

地球临边/天底同时探测的紫外环形成像仪

于向阳^{1,2,3} 王淑荣¹ 黄煜¹ 林冠宇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 中国科学院大学, 北京 100049; ³ 吉林大学机械科学与工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要 论述了地球临边及天底模式大气探测的原理,依据应用要求设计和研制出了具有全新探测模式的在近地球轨道能同时对地球临边和天底大气进行探测的紫外环形成像仪原理样机。该样机采用折反式光学系统,它的三个工作波段分别为 285~295 nm、305~315 nm 和 350~360 nm,能实现地球临边(对应大气垂直高度 0~120 km)多方位以及天底 10°视场角内的成像探测,其探测数据被用于反演大气辐射多方位的空间分布及动态结构。最后对该原理样机的 310、355 两个通道进行了性能评价。结果表明,其空间分辨率和信噪比均达到设计指标要求,满足空间紫外遥感的应用。

关键词 成像系统;紫外环形成像仪;光学设计;紫外遥感;多方位成像探测

中图分类号 TH744.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1211004

Development of Ultraviolet Annular Imager for Earth Limb and Nadir Sounding Simultaneously

Yu Xiangyang^{1,2,3} Wang Shurong¹ Huang Yu¹ Lin Guanyu¹

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

³ College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China

Abstract The atmosphere sounding's principle of limb and nadir detecting modes are discoursed, and the prototype of ultraviolet (UV) annular imager with fire-new detecting modes is designed, which can gets the earth limb and nadir images of atmosphere simultaneously on the near-earth orbit. The prototype has a refraction-reflection optical system, and its spectral ranges are 285~395 nm, 305~315 nm and 350~360 nm. It can realize the image sounding with multiple azimuths by earth's limb mode (the vertical height of the atmosphere is from 0~120 km) and 10° field of view by nadir mode, and the data received can be used to retro-deduce the spatial distribution and the dynamic state configuration of the atmospheric radiation within multiple azimuths. The performances for 310 and 355 channels of the prototype are tested. The results show that the spatial resolution and the signal-to-noise ratio are both satisfied the design requirements and it is suitable for the application of the space UV remote sensing.

Key words imaging systems; ultraviolet annular imager; optical design; ultraviolet remote sensing; multiple azimuths imaging sounding

OCIS codes 120.6200; 220.4830; 280.1310; 110.2970

1 引言

空间遥感技术作为一种监测中层大气的状态与扰动的必要手段,对于了解太阳活动、空间天气与地球天气气候的关系以及环境监测等,都具有十分重要

的科学意义^[1,3]。而空间紫外遥感技术,是除可见、近红外、远红外以及微波空间遥感技术以外的又一个具有显著优势的研究领域,其工作原理是利用太阳光中的紫外辐射被低、中、高层大气分子强烈散射和被大

收稿日期: 2012-06-18; 收到修改稿日期: 2012-08-13

基金项目: 国家 863 计划(2009AA12Z151)资助课题。

作者简介: 于向阳(1979—),男,博士研究生,助理研究员,主要从事紫外光学遥感仪器的设计等方面的研究。

E-mail: yu_ciomp@163.com

导师简介: 吴清文(1968—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事光学精密仪器 CAD/CAE 和空间光学传感器热控技术等方面的研究。E-mail: wuqw@ciomp.ac.cn

气中的微量气体强烈选择吸收的特征来研究。全球环境变化,这是目前国际上空间紫外光学遥感的热点课题^[4,5]。通过遥感探测太阳在 285~360 nm 间多波长的紫外光谱辐射分布及其随时间变化的规律,了解大气的传输辐射模式和大气层之间的相互作用,进而为研究全球环境和气候的变化提供依据,获得预测未来环境的变化趋势的全球环境数据成为了科学家们所希望解决的问题。首先从探测模式出发,在满足同时进行临边观测和天底观测应用需求的基础上,选取光学方案,设计了对应的光学系统和研制出了原理样机,对该原理样机进行了标定检测和分析验证。该原理样机的研制成功,为以气象卫星为平台的空间遥感仪器后续的发展提供了技术基础,促进了遥感领域内的空间探测技术的进一步应用。

