所以测量电离层时间及空间变化的最佳方法是进行

空间成像光谱遥感^[1]。

目前, 对电离层的空间研究^[2~5]均采用成像光谱仪进行探测, 在 FUV 波段以高光谱分辨率同时获得连续的目标超多谱段图像, 这样不仅可以获得高空间、时间覆盖和高垂直分辨率的数据信息, 还可以实现快速的全球成像功能。在我国, 单独的、完整的对电离层、大气辉光和极光带的成像探测尚属薄弱环节, 很多方面还处于空白阶段。

为了实现对电离层探测的预研, 我们试制了 FUV 成像光

* E-mail: wsrong@ciomp.ac.cn

收稿日期: 2010-04-21 修订日期: 2010-08-16

基金项目: 国家 863 计划基金资助项目(2009AA12Z151), 应用光学国家重点实验室基金资助项目

谱仪原理样机。为更好开展相关应用研究,本文采用信号统计理论对灵敏度和信噪比(SNR)进行了建模计算及实验验证。结果表明,理论计算与实验结果基本吻合。

2 灵敏度与 SNR 计算模型

2.1 光谱仪信号产生的光电流分布

对于微弱光探测,现在一般使用 Rayleigh 单位,它依据光源面积的光子发射速率简单描述光谱辐射亮度^[6]。Rayleigh 与通常使用的光强辐亮度($\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$)间的关系为

$$R = 2\pi\lambda \times 10^{13} \quad (1)$$

对于光子计数型探测器,光源的光功率 P 可由探测目标的光子发射速率和辐亮度表示为^[7]

$$P = \nu_p h\nu = LA\Omega \quad (2)$$

式中: ν_p 是光子的发射速率; h 是普朗克常量($6.62 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \cdot \text{kg/s}$); ν 是光的频率; A 为有效入射面积; Ω 为立体角。

式(1)、(2)联立,同时考虑系统的实际传输效率,并将信号进行电流归一化,可得到达探测器接收面上的信号电流为

$$I_s = e\eta_p \nu_p / F^2 = \frac{e\eta_p A \Omega}{2\pi\lambda \nu_p F^2} \times 10^{13} \quad (3)$$

其中: η_p 、 ϵ 为光阴极的量子效率(由于光谱仪采用双探测器,故表面光阴极的 ϵ 不同, τ 为光学系统的传输效率; F 为光学系统 F 数; e 为单位电荷电量。

2.2 光谱仪噪声的概率分布

对于星载光谱仪,干扰噪声主要由系统外部的背景光噪声和系统内部的探测器噪声组成。外部的背景噪声主要有日光和地面辐射、各种物体的漫反射光以及紫外星辐射。太阳和地球在 100~200 nm 波段均可视为黑体,辐射可以不予考虑;仪器内部的消杂散光设施可抑制各种物体的漫反射光;紫外星辐射只有在系统采用定标模式下才会对仪器系统产生作用,探测时这种噪声源没有影响;光学设计与镀膜加工也可以保证获得的波段位于 100~200 nm。

系统内部的探测器噪声有多种,虽然各自所服从的概率分布并不一致,但由于其统计意义彼此独立,根据中心极限定理,系统噪声是服从高斯正态概率分布假设的,内部总噪声可以视为各噪声之和。系统内部均方噪声 σ_n^2 可完整表示为^[7,8]

$$\sigma_n^2 = \sigma_{\text{dark}}^2 + \sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{I}}^2 + \sigma_{\text{af}}^2 + \sigma_{\text{res}}^2 \quad (4)$$

式中,各项解释如下:

