

星载全球电离层与大气驱动力耦合临边观测 远紫外成像光谱仪

于磊*, 陈结祥, 薛辉

中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031

摘要 研究了一种星载太阳同步轨道远紫外成像光谱仪, 以满足对低层大气驱动力与电离层之间耦合作用探测的科学需求。仪器拟采用双侧向临边探测方法, 对电离层中在远紫外波段产生昼夜不同特征辐射的各种粒子的光谱辐射强度进行探测, 进而定量获取低层大气驱动力的影响。根据探测机理, 进行了仪器系统观测方案设计、仪器性能参数与系统设计、原理样机系统集成、性能测试和地面辐射定标等研究, 该研究为我国未来电离层远紫外成像光谱探测提供一种思路。

关键词 测量; 成像光谱仪; 电离层; 远紫外; 辐射定标

中图分类号 O433.1; TH744.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1212003

Far Ultraviolet Imaging Spectrometer for Space-Borne Global Ionosphere and Atmospheric Driver Connection Limb Observation

Yu Lei*, Chen Jiexiang, Xue Hui

Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract A space-borne far ultraviolet imaging spectrometer working at the sun-synchronous orbit is studied, which is used to satisfy the scientific requirements of the connection and coupling detection between the low atmospheric driver and ionosphere. The instrument is designed to detect the spectral intensities of various particles in the ionosphere, which produce the characteristic radiation different at day and night in the far ultraviolet band, by the two-side lateral limb observation method. Then the influence of the low atmospheric driver is further acquired quantitatively. According to the detection mechanism, the observation scheme for instrument system is designed, the instrument performance parameters and system design, integration of prototype system, performance test, ground radiation calibration, and others are investigated. This research provides a new way in the future far ultraviolet imaging spectral observation of the ionosphere.

Key words measurement; imaging spectrometer; ionosphere; far ultraviolet; radiation calibration

OCIS codes 120.0280, 120.4570, 120.6200, 300.6190

1 引 言

电离层连接着低层大气与高层空间环境, 是日地空间环境组成中的重要部分。电离层内部主要组成为各种电离态粒子, 表现出显著的电动力学性质。这种特性极易受到太阳能量输入和地球环境变化的扰动, 给人类的生产生活带来影响。电离层不均匀结构会使电磁波信号的振幅、相位和到达角等发生随机起伏, 形成电离层闪烁, 影响通信与 GPS 导航;

热层暴会使航天器飞行发生偏差, 增大航天器飞行阻力, 减短其运行寿命; 在电离层 F 域分布的氧原子容易与航天器表面发生复杂的物理和化学反应, 从而使传感器的性能降低。通过对电离层进行监测, 可以实时反映太阳、地球地磁以及大气层的活动变化^[1-3]。电离层探测最早起源于地基无线电探测, 目前电离层探测仪器主要有测高仪、高频多普勒接收机、信标闪烁接收机、大功率散射雷达等^[4]。这类探测方式对电离层的空间覆盖率有限, 需要大量的

收稿日期: 2018-06-25; **修回日期:** 2018-08-13; **录用日期:** 2018-08-28

基金项目: 国家自然科学基金(41504143)、中国科学院科研装备研制项目(YJKYYQ20170048)、中国科学院青年创新促进会人才项目(2016203)

* **E-mail:** top1gods@mail.ustc.edu.cn

地面观测站。随着科学技术的发展,天基探测逐渐成为电离层探测的重要手段,主要包括 GPS 掩星观测和空间光学仪器探测。GPS 掩星观测可得到电子总含量和闪烁,以极高的垂直分辨率反演电子密度剖面,其局限性在于时间分辨率相对较低,需要进行卫星星座组网^[5]。空间光学仪器探测可最快、最直接的获取电离层信息,包括对电离层的中尺度结构时空特征的获取,以及对电离层的内部各种粒子(主要是 H、O 和 N₂)在耦合和能量传输过程中产生的不同辐射光谱强度的获取。电离层远紫外成像光谱探测技术可实现成像和精细光谱分辨,它能帮助研究人员掌握电离层的组成和变化信息^[6]。