2 探测方式与技术指标

目前,在以卫星为载体的空间遥感观测方式应

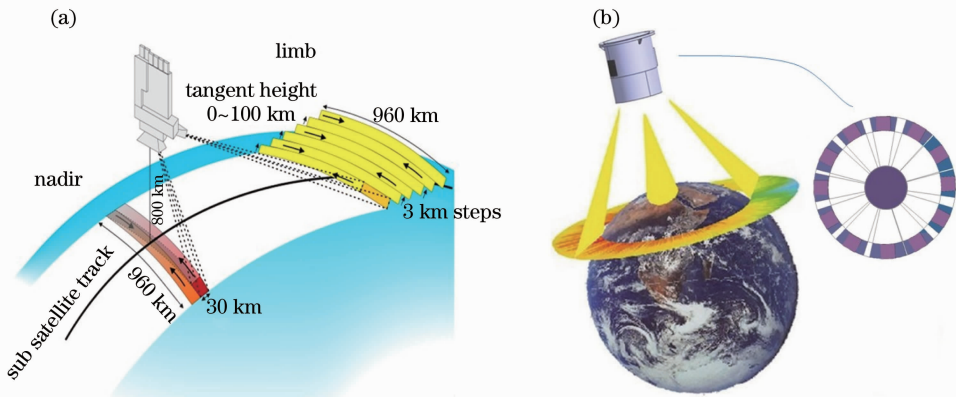


图 1 不同探测方式和探测效果示意图。(a) SCIAMACHY 模式;(b)紫外环形成像仪探测模式

Fig. 1 Detecting modes and effect of different detections. (a) SCIAMACHY detecting modes;

(b) UV annular imager detecting modes

紫外环形成像仪用来对大气中臭氧和气溶胶等大气成分进行探测,获取高空间、时间覆盖和高垂直分辨率的大气的图像和数据信息,再利用探测得到的图像和数据进行反演^[1,7~9],获取整层大气密度、臭氧分布和气溶胶等微量成分的垂直结构及三维分布,因为在 300 nm 附近存在对臭氧(O_3)、二氧化氮(NO_2)等大气成分比较敏感的波段,所以选择仪器的工作波段为 285~360 nm,在 $h=400$ km 卫星轨道高度下目标像元分辨率 GSD 优于 3 km,探测器使用 E2V 公司 CCD47-20,像素 1024 pixel \times 1024 pixel,像素尺寸为 $a=13 \mu\text{m}$ 。由地球半径求得仪器到临边观测点的距离 $l=2294$ km,根据大气临边反演的要求,临边垂直方向空间分辨力小于等于 3 km,由此确定

用较多的主要是临边观测与天底观测相配合的观测方式,其探测原理是在对地球的某一特定高度的切线方向上的大气进行切片探测的同时对天底(星下点)大气进行探测。由于该探测方式具有其它观测方法(掩星观测、天底观测和临边观测)所不具备的优势,因此为当今国际空间大气探测领域内关注的热点和研究的前沿。但通常的临边/天底观测模式(如 SCIAMACHY)形成的观测区域为一带状,不能实现对观测区域内 360° 范围内多方位的有效观测^[6,7]。因此本文基于实际需求和技术指标设计出的在轨多方位对紫外 285~360 nm 光谱波段的成像仪,具备同时观测临边与天底大气的探测能力,面阵探测器边缘区域获得的图像代表地球临边紫外辐射随着临边高度变化的情况,探测器中心区域图像反映了天底视角内大气辐射和地面亮度分布。两者的观测区域示意图如图 1 所示。

出的主要技术指标如表 1 所示。

表 1 主要技术指标

Table 1 Main technical specifications

Item	Value
Spectral range	285~295 nm
	305~315 nm
	350~360 nm
Spatial resolution /km	3
Vertical field of view /($^\circ$)	10
Annular angle of field /($^\circ$)	140~146
F number	3.3
Focal length of system /mm	10
Detector array size /pixel	1024 \times 1024
Detector pixel size /nm	13 \times 13
Outline dimension /mm	$\leq \Phi 240 \times 240$
Mass /kg	≤ 9