1) 暗噪声 σ_{dark}^2 是探测器的主要噪声来源,也是系统噪声的主要组成部分,它源于微通道板和光电阴极的暗计数,由器件的材料特性和工艺特性决定,对于 WSZ 探测器,其值主要与材料、结构、电压和入射电子状况有关^[9],有

$$\sigma_{\text{dark}}^2 = 2eI_{\text{dark}} \Delta f G_d = 2eI_{\text{d}} \Delta f G_d / D \frac{\delta}{2} \left(\frac{U}{c\alpha} \right)^{\alpha/4} \left(\frac{U+c\alpha}{U} \right) \exp(-0.65h) \quad (5)$$

式中: G_d 为光电探测器的增益; Δf 为系统的噪声带宽; D 为开口面积比; δ 为首次碰撞的二次电子发射系数; c 为电子清刷系数; h 为输出电极深度; I_{d} 是微通道板的特性电流,随着电压的升高而增加并逐渐趋于饱和。

2) 散粒噪声 σ_{shot}^2 主要是由入射光子数发生随机变化而产生,对于所使用的光子计数型探测器,可以根据探测器表面对各波长的响应度确定噪声电流,其表达式为

$$\sigma_{\text{shot}}^2 = 2e\tau_n G_n M_r A_r R_\lambda \Delta f G_d \quad (6)$$

其中: τ_n 为入射光通过光学系统的传输效率; G_n 为系统对入射光的光学增益; M_r 为系统所在平面的入射光辐照度; A_r 为系统的有效接收面积; R_λ 为探测器接受面的平均光谱响应率。

$$3) \text{ 热噪声 } \sigma_{\text{I}}^2 = 3kT \Delta f / R_R \quad (7)$$

$$4) \sigma_{\text{af}}^2 \text{ 为放大器噪声,由放大器结构电路决定。}$$

$$5) \text{ 复位噪声 } \sigma_{\text{res}}^2 = kTC/q \quad (8)$$

其中: k 为波尔兹曼常数; T 为温度; C 为电容; R_R 为电阻; q 为电荷量。

σ_{I}^2 、 σ_{af}^2 和 σ_{res}^2 统称为探测器输出噪声,可写为 σ_n^2 。

根据以上的分析,噪声均方根值可写为

$$\sigma_n = \sqrt{2e(I_{\text{dark}} + \tau_n G_n M_r A_r R_\lambda) \Delta f G_d + \sigma_{\text{I}}^2} \quad (9)$$

对于 WSZ 探测器,散粒噪声和暗电流噪声是主要的 SNR 限制瓶颈^[10]。

2.3 SNR 和灵敏度的概率模型

在系统进行探测的过程中,仪器可能将信号作为噪声进行辨识,或是将不存在的信号(噪声)作为信号探测。根据阈值理论^[11],将这两种可能称为探测概率 P_d 和虚警概率 P_f 。在概率上,这两种错误对于仪器是同样重要的,为使平均错误概率最小,即正确判断不付出代价和两类错误的代价相等,需要使用最小错误概率准则以保证系统探测信号的准确性。由此得出

$$P_d = (\sqrt{2\pi}\sigma_n)^{-1} \int_{Y_1}^{\infty} \int_{I_1}^{\infty} \exp(-\frac{1}{2\sigma_n^2}(s - I_{\text{sn}})^2) ds \quad (10)$$

$$P_f = (\sqrt{2\pi}\sigma_n)^{-1} \int_{Y_1}^{\infty} \int_{I_1}^{\infty} \exp(-\frac{1}{2\sigma_n^2}(s - I_n)^2) ds \quad (11)$$

式中: σ_n 为信号和系统噪声的均方噪声之和; I_{sn} 为信号和噪声的平均电流之和; I_n 为噪声电流; I_1 为系统可探测的最小信号形成的电流。令探测概率因子为 ξ_d , 虚警概率因子为 ξ_f , 并取用最小错误概率准则($Y_1 = 1/2$)进行计算,可以获得

$$\xi_d = (I_1 - I_{\text{sn}}) / \sqrt{2\sigma_n^2} = \text{erfc}^{-1}(2p_d) \quad (12)$$

$$\xi_f = (I_1 - I_n) / \sqrt{2\sigma_n^2} = \text{erfc}^{-1}(2p_f) \quad (13)$$

其中, $\text{erfc}^{-1}(x)$ 为互补误差函数的反函数。

联立式(12)、(13)消去 I_1 , 最终获得信号电流方程为

$$I_s^2 - (2\sqrt{2}\sigma_n \xi_f + 4\xi_d \Delta f G_d) I_s + 2(\xi_f^2 - \xi_d^2) \sigma_n^2 = 0$$

