

115~180 nm 远紫外临边成像光谱仪信噪比分析与验证

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

摘要 115~180 nm 远紫外临边成像光谱仪原理样机是针对电离层探测而开发的预研空间光谱仪器。由于远紫外波段的特殊性, 仪器所能接收到的信号非常微弱, 因此灵敏度和信噪比就成为了衡量性能的重要指标。该文根据信号统计检测理论, 在阈值理论的基础上, 提出了计算这种仪器的灵敏度和信噪比的方法。首先分析了接收信号和系统噪声的概率分布, 然后引入探测概率和虚警概率因子, 从而推导出仪器的灵敏度与信噪比的计算表达式。根据灵敏度计算和电离层中探测粒子辐射波长的亮度范围, 可知仪器的灵敏度能够满足探测需求。之后对仪器的信噪比进行了理论计算, 并建立了相关的实验系统进行验证, 结果表明, 由该方法计算出的结果和实验结果之间的误差在允许范围内, 因此是合理的。

关键词 远紫外; 灵敏度; 信噪比; 阈值理论; 响应度

中图分类号: TH753 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2010)11-3156-05

引言

电离层探测研究的主要波段为 115~180 nm 的远紫外区域。由于该波段自身光谱辐射弱, 且被大气强烈吸收, 在地面上很难进行有效的观测; 而电离层又极易受到扰动, 变化快, 动态范围大, 因此如何进行有效的空间探测就成为了研究的焦点。目前, 国际上应用于探测的先进空间研究仪器, 其结构主要分为光栅衍射型, 如 AIM, AIRS, GUVI 和 SSULI 等, 和滤光片透射型, 如 IMAGER 等^[1-4]。国内现在暂时没有同类的仪器应用。

临边探测是一种新兴的空间观测方式, 具有空间、时间覆盖率高, 垂直分辨率高的优点^[5], 非常适合于电离层探测。

为实现对电离层探测的预研, 试制了远紫外临边成像光谱仪原理样机, 光学系统由一片离轴抛物镜和 CT 系统组成, 镜片数量少, 光损耗低, 适用于微弱信号探测; 使用 WSZ 阳极探测器作为接收器件, 通过对光子脉冲的计数得到光谱信息。整机的响应度和信噪比是衡量系统性能的重要指标, 本文结合信号统计检测理论对它们进行了理论分析, 并由样机系统进行了实验验证。结果表明, 理论计算与实验结果基本符合, 得出的信噪比满足探测要求, 为以后工作的

开展奠定了基础。

1 光谱仪信号分析与公式推导

光源的光功率由探测目标单位时间内发射的光子数或光子发射速率可表示为

$$P = \nu_p E_p = \nu_p h\nu \quad (1)$$

式中: ν_p 是光子的发射速率, h 是普朗克常量 ($6.62 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$), ν 是光的频率。

Rayleigh(R)是一个测量光源空间延伸绝对角平面亮度的单位, 它由每单位表面积的光子发射速率来描述光谱辐射亮度, 是国际上用于微弱光探测的常用单位。与光强辐亮度 $L (\text{W} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{sr})^{-1})$ 之间的关系为

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

式中: λ 为光波长, 单位为 μm 。且

$$P = LA\Omega \quad (3)$$

式中: A 为有效入射面积, Ω 为立体角。

式(1)~(3)联立可得微弱光辐射源的光子发射速率

$$\nu_p = P/E_p = \frac{RA\Omega_r}{2\pi\lambda E_p} \times 10^{-13} \quad (4)$$

这个光子发射速率是光源入射在仪器光学系统接受表面上的速率, 系统实际计数率要低于这个值, 表述为

收稿日期: 2010-01-25, 修订日期: 2010-05-02

基金项目: 国家(863计划)基金项目(2009AA12Z151)和应用光学国家重点实验室基金自主项目资助

作者简介: 于磊, 1984年生, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士 e-mail: top1gods@email.ustc.edu.cn