3 光学系统设计^[10~13]

紫外环形成像仪是一台多方位观测、滤光片型的成像仪,根据大气反演算法需求,三个工作波段的中心波长分别为 290、310、355 nm。依据观测目标视场的要求和 CCD 探测器尺寸考虑,传统的大视场光学系统,如鱼镜头并不适合该项目。因此,光学系统最终采用反射镜加透镜组的折反式方案,该光学系统主要包括同心光学系统以及视场压缩单元两部分,同时利用反射镜将环形半视场进行压缩以达到指标要求。反射镜由 12 片反射锥拼接而成,三个工作波长采用共同的光学系统,通过转动透镜组前方的滤光片轮,实现三个工作波段中心波长的转换。

对一个光学系统来说,视场角 2ω 、焦距 f' 以及相对孔径 D/f' 是整个光学系统的主要技术参数,是光学系统设计的出发点,只有分析清楚它们之间的相互制约关系,才能较好地满足使用要求。各技术参数为

$$f' \geqslant al/D_{GS}, \quad (1)$$

$$F = f'/D = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\tau \pi L}{E'}} \cos^2 \omega', \quad (2)$$

$$\omega = \arcsin\left(\frac{R+h/2}{R+h}\right), \quad (3)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{h/2}{l}\right), \quad (4)$$

式中 D_{GS} 为目标像元分辨率, E' 为光学系统像面对应视场角 ω' 的辐照度, τ 为系统的投射比, R 为地球半径, h 为轨道高度, L 为地球临边大气辐亮度, h 为观测高度, ω 为光学系统的临边半视场角, ω' 为光学系统像面上的视场角, α 为环形径向半视场角。

由(1)~(4)式计算得到系统参数分别为:有效焦距 $f'=10$ mm, F 数为 3.3, 半视场角为 $70^\circ \sim 73^\circ$ 。该成像仪光学系统的工作原理是地球临边视场内辐射的光线首先经过反射锥,反射进入镜头前的紫外窄带滤光片,紫外窄带滤光片采用单片平板式结构,在紫外区具有较高的透过率,在可见区有非常高的抑制能力。紫外辐射通过窄带滤光片后进入透镜组,成像在面阵 CCD 上;天底大气辐射不通过反射锥,直接进入镜头前面的紫外窄带滤光片,经透镜组,成像在面阵 CCD 上。最终在 CCD 探测器接收面上形成中心亮斑和拼接而成的环状图像,从而实现地球临边和天底的大气探测。

地球临边场景经 12 块棱锥反射镜后经透镜组成像,利用反射镜将环形半视场 $70^\circ \sim 73^\circ$ 进行压缩,经过计算得到反射镜为母线与底面夹角 61.5°

的平面,内环视场 73° 以 16° 视场进入透镜组,外环视场 70° 以 13° 视场进入透镜组,形成 12 个方位角为 3° 的环形像。天底 10° 视场角内的场景则通过透镜组直接成像,考虑到环形成像仪在观测大气临边方向的同时又要观测天底方向,因此需要对像面进行分布。天底 10° 视场角内的场景通过透镜组直接成像在 CCD 的中心区,以中心视场为基准,形成 $0^\circ \sim 5^\circ$ 中心亮斑;地球环形临边场景经 12 片反射锥改变入射角后经透镜组成像,在 CCD 探测器接收面上形成环像,环形径向视场使用范围为 3° 。光学系统设计及利用 Zemax 光学软件进行仿真计算得到的视场仿真图像如图 2 所示。图 3 为紫外环形成像仪在三个工作波段的光学传递函数(MTF)曲线和点列图,由图 3 可知,各工作波段中心视场及临边视场在空间频率为 40 lp/mm 处的调制传递函数(MTF)均优于 0.7;其点列图 RMS 半径分别小于 5.5、5.8、7.0 μm , 该系统设计满足仪器能量传输高、在整个工作波段内同时获得了良好的成像质量,满足设计指标要求。