解方程得到

$$I_s = \sqrt{2}(\xi_f - \xi_d) \sigma_n + 2\xi_d \Delta f G_d \quad (14)$$

为了保证最终所需要的探测概率和虚警概率都可以达到要求,必须要获得系统的最小可探测功率密度,之前已经从能量转化角度获得了入射光在探测器表面所产生的光电流,式(3)与式(14)联立可得系统的最小可探测亮度(系统的灵敏度)为

$$R = \frac{\sqrt{2}(\xi_f - \xi_d) \sigma_n + 2\xi_d \Delta f G_d}{G_e \eta \frac{A \Omega}{2\pi\lambda} \times 10^{13}} (\text{Rayleigh}) \quad (15)$$

根据 SNR 的定义,综合以上各式,得到系统在灵敏度输入下的 SNR 为

$$\text{SNR} = \frac{I_s}{\sigma_n} = \frac{G_e \eta \frac{A \Omega}{2\pi\lambda} \times 10^{13}}{(2e(\tau_n G_n M_r A_r R_\lambda + I_{\text{dark}}) \Delta f G_d + \sigma_{\text{I}}^2)^{1/2}} \quad (16)$$

3 计算与检验对比

3.1 实例计算

电离层中,主要用于反演数据的粒子信息^[12]见表1。

表1 电离层中粒子参数

Tab. 1 Particles parameters of ionospher

Particles	Distribution/ km	Day intensities/ R		Night intensities/ R		Auroral intensities/ R	
Wavelength/ nm		Max	Min	Max	Min	Max	Min
H ⁺ : 121. 6	80~ 120	30 000	2000	10 000	500	5 000	500
O _I : 130. 4	120~ 140	20 000	1000	300	20	20 000	100
O _{II} : 135. 6	180~ 500	4 000	50	200	15	4 000	50
N ₂ : 140~ 150	140~ 180	1 000	15	n/ a	n/ a	3000	50
N ₂ : 165~ 180	140~ 180	500	120	n/ a	n/ a	2 000	400

光学系统如图1所示。

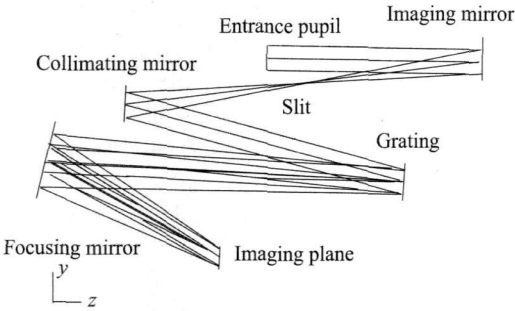


图1 系统光路图
Fig. 1 Optical schematic of the system

由系统技术指标及式(10)、(11)可以得到探测概率因子为-0.99,虚警概率因子为4.51。代入式(15)可推算出系统最小可探测亮度能达到1 Rayleigh以下,根据电离层探测波长的亮度范围(表1)可知,在140~150 nm处和135.6 nm处亮度最小,约15 Rayleigh,系统完全可以进行有效探测。