* 通讯联系人 e-mail: wsrong@ciomp.ac.cn

$$\nu_c = \eta_p \quad (5)$$

其中 $\eta = \varepsilon\tau$, ε 为光阴极的量子效率, τ 为光学系统的传输效率。

在进行信噪比计算时, 需要把信号和噪声值归一化为电流或电压。这里采用电流单位归一化, 探测信号电流可以表示为

$$I_s = e\nu_c \quad (6)$$

式中: e 为一个电子的电荷量, 单位是库仑。

2 光谱仪噪声分析与公式推导

仪器的噪声主要由系统外部的背景噪声和系统内部噪声组成。外部背景噪声主要有以下几个: (1) 地面和日光辐射; (2) 各种物体的漫反射光; (3) 紫外星辐射。地球可视为 300 K 的黑体, 当辐射波长小于 200 nm 时, 地球辐射可以不考虑; 太阳被视为 5 900 K 的黑体, 在 200~1 500 nm 内的辐射很强, 在 200 nm 以下则影响很小, 而光学系统中铝+氟化镁的膜层及光栅的有效色散光谱范围也可以使得这部分噪声被有效的去除; 仪器使用了遮光罩和内置隔板极大地抑制了其他物体的漫反射带来的杂散光, 因此(2)这种噪声源同样可以近似忽略; 系统采用了成像和定标两种模式, 紫外星辐射只在定标模式下才对系统产生作用, 因此这种噪声源也可不予考虑。系统内部噪声则主要有热噪声、散粒噪声、产生-复合噪声、 $1/f$ 噪声和温度噪声几种^[6]。这几种噪声虽然各自所服从的概率分布并不完全一致, 但由于其统计意义彼此独立, 根据中心极限定理, 系统的总噪声可视为各种噪声加权和并趋向于高斯过程, 因此系统噪声是服从高斯正态概率分布假设的。均方噪声 σ_n^2 的完整表达式可以写作

$$\sigma_n^2 = \sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{dark}}^2 + \sigma_{\text{reset}}^2 + \sigma_{1/f}^2 + \sigma_{\text{af}}^2 \quad (7)$$

式中各项解释如下:

(1) 散粒噪声主要由入射光子数的随机变化而产生

$$\sigma_{\text{shot}}^2 = 2e \sum I_s \Delta f G_d \quad (8)$$

其中 $\sum I_s$ 为各噪声产生的电流之和, Δf 为系统的噪声带宽, G_d 为光电探测器的增益。根据光阴极对各个波长的响应度可以确定噪声电流, 式(8)可进一步写为

$$\sigma_{\text{shot}}^2 = 2e\tau_n G_n M_r A_r R_\lambda \Delta f G_d \quad (9)$$

式中: τ_n 为系统对背景光的传输效率, G_n 为系统对背景光的光学增益, M_r 为系统所在平面背景光辐照度, A_r 为系统有效接收面积, R_λ 为探测器接受面的平均光谱响应率。

(2) 暗电流噪声

$$\sigma_{\text{dark}}^2 = 2eI_{\text{dark}} \Delta f G_d \quad (10)$$

暗电流 I_{dark} 主要来源于微通道板和光电阴极的暗计数, 可以用等效输入电流 EEI 来替换

$$EEI = I_d / G \quad (11)$$

式中: G 为微通道板的增益, 该值与材料、结构、电压和入射电子有关^[7,8], 一般写作

$$G = F \frac{\delta_1}{2} \left(\frac{U}{c\alpha} \right)^{a/4} \left(\frac{U+c\alpha}{U} \right) \exp(-0.65h) \quad (12)$$

式中: F 为开口面积比; δ_1 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 随着电压的升高而增加并逐渐趋于饱和。暗噪声是探测器和样机系统的主要噪声来源。

(3) 复位噪声

$$\sigma_{\text{reset}}^2 = kTC/q \quad (13)$$

(4) 热噪声

$$\sigma_T^2 = \frac{4kT\Delta f}{R_L} \quad (14)$$

式中: k 为波尔兹曼常数, T 为温度, C 为电容, R_L 为电阻, q 为电荷量。

(5) 放大器噪声: σ_{af}^2 。

(3)~(5) 噪声总和称为探测器输出噪声, 记为 σ_k^2 。

根据以上分析得到噪声均方根值

$$\sigma_n = \sqrt{2e(\tau_n G_n M_r A_r R_\lambda + I_{\text{dark}}) \Delta f G_d + \sigma_k^2} \quad (15)$$