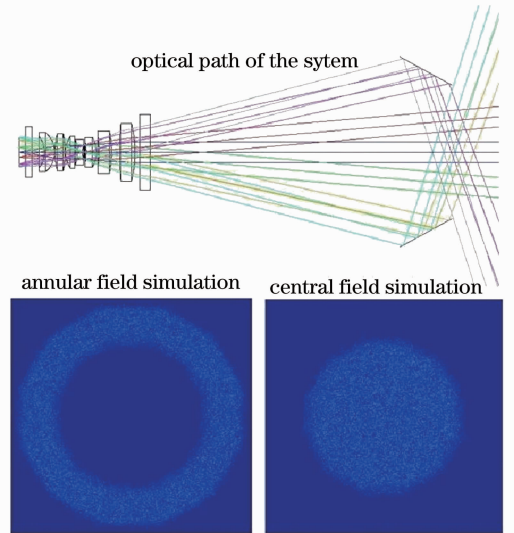


图 2 系统光路图与仿真效果图

Fig. 2 Layout of optical system and simulation effect

4 系统集成及性能评价

4.1 紫外环形成像仪系统集成

紫外环形成像仪主要由光学系统、机械系统、电子学系统等三部分组成,光学系统主要是满足成像需求,机械方系统则是支撑和定位光学元件,应具备优良的力学性能和环境适应性,不但保证在复杂的环境条件下要其成像的质量还要便于装配和检验。由于质量的限制,该成像仪采用通过电机驱动带有窄带滤光片的滤光轮来实现三个不同谱段范围内的

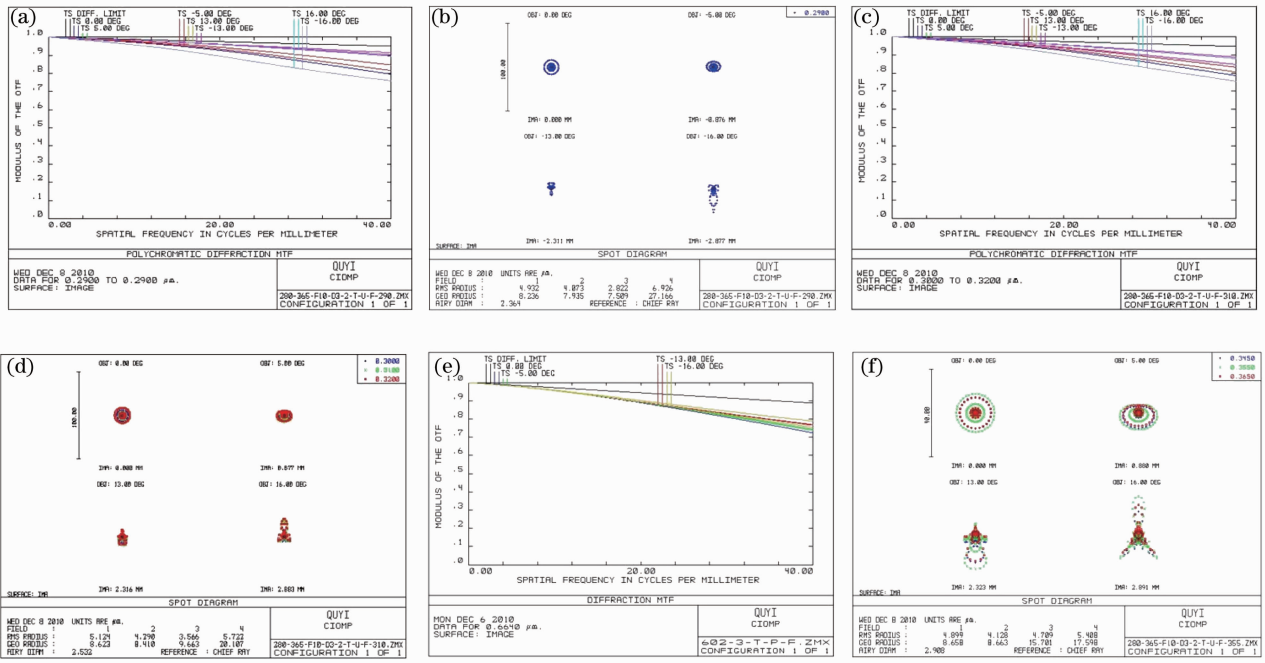


图 3 不同谱段下的光学系统性能图。(a) 290 谱段调制传递函数；(b) 290 谱段点列图；(c) 310 谱段调制传递函数；(d) 310 谱段点列图；(e) 355 段传调制递函数；(f) 355 段点列图