取10个波长分布于120~180 nm波段内,将各波长的最小亮度代入式(16),可得系统在各个波长下的理论SNR如图2所示。

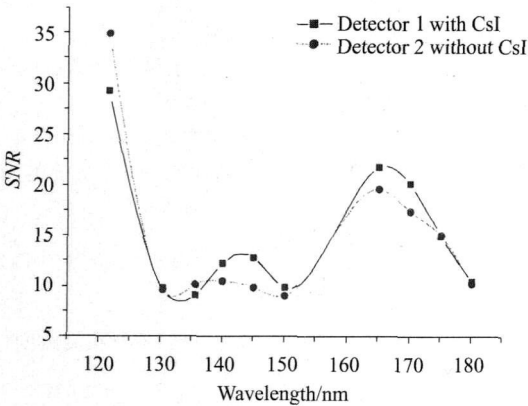


图2 系统在两种探测器下的各波长SNR理论值
Fig.2 Theoretical SNRs of different wavelengths
for the system with two different detectors

光学系统焦距为139.4 mm,F数为5.8。标定光学系统传输效率约20%。2个探测器接收面的微通道板一种表面CsI,另一种则使用裸板,前者的量子效率平均在10%左右,后者则在1%以下。微通道板两端加高压保持光电增益为10⁶。样机

3.2 实验验证

设计了相应实验以验证系统SNR模型,如图3所示。

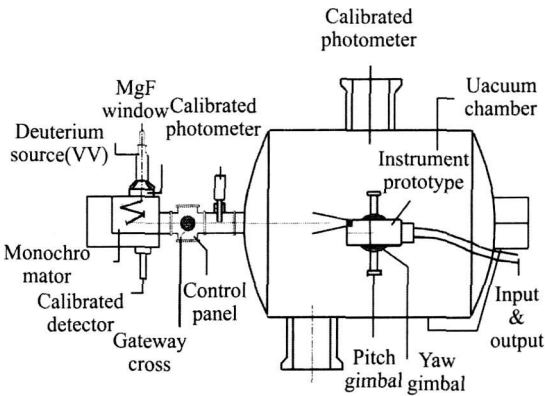


图3 实验装置示意图
Fig 3 The general view of the experiment instrument

采用NST标定过的30W V03型标准氙灯作为入射光源,由于氙灯发射谱为连续谱,故使用一单色仪进行分光,并由标准探测器标定光强。单色仪后接阀门控制入射进样机的光强并用标准光度计随时检测,以保证入射光强在各波长亮度范围以内^[13,14]。样机置于真空罐内,用万向阀控制位置,并用分子泵配合液氮冷阱抽真空至10⁻³ Pa。

取分布在120~180 nm波段的15个波长,反复测量30次,得到整个系统分别在2个探测器工作下各个波长的响应度曲线,如图4所示。

探测器允许的最大计数率在100 kHz左右,而各波长最大亮度输入下的光子计数率约为80 kHz,因此探测器不会达到饱和状态,且由前面计算已经保证最小亮度在探测范围以内。

测量SNR的方法是用多次测量的算术平均值做为信号值,再用其均方根误差求得均方根噪声值,两者之比即为SNR。设n次测量值为s₁,s₂,...,s_n,则有

$$S = \frac{1}{n} \sum s_i, N = (\sum (s_i - s)^2 / n)^{1/2}$$
$$SNR = S / N$$

(7)