放大器噪声和复位噪声可以通过相关技术和器件选择很好的去除, WSZ 探测器的热噪声又很小。因此散粒噪声和暗电流噪声是主要的信噪比限制瓶颈。

3 光谱仪信噪比和灵敏度的概率模型与公式计算

根据阈值探测理论^[9,10], 系统存在探测概率 P_d 和虚警概率 P_f , 也就是说, 仪器可能将本不存在的信号(或噪声)作为信号探测出来, 也可能将信号作为噪声进行辨识。这两种错误对于仪器来说是同样重要的, 因此我们用最小错误概率准则来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。由此得出

$$P_d = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\text{sn}}} \int_{Y_1}^{\infty} dy \int_{I_t}^y \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_{\text{sn}}^2}(i - I_{\text{sn}})^2\right) di \quad (16)$$

$$P_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \int_{Y_1}^{\infty} dy \int_{I_t}^y \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_n^2}(i - I_n)^2\right) di \quad (17)$$

式中: σ_{sn} 为信号和噪声和的均方根, I_{sn} 为信号和噪声的平均电流之和, I_n 为噪声电流, I_t 为系统可探测最小信号形成的电流。在最小错误概率准则下 $Y_1 = 1/2$ 。令探测概率因子为 ξ_d , 虚警概率因子为 ξ_i , 由式(16)和(17)可以获得如下两式

$$\xi_d = \frac{I_t - I_{\text{sn}}}{\sqrt{2}\sigma_{\text{sn}}} = \text{erfc}^{-1}(2p_d) \quad (18)$$

$$\xi_i = \frac{I_t - I_n}{\sqrt{2}\sigma_n} = \text{erfc}^{-1}(2p_i) \quad (19)$$

其中 $\text{erfc}^{-1}(x)$ 为互补误差函数的反函数。

消去 I_t 获得信号电流方程

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

解此方程得到

$$I_s = \sqrt{2}(\xi_i - \xi_d)\sigma_n + 2\xi_d^2 e\Delta f G_d \quad (20)$$

为了保证所需要的探测概率和虚警概率都可以达到要求, 必须要获得系统实际的最小可探测亮度, 入射光所产生的光电流从能量角度可表示为

$$I_s = G_c e\eta \frac{RA\Omega_r}{2\pi\lambda E_p} \times 10^{-13} \quad (21)$$

二式相除获得系统的最小可探测亮度(即系统灵敏度)为

$$R = \frac{\sqrt{2}(\xi_i - \xi_d)\sigma_n + 2\xi_d^2 e \Delta f G_d}{G_c e \eta \frac{R A \Omega_r}{2 \pi \lambda E_p} \times 10^{-13}} (R) \tag{22}$$

由以上各式可得系统在灵敏度输入下的信噪比为

$$SNR = \frac{I_s}{\sigma_n} = \frac{G_c e \eta \frac{R A \Omega_r}{2 \pi \lambda E_p} \times 10^{-13}}{\sqrt{2e(\tau_n G_n M_r A_r R_\lambda + I_{dark}) \Delta f G_d + \sigma_R^2}} \tag{23}$$

4 信噪比的理论计算与实验对比

4.1 理论计算

电离层中主要粒子^[11]分布如表 1。

Table 1 Particles parameters and distribution

	波长/nm	分布高度/km
H ⁺	121.6	80~120
O I	130.4	120~140
O II	135.6	180~500
N ₂	140~150, 165~180	140~180

Table 2 Centre wavelengths airglow intensities

Wavelength/nm	Day Intensities		Night Intensities		Auroral Intensities	
	maxR	minR	maxR	minR	maxR	minR
121.6	30 000	2 000	10 000	500	5 000	500
130.4	20 000	1 000	300	20	20 000	100
135.6	4 000	50	200	15	4 000	50
140~150	1 000	15	n/a	n/a	3 000	50
165~180	500	120	n/a	n/a	2 000	400

电离层数据反演主要来源于 121.6, 130.4, 135.6, 140~150 和 165~180 nm 这几个中心波长和波段。取 10 个波长值分布于这些波段内，将各波长的最小亮度代入式(23)，可得系统在各个波长下的信噪比为。

Table 3 Theoretical SNRs of different wavelengths

波长/nm	信噪比	波长/nm	信噪比
121.6	30.66	150	9.08
130.4	9.73	165	21.66
135.6	8.87	170	21.73
140	12.79	175	14.84
143	12.72	180	9.39

4.2 实验验证

系统性能验证实验装置如图 2 所示。

采用 NIST 标定过的 V03 型 V0248 号 30 W 标准氙灯作为入射光源，将参考光度计与样机系统对称放置于真空罐内，用分子泵抽真空至 10⁻³ Pa，入射光经漫反板进入样机和光度计中，根据参考光度计的读数调节阀门，从而控制光源输入信号的强度^[13]。