Fig. 3 Performance of optical system for different spectral bands. (a) MTF of 290 nm; (b) spot diagram of 290 nm; (c) MTF of 310 nm; (d) spot diagram of 310 nm; (e) MTF of 355 nm; (f) spot diagram of 355 nm

对目标成像。电子学系统的功能是对光学系统获得的图像进行光电转换、数据处理和图像输出，环形成像仪电子学系统主要由紫外增强型 CCD 探测器^[14]、CCD 驱动电路及信号处理电路、控制电路及电源等组成。在此基础上进行系统的集成与装调，得到了该成像仪的原理样机如图 4 所示。样机本体尺寸 $\phi 240 \text{ mm} \times 240 \text{ mm}$ ，质量为 8 kg，满足设计指标要求。

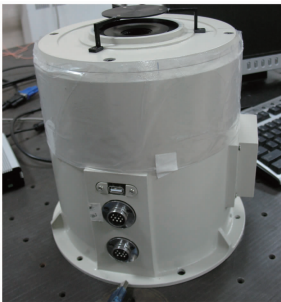


图 4 紫外环形成像仪原理样机

Fig. 4 Prototype of UV annular imager

4.2 系统评价与验证

4.2.1 空间分辨率检测^[15]

空间分辨率是反映光学系统分辨物体细节的能力，是一个很重要的指标参数，评价成像仪成像质量的关键技术指标之一，针对这一检测目的，在实验室搭建了空间分辨力检测系统，整套装置以大功率、高

稳定性氙灯作为光源，用车尔尼特纳光栅单色仪进行分光，在出缝处得到所需波长的紫外光辐射，在透射式鉴别率板前放入一片漫透射板消除单色仪出射辐射分布的不均匀性，使鉴别率板获得均匀的辐射分布，鉴别率板位于后续离轴抛物面镜的焦面上，这样经平面转折镜及离轴抛物面镜的共同作用，可以得到无穷远的紫外光分辨率目标，系统的鉴别率板为美国空军(USAF)1951(美军标 MIL-STD-150A)三条靶，对应的检测系统和鉴别率板如图 5 所示。

将紫外成像仪的原理样机置于紫外成像仪分辨率检测系统中，调整紫外环形成像仪在平行光路中的角度，则在原理样机焦面上得到鉴别率板的图像反映出实际原理样机所达到的分辨水平，其空间分辨率公式为

$$b = af' / f', \quad (5)$$

$$N = \frac{1}{2b}, \quad (6)$$

式中 $f' = 240 \text{ mm}$ 为分辨率检测装置离轴抛物面镜的焦距， b 为物方与探测器 CCD 单像素 a 对应的物高， N 为原理样机的空间分辨率。

由于进入中心视场的光线不经过反射锥镜的反射且入射角很小，能量相对临边视场较强，所以临边视场的分辨率代表了该成像仪的分辨率。将数据代入(5)式和(6)式，求得理论上原理样机的空间分辨

率 $N=1.603 \text{ lp/mm}$, 该值对应于美军靶标板的 0~5 (1.59 lp/mm), 临边视场分辨率检测结果图(实测光电分辨率以及对应的垂直水平剖线图标图)如图 6 所示, 其中 ADU 是以光电子为单位的灰度值。