国外的星载电离层远紫外成像光谱探测技术最早始于 20 世纪 80 年代,极光电离层遥感器(AIRS)是早期较具代表性的仪器^[7],其光谱分辨率达到 3 nm,空间分辨率为 6.5 km,工作波段为 115~180 nm。20 世纪 90 年代以后,远紫外成像光谱探测技术开始得到了长足的发展,先后有三种重要载荷成功发射并开始业务化运行,包括美国军用卫星星座上的特殊传感器紫外临边成像仪(SSULD)和特种传感器紫外光谱成像仪(SSUSI),以及全球热层、电离层和磁层监测计划中的 GUVI(Global Ultraviolet Imager)^[8-10]。这些仪器的光谱分辨率最高可以达到 1.2 nm,空间分辨率达 6 km,覆盖远紫外波段,通过全天候的天底和临边观测提供全球电离层信息,帮助科学家们基本理解了太阳活动对电离层的影响机制。近年来,随着研究的深入,研究人员发现低层大气等下层驱动力同样会对电离层产生影响,特别是在低纬电离层中,这种表现更为明显。为了实现这种低层大气与电离层耦合关系的观测,美国预计于 2018—2019 年发射电离层连接探测器(ICON)并进行临边和面的全球尺度观察(GOLD)^[11-12]。

本文对适用于电离层与低层大气驱动力耦合过程监测的远紫外成像光谱仪的样机研制展开了研究,对仪器探测机理、方案与性能参数、高性能光学系统设计、光机结构设计集成、性能测试与辐射定标等工作进行了阐述。本研究将为同类仪器的工程应用提供一定的基础。

2 探测机理与观测方案设计

2.1 主要观测目标与观测环境参数设定

为了实现对电离层和低层大气驱动力耦合过程的监测分析,需要仪器具备以下定量信息的获取能力。在白昼,对 N₂ 的 LBH (Lyman-Birge-Hopfield)

带所辐射的 140~180 nm 和 OI 的 135.6 nm 特征光谱临边亮度进行探测;在夜间,对 O 离子与电子耦合时发射的 135.6 nm 特征光谱临边亮度进行测量。通过对比二者的反演数据,可以区分太阳驱动力和底层大气驱动力对电离层产生的不同影响。根据 GUVI 等的探测数据分析,可得到白昼和夜间的远紫外光谱辐射强度,如图 1 所示。设定远紫外成像光谱仪的工作波段为 135.6 nm 和 140~180 nm。

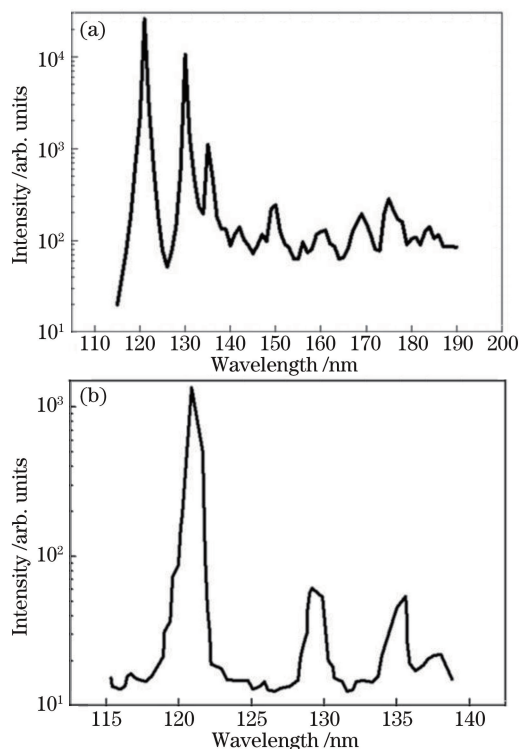


图 1 电离层远紫外光谱辐射强度图。(a)白昼;(b)夜间
Fig. 1 Far ultraviolet radiation intensity of ionosphere.
(a) At day; (b) at night

2.2 观测方案

仪器的工作轨道高度为 830 km,采用双边侧向临边扫描模式对电离层进行探测,观测模式如图 2

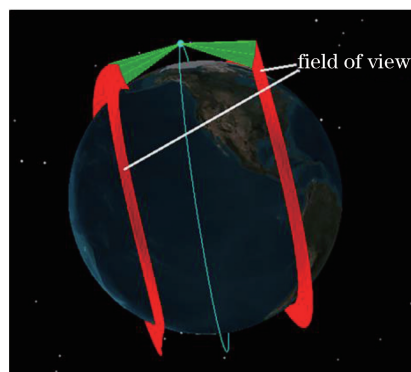


图 2 双边侧向临边观测图
Fig. 2 Two-side lateral limb observation

所示。

仪器到临边观测点的距离约为 3274.5 km, 单侧向临边高度扫描角为 8.5° , 对应电离层的临边高度范围为 50~500 km(即绿色覆盖部分); 仪器单侧向临边高度扫描观测用时 22 s, 扫描镜回扫 0.5 s, 之后进行另一边的临边摆扫; 完成一次双侧向临边探测用时 45 s, 此时仪器飞过约 315 km。为保证仪器的连续覆盖, 设定仪器视场角为 6° , 对应单侧向临边观测覆盖宽度超过 340 km。飞行器绕地球一周后可获得全球双侧向电离层信息(红色条带部分)。