取分布在 115~180 nm 波段的 15 个波长，反复测量 50 次得到系统各个波长下的响应度曲线，如图 3。

样机光学系统如图 1。

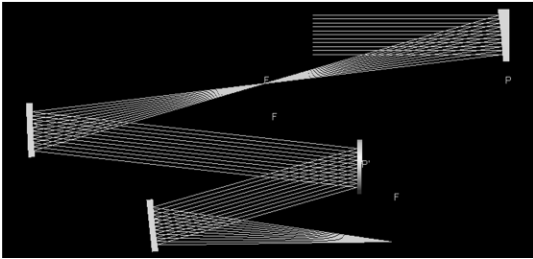


Fig 1 Optical schematic of the system

该光学系统 F 数 4.98，焦距 125 mm，经标准探测器标定得到传输效率为 17%，探测器接收表面有效面积为 1.4 cm²。微通道板镀层量子效率平均约 10%，光电增益为 10⁶。

由系统技术指标及式(18)和(19)可得探测概率因子为 -0.99，虚警概率因子为 4.51。代入式(22)可推算出系统灵敏度能测到 1R 以下，也就是说，只要入射光的亮度大于 1R，就能保证两个因子满足需求，根据电离层探测波长的亮度分布^[12](表 2)，可知系统完全能进行有效的探测。

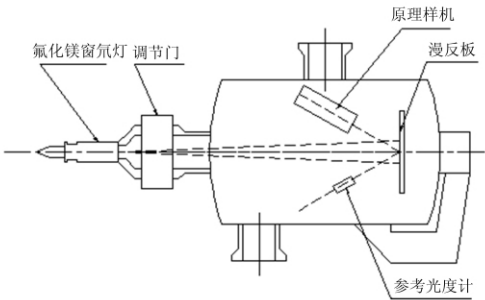


Fig 2 The general view of the experiment instrument

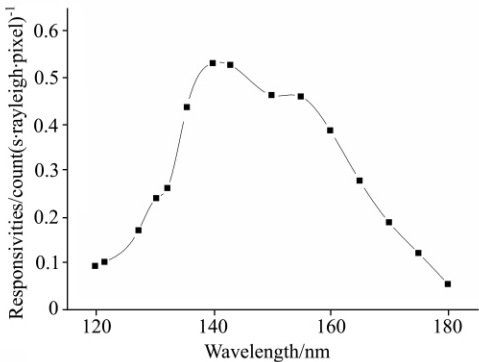


Fig 3 The distribution of responsivities of the system

根据响应度分布可知最大亮度下计数率约为 80 kHz,而探测器允许最大计数率在 100 kHz 左右,因此探测器不会达到饱和。

测量信噪比的方法如下:设 n 次测量值为: x_1, x_2, \cdots, x_n , 则有

$$S_e = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i$$
$$N_e = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$
$$SNR = S_e / N_e$$

(28)

根据之前得到的 50 次测量值进行计算,用系统响应度乘以对应波长的最小亮度值,以及色散后在像面上所占的像素数(色散后呈线排列,每条线占 16 个像素)获得信号值。由式(28)可得各个波长在灵敏度输入下的信噪比如表 4。

Table 4 Experimental SNRs of different wavelengths

波长/nm	信噪比	波长/nm	信噪比
121.6	28.82	150	10.48
130.4	8.07	165	23.11
135.6	10.17	170	19.01
140	11.24	175	15.32
143	11.2	180	10.3

理论值与实验值对比如图 4,理论值和实验值相对误差列于表 5。

理论值与实测值存在一定的误差,但是由于信号的微弱性和远紫外波段的特殊性,这个误差被认为是可以接受的。

5 结 论

利用信号统计理论中的阈值探测原理,引入了探测概率

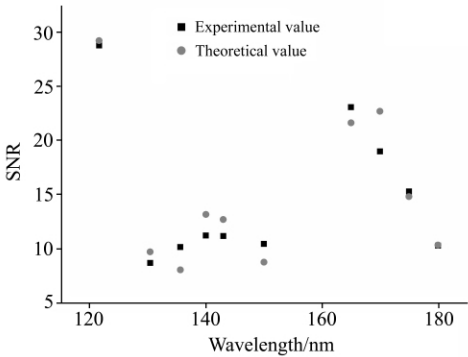


Fig 4 Distribution of the theoretical values and experimental values

Table 5 The errors of the theoretic and experimental values

波长/nm	误差/%	波长/nm	误差/%
121.6	6.4	150	13.4
130.4	11.8	165	6.3
135.6	12.8	170	14.3
140	13.8	175	3.1
143	13.6	180	8.8