图 6(a)为水平方向上的光电分辨率, 图 6(b)为光电检测图中成像区域的放大效果图, 图 6(c)为光电检测图, 图 6(d)为垂直方向上的光电分辨率。

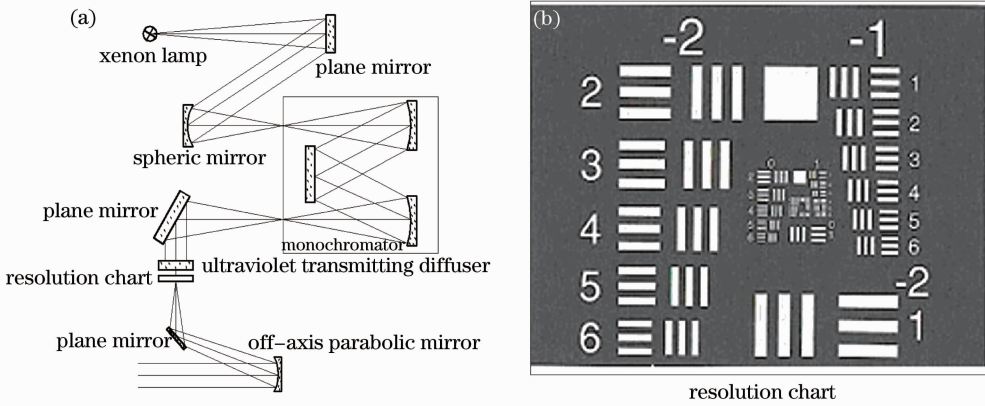


图 5 空间分辨率检测系统及分辨率板。(a)检测系统; (b)分辨率板

Fig. 5 Spectral resolution check system and resolution chart. (a) Check system; (b) resolution chart