3 远紫外成像光谱仪系统设计

3.1 成像光谱仪参数设定

根据科学需求和环境参数分析, 设定远紫外成像光谱仪的主要性能参数如表 1 所示。

表 1 远紫外成像光谱仪的性能参数

Table 1 Performance parameters of far ultraviolet imaging spectrometer

| Parameter | Value |
|---|-----------------|
| Waveband /nm | 130-180 |
| Spectral resolution /nm | ≤ 0.6 |
| Field of view /[($^\circ$) \times ($^\circ$)] | 6×0.046 |
| Pixel spatial resolution /mrad | 1 |
| Coverage of vertical height /km | 50-500 |
| Entrance aperture diameter /mm | 20 |
| Focal length /mm | 100 |

电离层空间远紫外波段辐射非常微弱, 相比大气辐亮度要低 6~7 个数量级^[13]。采用远紫外光子计数型楔形阳极位敏探测器作为仪器探测终端, 其组成主要包括氟化镁窗口、碘化铯光电阴极、多级层叠微通道板、阳极、后端放大电路和后续解码处理电路, 有效接收直径为 30 mm, 像元尺寸为 $40\ \mu\text{m}\times 40\ \mu\text{m}$, 具有高灵敏度。

3.2 光学系统设计

光学系统采用平面光栅反射式系统, 其组成和光学元件特点如图 3 所示。

该系统并非严格的 Czerny-Turner 系统, 从准直反射镜出射的光不是严格的准直光, 带有一定的发散角, 准直镜和聚焦镜均采用非球面反射镜形式, 以使系统实现像差的良好消除^[14]。光学系统各元件参数如表 2 所示。

最终光学系统设计结果如图 4 所示。可以看到, 像斑的点列图半径小于 $16\ \mu\text{m}$, 可完全被 $40\ \mu\text{m}$ 的像元包围, 边缘波长和中心波长的调制传递函数

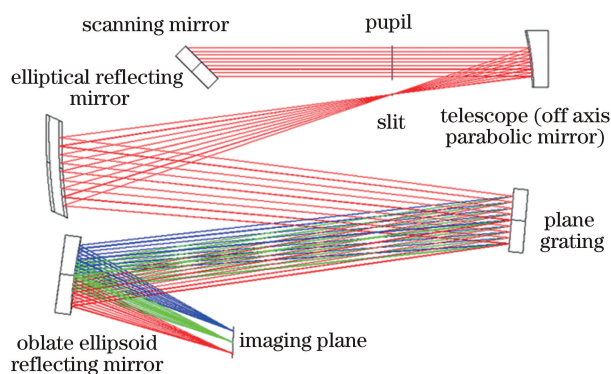


图 3 光学系统图

Fig. 3 Optical design layout

表 2 光学元件参数

Table 2 Parameters of optical elements

| Item | Characteristic |
|---|--------------------|
| Type of scanning mirror | Plane |
| Type of telescope | Off-axis parabolic |
| Radius of telescope /mm | 200 |
| Off-axis distance of telescope /mm | 30 |
| Size of slit /mm \times mm | 10×0.8 |
| Conic of collimating mirror (CM) | -0.174 |
| Radius of CM /mm | 376.97 |
| Type of diffraction grating (DG) | Plane |
| Density of DG /(line \cdot mm $^{-1}$) | 1200 |
| Conic offocusing mirror (FM) | 0.575 |
| Radius of FM /mm | 340 |
| Type of imaging plane (IP) | Plane |

(MTF)值在奈奎斯特频率(14 lp/mm)下均高于 0.5, 系统设计合理, 根据文献[15]计算得到该设计成像光谱仪的理论光谱分辨率约为 0.52 nm, 完全满足应用需求。