根据系统响应度测试得到的30次测量值进行计算,用系统响应度乘以各自波长的最小亮度值以及色散后在像面上每

条线所占的像素数, 获得信号值, 由式(17)可得系统在2个不同表面探测器的各个波长在灵敏度输入下的 SNR 如图5所示。

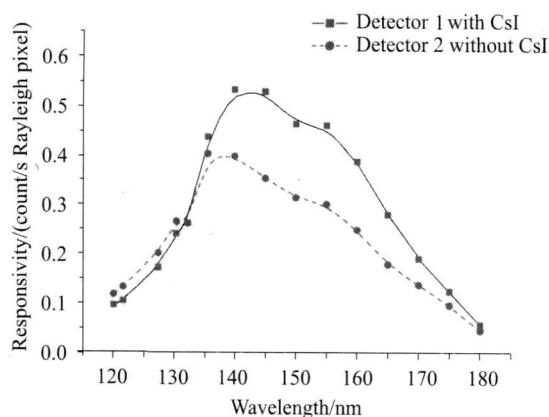


图4 系统响应度分布

Fig.4 The distribution of responsivities of the system

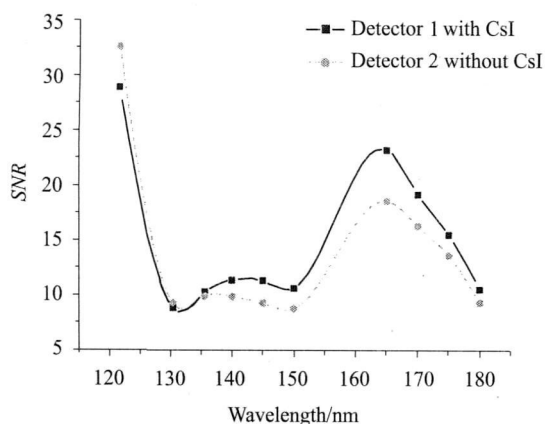


图5 系统在两种探测器下的各波长 SNR 实验测量值

Fig.5 Experiment SNRs of different wavelengths for the system with two different detectors

理论值与实验值的误差对比, 如图6所示。

由图6可见, 理论值与实测值存在一定的误差。由于FUV波段信号的微弱性, 这个误差被认为是可以接受的。对比两种探测器表面发现, 没有镀CsI的探测器表面 SNR 相对误差要略小于CsI的探测器表面 SNR 误差。这可能是由于长时间测量, 使得膜层光电阴极衰减导致的。但是, 由于不镀膜的探测器表面量子效率低, 在系统进行探测工作时并不会长期使用, 这个探测器起到的作用实际上是定期进行检验, 以保证另一镀膜探测器输出的准确性。

4 结 论

1) 利用信号统计理论中的阈值探测原理, 通过引入探测概率因子和虚警概率因子, 得到了120~180 nm成像光谱仪的灵敏度和 SNR 模型;

2) 根据样机指标, 详细计算了系统可以达到的灵敏度和各个波长在不同探测器下最小亮度输入时的 SNR ;

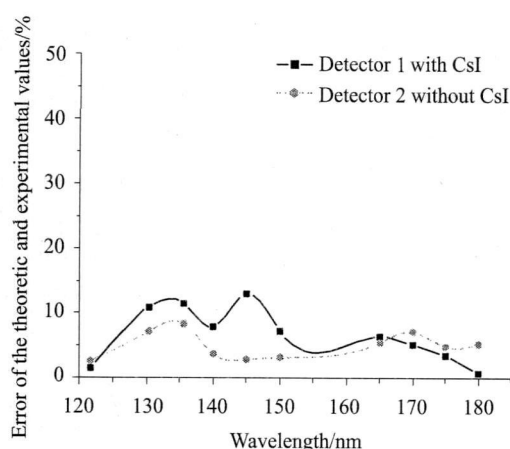


图6 系统在两种探测器下的各波长理论值和实验值误差分布

Fig.6 Distribution of the errors of different wavelengths theoretical values and experimental values for the system with two different detectors

3) 设计了相应的实验系统, 得到了两种探测器下的系统 SNR , 测的数据与理论计算数据基本相符, 误差在允许范围内。

结果表明, 本文方法对FUV电离层成像光谱仪的 SNR 计算完全适用, 并可用于类似的系统的 SNR 模型建立。对于其它的系统, 分析结果的不同仅取决于光学系统的差别和探测器参数的改变, 而思路基本一致。通过这种方法得到了原理样机的 SNR 指标, 为以后的工作奠定了基础。

参考文献:

- [1] ZHENG Ye-quan, WANG Hui, WANG Yi-fan. Selection and design of optical systems for spaceborne hyperspectral imagers [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(11): 2629-2637.
- [2] Paxton L J, Christensen A B, Morrison D, et al. GUM: A hyperspectral imager for geospace[J]. Proc. of SPIE, 2004, 5660: 228-239.
- [3] Robert P McCoy, Kenneth F Dymond, Gilbert G Fritz, et al. Special sensor ultraviolet limb imager: an ionospheric and neutral density profiler for the Defense Meteorological Satellite Program satellites[J]. Optical Engineering, 1994, 33(2): 423-429.
- [4] Phillip C Kalmanson, Janusz Wilczyrnske, Kent Wood, et al. The Optomechanical Design and Operation of the Ionospheric Mapping and Geocoronal Experiment[A]. Proc. of SPIE[C]. 2005, 5901: 59010Q-1-59010Q-14.
- [5] Schenkel F W, Ogorzalek B S, Larrabee J C, et al. Ultraviolet daytime auroral and ionospheric imaging from space[J]. Ap-

- plied Optics, 1985, **24**(20): 3395-3405.
- [6] MIU Zhen-hua. A single photon imaging system based on wedge and strip anodes detector, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS. 2008, 33-40.
缪震华. 基于楔条形阳极探测器的单光子成像系统[D], 西安: 西安光机所, 2008, 33-40.
- [7] ZHANG Ji-long, WANG Ming, TIAN Er-ming, et al. Analysis and experimental verification of sensitivity and SNR of laser warning receiver[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, **29**(1): 20-23.
张记龙, 王明, 田二明, 等. 激光告警接收机灵敏度和信噪比分析及实验验证[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, **29**(1): 20-23.
- [8] WANG Jia-peng, WANG Shu-rong, SONG Ke-fei, et al. Image noise suppression and performance evaluation of ICCD[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2008, **19**(8): 1032-1038.
王加朋, 王淑荣, 宋克非, 等. 像增强器 CCD 的噪声抑制和性能评价[J]. 光电子 • 激光, 2008, **19**(8): 1032-1038.
- [9] WANG Gui-hua. Photoelectron device[M]. first edition. Beijing: National Defense Industry Press. 2009. 101.
汪贵华. 光电子器件, 第一版[M]. 北京: 国防工业出版社. 2009. 101.
- [10] Goldsten J O, Humm D C, Paxton L J, et al. Performance of the wedge and strip micro-channel plate detectors and electronics for the Global Ultraviolet Imager[A]. Proc of SPIE[C]. 1998, **3765**: 408-416.
- [11] Whalen A D. Detection of Signals in Noise, first edition[M]. Academic Press New York and London, 1971. 145.
- [12] Daniel Morrison, Larry Paxton, Dave Humm, et al. On-orbit calibration of the special sensor ultraviolet scanning imager (SSUSI) a far-UV imaging spectrograph on DMSP F16[J]. Proc of SPIE[C]. 2002, **4485**: 328-337.
- [13] HUANG Yu, WANG Shu-rong, ZHANG Zhen-duo, et al. Spectral irradiance calibration of remote sensing ultraviolet spectral radiometer in space[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2008, **19**(4): 466-469.
黄煜, 王淑荣, 张振铎, 等. 空间遥感紫外光谱辐射计辐照度定标研究[J]. 光电子 • 激光, 2008, **19**(4): 466-469.
- [14] XUE Qing-sheng, WANG Shu-rong, YANG Xiao-hu, et al. Spectral radiance responsivities calibration of limb imaging spectrometer[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2010, **21**(3): 406-410.
薛庆生, 王淑荣, 杨小虎, 等. 临边成像光谱仪光谱辐射亮度响应度定标研究[J]. 光电子 • 激光, 2010, **21**(3): 406-410.

作者简介:

于 磊 (1984-), 男, 博士研究生, 主要从事紫外遥感仪器设计及图像遥感处理的研究.