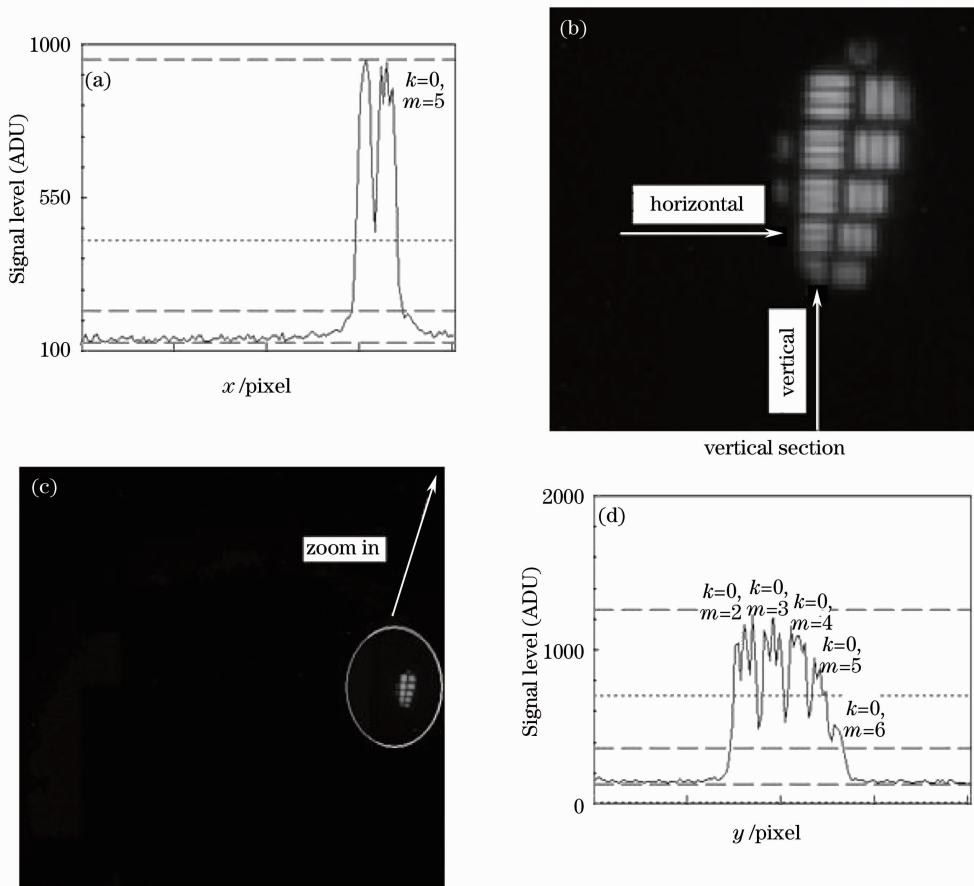


图 6 临边视场分辨率检测结果图

Fig. 6 Detection results of limb field of view's resolution

由图 6 可知, 临边视场 0~5 线对水平方向及垂直方向强度分布廓线均显示具有 3 个峰值, 表明原理样机确实能够分辨 0~5 线对, 其能分辨的最大空

间频率为 $k=0, m=5$ 所对应的空间频率, 即空间分辨率为 1.59 lp/mm , 和前述理论计算接近。

4.2.2 系统信噪比检测

信噪比作为衡量遥感仪器成像性能的另一个关键指标,特别是对于空间紫外微弱信号探测的研究,信噪比的理论估算及实际验证都有着非常重要的意义。仪器系统结构特点决定中心视场信噪比相比临边视场高,因此本节主要针对临边视场展开信噪比研究^[16,17]。系统单像素的信噪比 R_{SN} 为

$$R_{SN} = \frac{S_c}{\sqrt{S_c + \sigma_R^2 + n_{dark}}}, \quad (7)$$

式中 S_c 为 CCD 探测器单像素在积分时间内产生的信号电子数, σ_R^2 为 CCD 的读出噪声电子数, n_{dark} 为 CCD 的暗电流电子数。

将环形成像仪各理论参数代入(7)式得出理论上各通道的信噪比计算结果与检测如表 2 所示。

表 2 信噪比的理论估算与检测结果

Table 2 Theoretical calculation and actual detection results of signal-to-noise ratio

Wavelength / nm	Theoretical calculation		Actual detection	
	Max SNR	Min SNR	Max SNR	Min SNR
290	3.29	2.45	/	/
310	60.28	33.15	60.04	31.99
355	121.25	48.52	121.99	48.02

由表 2 可知,290 nm 通道以目前的实验条件实际验证不了,除 290 nm 通道外其他各通道实测值与理论估计值相符合。从试验样机信噪比这一指标来判断,仪器对于紫外波段及弱信号探测具有一定的局限性。为了能够更好地满足空间遥感应用的需求,后续样机阶段将从提高系统的信噪比方面采取措施。首先拟对探测器采取更好的散热措施如更换制冷 CCD 以降低暗电流及暗噪声;此外在满足光谱分辨率的前提下增大滤光片的带宽或增大积分时间获得更大的紫外信号能量;对临边微弱信号采取多像素合并的方法也是提高信噪比的一个主要备选方案;最后适当增加或调整对目标较为敏感的探测通道也能在一定程度上达到探测反演的目的^[18]。这些都将成为后续样机光学设计的一个参考。

5 结 论

分析了环形成像仪的探测原理,设计并研制出了紫外环形成像仪的原理样机,在实验室利用搭建的检测系统,对原理样机的性能进行检测。结果表明,空间分辨力为 3 km,信噪比除 290 nm 通道无法检测外均满足设计指标要求,并提出了进一步进行空间遥感探测技术改进设想。该原理样机具有多方位、双视场探测的模式,有着重要的研究和应用价值,是一种创新型空间光学遥感仪器,该原理样机的研制,为我国地球临边/天底同时探测探索在空间业务应用奠定了技术基础。

参 考 文 献

1 Lü Daren, Wang Pucui, Qiu Jinhuan *et al.*. An overview on the research progress of atmospheric remote sensing and satellite meteorology in China [J]. *Chinese J. Atmospheric Sciences*,