3.3 光学系统公差分析

通过 ZEMAX 软件中的蒙特卡罗法公差分析可以实现光学系统的公差模拟分析。预先设置公差范围, 通过模拟计算分析选定波长下的几何平均 MTF 值的下降数量来判断公差是否合理。各光学元件表面曲率半径公差为一个光圈, 中心厚度公差为 0.1 mm, X 方向和 Y 方向倾斜公差为 0.08° , 元件 X 方向和 Y 方向偏心公差为 0.05 mm, X 方向和 Y 方向倾斜公差 0.08° 。

在 150 nm 波长下, 根据以上设置进行软件分析, 列出最影响设计结果的参数, 如表 3 所示。

经过分析后, 在 150 nm 波长下, 90% 的 MTF 值高于 0.4996, 50% 的 MTF 值高于 0.5186, 10% 的 MTF 值高于 0.5277, 可以看出, 本系统设置的公差合理, 满足工程应用需求。

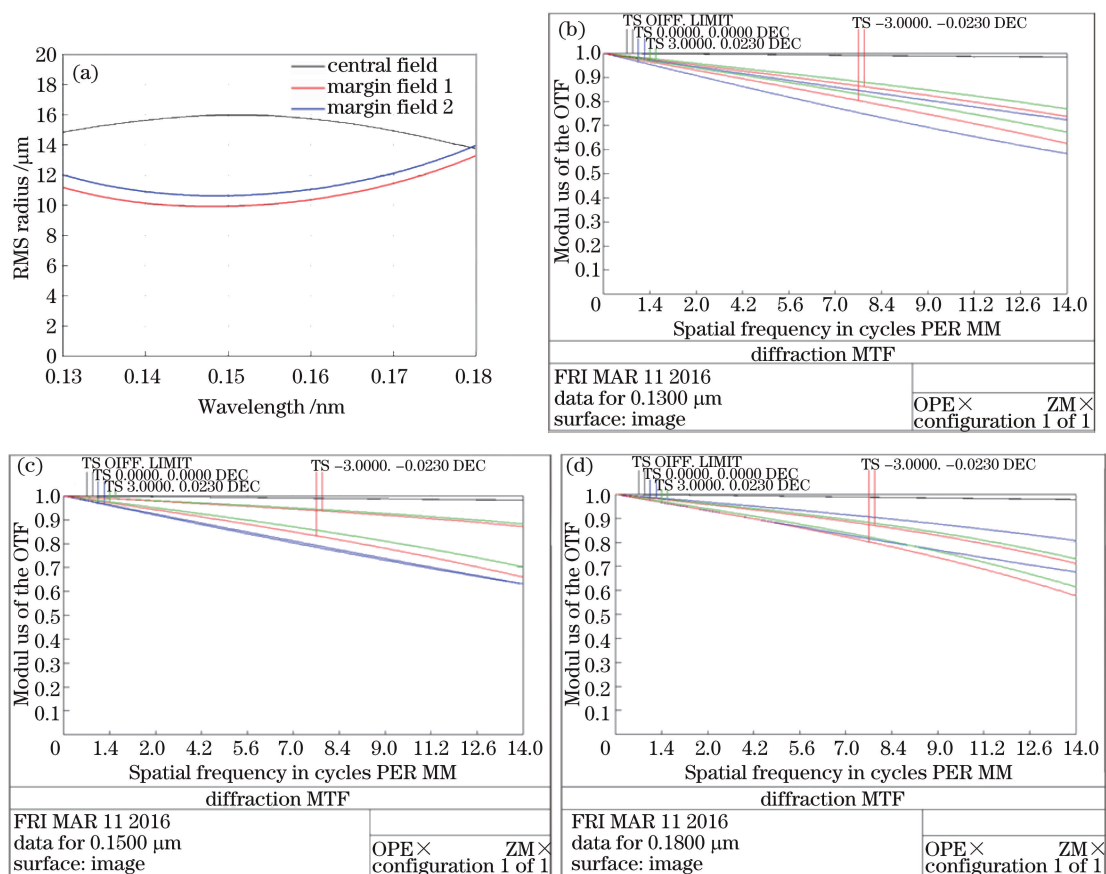


图 4 光学系统设计结果图。(a)点列图均方根(RMS)半径随波长的变化；(b) 130 nm 调制传递函数；
(c) 150 nm 调制传递函数；(d) 180 nm 调制传递函数