因子和虚警概率因子,推导出了 115~180 nm 远紫外临边成像光谱仪原理样机的最小灵敏度输入和信噪比公式。为了验证推导结果的正确性,首先根据样机指标详细计算出了系统可以达到的灵敏度,证明系统的裕度是足够的;之后计算出了系统各个波长在实际最小亮度下输入时的信噪比,并建立了相应的实验进行验证,实验结果与理论计算基本相符,表明这种分析方法完全可以用于类似系统的信噪比计算。通过这种方法的分析,得到了原理样机的信噪比指标,为以后的工作奠定了基础。

参 考 文 献

[1] Schenkel F W, Ogorzalek B S, Larrabee J C, et al. Applied Optics, 1985, 24(20): 3395.

[2] Paxton L J, Christensen A B, Morrison D, et al. Proc. of SPIE, 2004, 5660: 228.

[3] McCoy Robert P, Dymond Kenneth F, Fritz Gilbert G, et al. Optical Engineering, 1994, 33(2): 423.

[4] Kalmanson Phillip C, Wilczynske Janusz, Wood Kent, et al. Proc. of SPIE, 2005, 5901: 5901Q-1.

[5] Mager Rolf, Fricke Wolfgang, Burrows John, et al. Proc. SPIE, 1999, 3106: 84.

[6] ZENG Qing-yong(曾庆勇). Weak Signal Detection, Second Edition(微弱信号检测·第 2 版). Hangzhou: Zhejiang University Press(杭州:浙江大学出版社), 2002. 156.

[7] WANG Gui-hua(汪贵华). Photoelectron Device, First Edition(光电子器件·第 1 版). Beijing: National Defense Industry Press(北京:国防工业出版社), 2009. 101.

[8] LI Min, FAN Xian-hong, NI Qi-liang, et al(李 敏, 范鲜红, 尼启良, 等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2008, 16(1): 1.

[9] Whalen A D. Detection of Signals in Noise(First edition). New York and London: Academic Press, 1971. 145.

[10] ZHOU Li-wei(周立伟). Target Detection and Identification(目标探测与识别). Beijing: Beijing Institute of Technology Press(北京:北京理工大学出版社), 2004. 293.

[11] Christensen Andrew B, Walterscheid R L, Ross M N. SPIE, 1994, 2266: 451.

[12] Morrison Daniel, Paxton Larry, Humm Dave, et al. Proceeding of SPIE, 2002, 4485: 328.

[13] ZHANG Zhen-duo, WANG Shu-rong, LI Fu-tian(张振铎, 王淑荣, 李福田). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2009, 17(3): 482.

Analysis and Experimental Verification of SNR for a Far Ultraviolet Imaging Spectrograph in 115–180 nm

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

1. 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

Abstract An 115–180 nm far ultraviolet limb imaging spectrograph prototype was developed for the detection of the ionosphere. For the particularity of the wavelength band in far ultraviolet, the signals accepted by the instrument are very weak. So the sensitivity and signal-noise-ratio (SNR) are two important performance parameters for the spectrograph. In the present paper, based on the signal statistical detection theory and the threshold detection theory, a method for calculation of the sensitivity and SNR has been proposed. Firstly, the probabilities of the accepted signals and system noises were analyzed. Secondly, the mathematical expressions of sensitivity and SNR of the instrument were deduced by introducing the detection probability factor and the false alarm rate factor. Based on the calculation of the sensitivity and the intensity of the particles radiation wavelengths, it was found that the sensitivity can meet the need of the detection. Finally, the SNR of the instrument were analyzed by using the method, and the coherent experiment was built to prove the results. The error of theoretic calculation and experimental results can be accepted. It indicates that the SNR analysis method is feasible.

Keywords Far ultraviolet(FUV); Sensitivity; Signal-noise-ratio (SNR); Threshold theory; Responsivity

(Received Jan. 25, 2010; accepted May 2, 2010)

* Corresponding author