2003, **27**(4): 552~566
 吕达仁,王普才,邱金桓等. 大气遥感与卫星气象学研究的进展与回顾[J]. *大气科学*, 2003, **27**(4): 552~566
 2 Qiu Jinhuan, Wang Pucui, Xian Xiang'ao *et al.*. Recent progress in atmospheric remote sensing researches [J]. *Chinese J. Atmospheric Sciences*, 2008, **32**(4): 841~853
 邱金桓,王普才,夏祥鳌等. 近年来大气遥感研究进展[J]. *大气科学*, 2008, **32**(4): 841~853
 3 Cai Bin. The information formats of the U. S. next-generation meteorological satellites NOAA-K [J]. *Meteorological Science and Technology*, 1998, **4**: 46~50
 蔡斌. 美国新一代卫星 NOAA-K 信息格式[J]. *气象科技*, 1998, **4**: 46~50
 4 Wang Shurong, Li Futian, Qu Yi. Space UV optical remote sensing technology and development [J]. *Chinese J. Optics and Applied Optics*, 2009, **2**(1): 17~22
 王淑荣,李福田,曲艺. 空间紫外光学遥感技术与发展趋势[J]. *中国光学与应用光学*, 2009, **2**(1): 17~22
 5 Ruan Ningjuan, Su Yun. Summarization of overseas space ultraviolet instrument development [J]. *Space Craft Recover & Remote Sensing*, 2008, **29**(3): 71~78
 阮宁娟,苏云. 国外紫外空间探测器发展综述[J]. *航天返回与遥感*, 2008, **29**(3): 71~78
 6 R. Mager, W. Fricke, J. Burrows *et al.*. SCIAMACHY a new-generation of hyperspectral remote sensing instrument [C]. *SPIE*, 1999, **3106**: 84~94
 7 S. Noël¹, H. Bovensmann¹, J. P. Burrows¹ *et al.*. The SCIAMACHY instrument on ENVISAT-1 [C]. *SPIE*, 1998, **3498**: 94~104
 8 Yang Xiaohu, Wang Shurong, Huang Yu. Spectral irradiance calibration research of solar backscattered ultraviolet spectroradiometer in air/vacuum conditions [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0101004
 杨小虎,王淑荣,黄煜. 大气-真空环境紫外臭氧垂直探测仪光谱辐照度定标研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 0101004
 9 Jiang Cheng, Zhao Huijie, Li Na. Improved retrieval algorithm of trace gas from ground-based infrared ultraspectral data [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0701002
 江澄,赵慧洁,李娜. 改进的地基红外超光谱数据痕量气体反演方法[J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0701002
 10 Wu Yan, Tang Yi, Liu Jianpeng *et al.*. Optics design of far ultraviolet imaging spectrometer for ionosphere remote sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0122001
 吴雁,唐义,刘健鹏等. 电离层遥感远紫外成像光谱仪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 0122001

- 11 S. J. Janz, E. Hilsenrath, D. Flittner *et al.*. 瑞利散射姿态敏感器[J]. 控制工程, 2000, (2): 29~33
- 12 D. Pledger, J. Billing-Toss, R. H. Castain. Low cost ultraviolet 3-axis attitude sensor system [C]. *SPIE*, 1993, **1940**: 231~238
- 13 D. Pledger, J. Billing-Toss, W. Saylor. Development of honeywell's earth reference attitude determination system (ERADS) [C]. Proceedings of the 7th annual AIAA/USU Conference on Small Satellites. Logan, UT, USA: [s. n.], 1993. 437~443
- 14 e2v technologies limited, CCD47-20 Backthinned High Performance AIMO Backthinned CCD Sensor [EB/OL]. <http://www.e2v.com.2003/>
- 15 Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering Optics [M]. Beijing: China Machine Press, 2007
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007
- 16 Fu Qiang, Xiangli Bin, Jing Juanjuan. System signal-noise ratio analysis based on imaging chain model in multispectral remote sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0122001
付强, 相里斌, 景娟娟. 基于多光谱遥感成像链模型的系统信噪比分析[J]. 光学学报, 2012, **32**(2): 0122001
- 17 Zhao Guijun, Ren Jianwei, Wan Zhi *et al.*. Analysis of signal-to-noise ratio for visible imager detecting flying target[J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(z1): 162~163
赵贵军, 任建伟, 万志等. 用于探测飞行目标的光电成像系统信噪比分析[J]. 光学技术, 2007, **33**(z1): 162~163
- 18 Zhang Yufeng, Li Yongqiang. Influence on spectral band selection for satellite optical remote sensor [J]. *Space Craft Recovery & Remote Sensing*, 2004, **25**(3): 29~35
张宇烽, 李永强. 卫星光学遥感器光谱波段选择的影响因素[J]. 航天返回与遥感, 2004, **25**(3): 29~35

栏目编辑: 李文喆