Fig. 4 Optical design results. (a) RMS spot radius versus wavelength; (b) MTF at 130 nm; (c) MTF at 150 nm;
(d) MTF at 180 nm

表 3 影响较大的公差结果

Table 3 Widely effective tolerance results

| Type | Surface | Value | Criterion | MTF change |
|---|---------|-------|------------|-------------|
| Tolerance on thickness | 2, 3 | 0.1 | 0.54468671 | -0.04965995 |
| Tolerance on thickness | 7, 8 | -0.1 | 0.54822912 | -0.04611753 |
| Tolerance on element tilts in X direction | 8, 8 | 0.08 | 0.55814887 | -0.03619778 |
| Tolerance on fringes | 11 | -2 | 0.56345131 | -0.03089534 |
| Tolerance on element tilts in Y direction | 8, 8 | 0.08 | 0.57682039 | -0.01752627 |

4 远紫外成像光谱仪系统集成、测试与定标分析

4.1 公差分析系统光学元件与光机结构

仪器所用的光学元件各光学镜片表面面型峰谷(PV)值优于 $\lambda/8$, RMS值优于 $\lambda/42$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$),光栅面型均方根(RMS)值优于 $\lambda/20$,表面均镀铝和氟化镁的混合膜层,130~180 nm波段的平均反射率高于70%,光栅平均衍射效率高于25%。光学元件和光机结构如图5所示。

4.2 辐射定标

远紫外波段在大气下完全不可见,可应用的远紫外标准仪器(如光源、真空系统和标准漫反射板等)相比其他波段的标准仪器而言定标误差更大,高精度的标准远紫外波段的朗伯体光源难以搭建,因此对于远紫外成像光谱仪而言,实现高精度辐亮度辐射定标非常困难。在对系统进行测试时,主要进行了辐照度标定^[16]。利用标准氙灯、真空紫外单色仪和准直系统组成了远紫外准直光源,并利用标准真空紫外探测器进行照度标定,获得标定后的光源辐照度。搭建的辐照度标定实验系统如图6(a)所

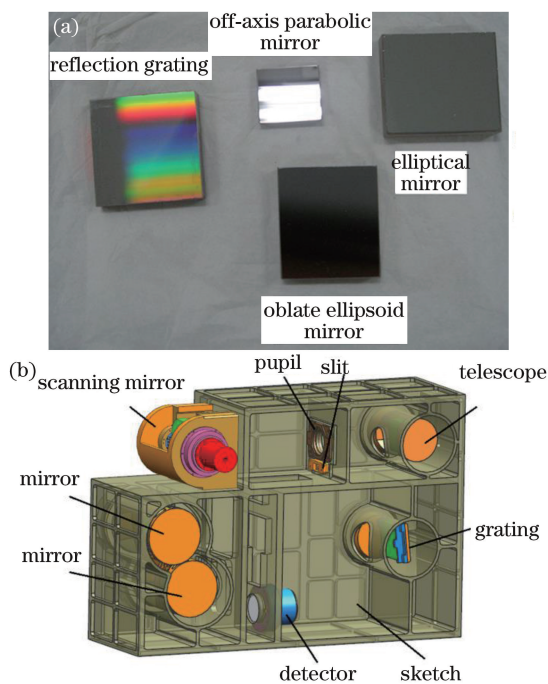


图 5 公差分析系统。(a) 光学元件；(b) 光机结构
Fig. 5 Tolerance analysis system. (a) Optical elements; (b) opto-mechanical structure

示, 获得的光谱辐照度响应度为

$$R(\lambda) = 1239.85 \cdot \frac{D(\lambda)}{\pi r^2 \cdot E_{QS}(\lambda) \cdot D'(\lambda)}, \quad (1)$$

式中 $D(\lambda)$ 为真空标准探测器读数, r 为系统接收面积半径, $E_{QS}(\lambda)$ 为真空紫外探测器标准量子效率, $D'(\lambda)$ 为系统读数。系统的辐照度响应度标定曲线图如图 6(b) 所示。

对样机系统的波长进行定标, 主要是确定各个通道内的中心波长的位置, 从而获得仪器各探测波长的光谱数据。在确定光谱通道序数 x 和 λ 之间的关系后, 将 $I(x)-x$ 曲线转换为 $I(\lambda)-\lambda$ 曲线。使用 Matlab 对采集的数据进行最小二乘法拟合, 获得了标准氘灯强谱线的远紫外光谱信号数据图和系统直接对氘灯信号进行采集测量后 130~180 nm 的光谱数据, 如图 7 所示。

4.3 性能测试分析

(1) 光谱分辨率测试分析

使用工作波段为 115~400 nm、波长精度为 0.01 nm 的高精度真空单色仪配合标准氘灯对样机系统进行测试, 测试波长为 171 nm, 单波长样机系统的测试结果如图 8 所示。测试获得的波长测试波形的半峰全宽为 0.55 nm, 该指标满足仪器科学应用需求, 并与理论计算值相近。

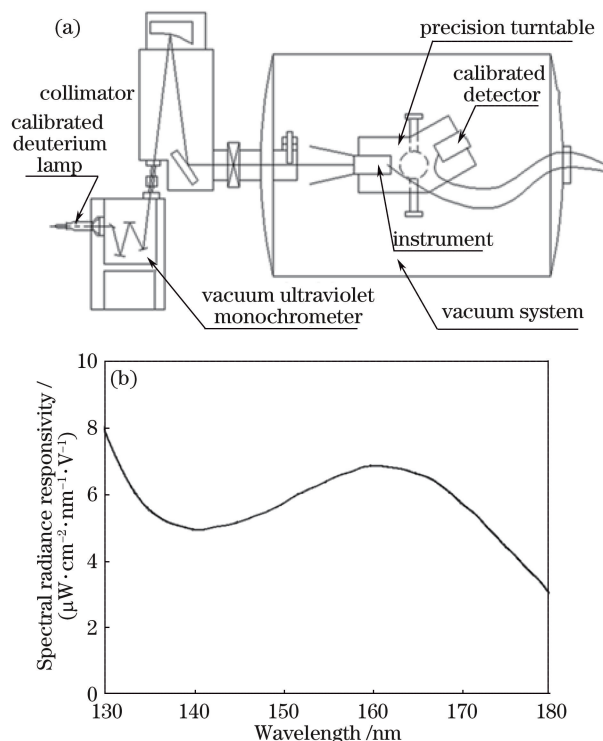


图 6 (a) 辐照度定标实验系统；(b) 系统辐照度响应度曲线
Fig. 6 (a) Experimental system used for irradiation calibration; (b) spectral radiance responsibility of system

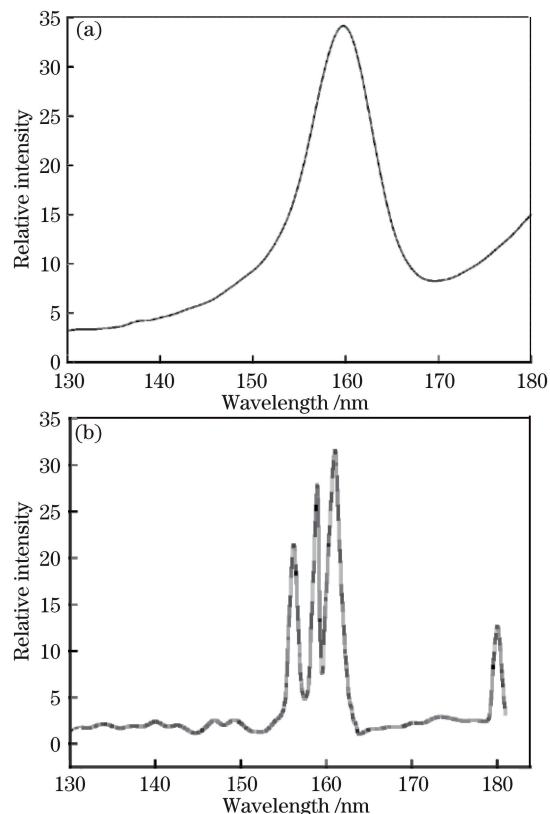


图 7 (a) 氘灯光谱图；(b) 仪器波长标定远紫外波段光谱图
Fig. 7 (a) Spectrum of deuterium lamp; (b) spectral calibration of instrument in far ultraviolet waveband

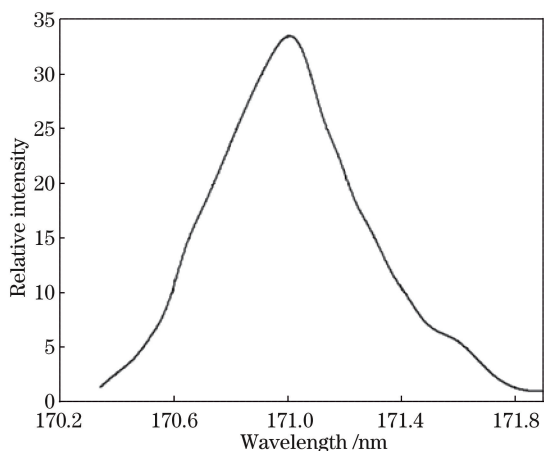


图 8 171 nm 波长的测试波形图

Fig. 8 Detected waveform for 171 nm wavelength

(2)空间分辨率分析

使用平行光管配合美军标空间鉴别率板进行照射,最终获取的像面探测数据如图 9 所示。

分析可知样机系统可以分辨 $k = 2, m = 3$ (k 代表美军标空间鉴别率板线对行序数, m 代表鉴别率板线对列序数)的空间频率线对。根据公式计算得到样机系统的空间分辨率为

$$N = N_c f_c / f = 10.08 \text{ lp/mm}, \quad (3)$$

式中 N_c 为探测器读出的空间分辨率, f_c 为平行光管焦距, f 为待测仪器焦距。对应像元的空间分辨率为 0.5 mrad, 与理论设计值相近, 满足应用需求。

(3)灵敏度分析

对于远紫外成像光谱仪, 通常使用灵敏度来对仪器探测能力进行表征。以观测的主要波长 135.6 nm 为例, 该波长在电离层中的辐亮度范围为 100~10000 Rayleigh, 参考亮度为 5000 Rayleigh, 以此来作为仪器探测灵敏度的目标亮度, 光学系统的传输效率可以表示为 $\pi\tau/4F^2$, 其中 τ 为光学元件的总传输效

表 4 探测器灵敏度

Table 4 Instrument responsivity

| Wavelength /nm | 135.6 | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Responsivity /($\text{count} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Rayleigh}^{-1} \cdot \text{pixel}^{-1}$) | 0.1059 | 0.0896 | 0.1007 | 0.0917 | 0.0725 | 0.0302 |

5 结 论

主要研究了适用于电离层远紫外特征光谱辐射观测的星载 130~180 nm 高光谱成像仪系统。主要研究内容和样机研制的关键技术总结如下: 1) 结合国外先进载荷探测数据分析了电离层与大气驱动力耦合探测的科学需求, 并在此基础上设计了样机的性能参数, 将先进科学应用与仪器参数进行了良

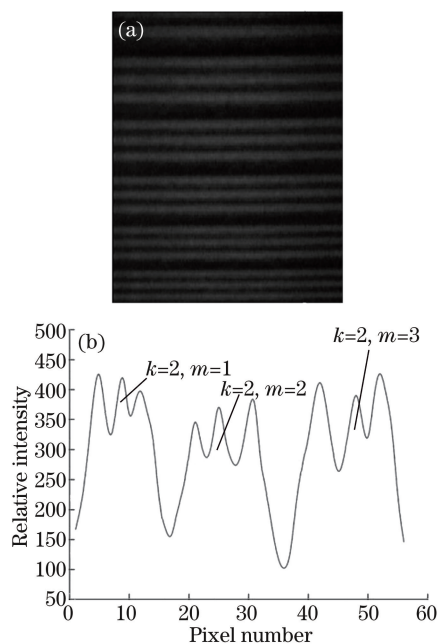


图 9 (a)像面; (b)空间分辨率测试结果图

Fig. 9 (a) Image plane; (b) spatial resolution test result

率($\tau \approx 0.01$), F 为系统 F 数。据此计算得到探测器表面的亮度为 1.57 Rayleigh。为了使探测器在该亮度下至少达到 $1 \text{ count} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{pixel}^{-1}$, 需要探测器具备至少 $0.0289 \text{ count} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Rayleigh}^{-1} \cdot \text{pixel}^{-1}$ 的灵敏度。使用图 6(a)中的辐射定标系统对样机的灵敏度进行实际测量, 主要针对中心视场的探测器中心单一像元进行测试值分析, 此时探测到中心像元的辐照值对应的立体角极小, 可以很容易地转化成辐亮度值。将标准探测器换为单点标准探测器, 根据标准探测器的标准曲线可以将读出值准确推算为入射到仪器之前的辐亮度值, 并可依据文献[13]将该亮度转化为 Rayleigh 表示形式。在 130~180 nm 波段选择几个波长进行测试, 每次测试时间为 1 min, 测试得到的探测器灵敏度如表 4 所示。

好结合; 2) 在国内现有的远紫外光学元件加工水平和国外光栅、探测器技术限制的条件下, 设计了适用于电离层探测的远紫外成像光谱系统, 其性能良好, 具备与国外仪器相近的性能; 3) 在国内率先研制了远紫外成像光谱仪的样机系统; 4) 对远紫外成像光谱仪进行了辐射定标和性能测试, 为同类仪器的定标和测试方法提供了参考思路, 并验证了光学指标设计, 该样机系统的工程应用性较好。这种远紫外

成像光谱仪的相关研究将对未来星载电离层探测载荷的研制提供一定的理论依据和实践指导。

参 考 文 献

- [1] Robert P M. Space weather comes of age-new sensors and models for ionospheric specification and forecast [J]. Proceeding of the SPIE, 2004, 5548: 341-347.
- [2] Ridley A J, Deng Y, Tóth G. The global ionosphere-thermosphere model[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2006, 68(8): 839-864.
- [3] Zhang Y L, Paxton L J, Kil H. Nightside midlatitude ionospheric arcs: TIMED/GUVI observations [J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2013, 118(6): 3584-3591.
- [4] Song J. Research on applications of backscatter ionospheric sounding techniques[D]. Wuhan: Wuhan University, 2011.
宋君. 返回式电离层探测技术应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2011.
- [5] Lin J, Wu Y, Liu J N. Research on ionospheric inversion of GPS occultation[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(8): 1947-1953.
林剑, 吴云, 刘经南. 电离层 GPS 掩星反演技术研究[J]. 地球物理学报, 2009, 52(8): 1947-1953.
- [6] Yu L, Wang S R, Lin G Y. Review of space-based imaging spectrum technique development for ionosphere observations[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(6): 2308-2315.
于磊, 王淑荣, 林冠宇. 星载电离层探测成像光谱技术发展综述[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(6): 2308-2315.
- [7] Denis A E, Thomas S P, Aumann H. The impact of the AIRS spatial response on channel-to-channel and multi-instrument data analyses[J]. Proceeding of the SPIE, 2006, 6296: 62960I.
- [8] Sotirelis T, Korth H, Hsieh S Y, *et al.* Empirical relationship between electron precipitation and far-ultraviolet auroral emissions from DMSP observations[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2013, 118(3): 1203-1209.
- [9] Paxton L J, Meng C I, Fountain G H, *et al.* SSUSI: Horizon to horizon and limb-viewing spectrographic imager for remote sensing of environmental parameters[J]. Proceeding of the SPIE, 1992, 1764: 161-175.
- [10] Kil H, Lee W K, Shim J, *et al.* The effect of the 135.6 nm emission originated from the ionosphere on the TIMED/GUVI O/N₂ ratio[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2013, 118(2): 859-865.
- [11] Loicq J, Kintziger C, Mazzoli A, *et al.* Optical design and optical properties of a VUV spectrographic imager for ICON mission[J]. Proceeding of the SPIE, 2016, 9905: 990509.
- [12] Eastes R W, McClintock W E, Codrescu M V, *et al.* Global-scale observations of the limb and disk (GOLD): new observing capabilities for the ionosphere-thermosphere[M]//Eastes R W, McClintock W E, Codrescu M V, *et al.* eds. Midlatitude Ionospheric Dynamics and Disturbances. Washington: American Geophysical Union, 2008: 319-326.
- [13] Baker D J. Rayleigh, the unit for light radiance[J]. Applied Optics, 1974, 13(9): 2160-2163.
- [14] Yu L, Wang S R, Qu Y, *et al.* Broadband FUV imaging spectrometer: advanced design with a single toroidal uniform-line-space grating[J]. Applied Optics, 2011, 55(22): 4468-4477.
- [15] Yu L, Lin G Y, Yu X Y. Optical system of far ultraviolet imaging spectrometer for space-based upper atmosphere remote sensing[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0122001.
于磊, 林冠宇, 于向阳. 空间高层大气遥感远紫外成像光谱仪的光学系统[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0122001.
- [16] Yu L, Lin G Y, Chen B. Study on the absolute spectral irradiation calibration method for far ultraviolet spectrometer in remote sensing[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(1): 246-249.
于磊, 林冠宇, 陈斌. 大气遥感远紫外光谱仪绝对光谱辐照度响应度定标方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(1): 246-249.