

doi:10.3788/gzxb20144312.1212002

基于石英延迟器的高准确度紫外光谱辐射测量系统

丛海芳

(长春理工大学 电子信息工程学院, 长春 130022)

摘 要:为实现高准确度紫外光谱辐射测量与可见光望远镜单元的同轴共光路设计,采用四片石英延迟器叠拼组成光学退偏器和紫外/可见分束器,运用锁相放大技术对探测信号进行处理,并增加了相敏检波器的可调整功能.使仪器在 200 nm~380 nm 工作波段内的入射光残余偏振度最大值降低到 3%,提高了探测准确度.仪器每次测量使用前使输出不大于 10 mV,保证了光谱辐射测量的稳定度优于 1%.

关键词:紫外光谱辐射;色散;分束器;石英延迟器;锁相放大;相敏检波;调制

中图分类号:TH74

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)12-1212002-6

The System of High Accuracy UV Spectral Radiation System Based on Quartz Retarder

CONG Hai-fang

(Changchun University of Science and Technology, The College of Information and Electrical Engineering, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to achieved the coaxial optical designed unit for UV spectral radiation detecting and visible observation telescope, UV / visible beam splitter and four pieces of the quartz retarder were used, and a lock-in amplifier was used in the electrical system to advance the accuracy of measurement. To ensure the precision measurement detected, the phase-sensitive detector function can be adjustable. So the maximum residual polarization of the incident light for wavelength from 200 nm to 380 nm can be down to 3%. The output value of instrument is not more than 10 mV before each measurement, so it can be ensured that the stability of the measured radiation spectrum is less than 1%.

Key words: Ultraviolet spectrum radiation; Dispersion; Beam divider; Quartz retarder; Phase-lock amplify; Phase sensitive; Modulation

OCIS Codes: 120.4640; 120.6200; 120.4570

0 引言

紫外光谱辐射计是用于测定紫外辐射源光谱分布的光学仪器,紫外光谱辐射计能够同时建立目标或背景的背景强度、光谱特性,多用于高热源、导弹羽烟和紫外光源的辐射光谱强度探测与标定^[1-3].一般实验室所用的紫外光谱辐射系统,由于试验室环境稳定可靠,并且无需可见光观瞄系统实时对探测目标进行位置校准,因此获得的探测数较为稳定准确.但是,应用在外场条件下的紫外光谱辐射系统受目标观测距离、外场环境温度、大气散射等因素影响,实验室用的光谱辐射系统

无法克服以上因素影响.本文采用紫外/可见分束器实现紫外光谱辐射和可见光观瞄的同轴共光路的紧凑型设计;采用 4 片式的石英晶体延迟器对入射光退偏,减小大气偏振效应对系统探测准确度的影响^[4-5];并采用相干探测的原理对调制的光信号与参考信号进行相乘处理,增加了相敏检波器可调整功能,保证了紫外光谱辐射探测稳定度.

1 紫外光谱辐射测量系统光学设计

高准确度紫外光谱辐射测量系统采用的是紫外光谱辐射测量与可见光观瞄同轴共光路设计,主要用于

基金项目:国家自然科学基金(No. 60977011)资助

第一作者:丛海芳(1980-),女,讲师,博士,主要研究方向为光电技术. Email: conghaifang1980@163.com

收稿日期:2014-03-17;录用日期:2014-06-05

<http://www.photon.ac.cn>

实验室和外场条件下各种紫外目标的紫外光谱辐射强度、光谱特性的测量. 该系统主要由望远单元、可见光观瞄单元、Seya-Namioka 型色散单元、放大器单元和信号调理单元组成, 该系统的总体结构见图 1.

系统工作波段为 200 nm~380 nm, 光谱分辨率为 0.5 nm, 系统焦距 120 mm, 观瞄视场角小于 2°, 相对标准准确度 5%, 系统的稳定性由于 2%. 紫外光谱辐射的探测器选用的是日本滨松公司的 R1527 高灵敏紫外增强光电倍增管, 可见光观瞄单元采用的是增强型的 MVC360MF/F-M00 CCD 相机.

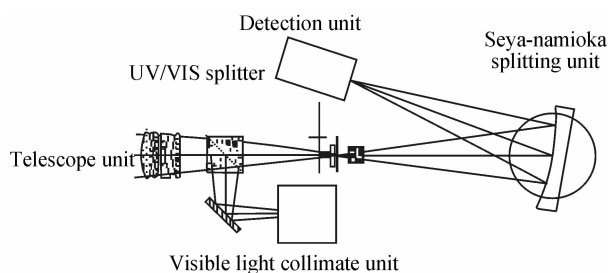


图 1 紫外光谱辐射系统光学结构

Fig. 1 The optical structure of UV spectral radiation system

1.1 望远单元

紫外光谱辐射系统的望远单元由 4 块分离透镜和一块紫外/可见分束器组成. 该系统使用紫外/可见分束器实现对入射光辐射分光, 分束器将入射光在 200 nm~380 nm 波段 50% 的光强送入到 Seya-Namioka 色散单元, 将入射光在 400 nm~780 nm 波段 30% 的光强送入到可见光观瞄单元. 光学系统布局和光学传递函数仿真见图 2 和图 3. 通过设计可以满足系统所要求的视场角、系统焦距、 F 数和像质要求.

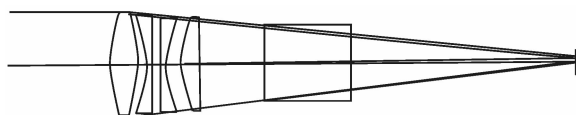


图 2 望远单元光学结构

Fig. 2 The optical structure of telescope unit

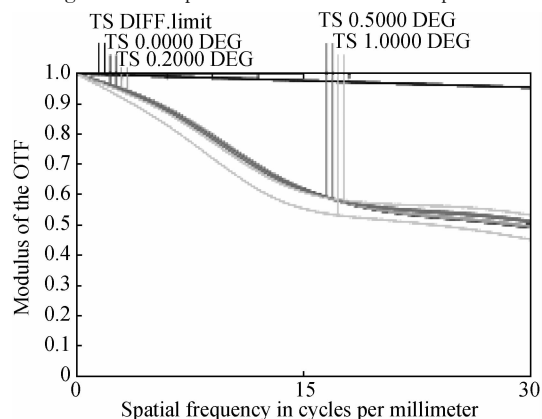


图 3 望远单元的光学传递函数仿真结果

Fig. 3 The graph of optical transfer function for telescope unit

1.2 可见光观瞄单元

可见光观瞄单元和 CCD 相机配合使用, CCD 相机光敏尺寸为 4 inch. 光学系统焦距为 120 mm, 视场角 2°. 可见光观瞄单元的光学设计见图 4、5 和 6, 可满足系统的设计要求.

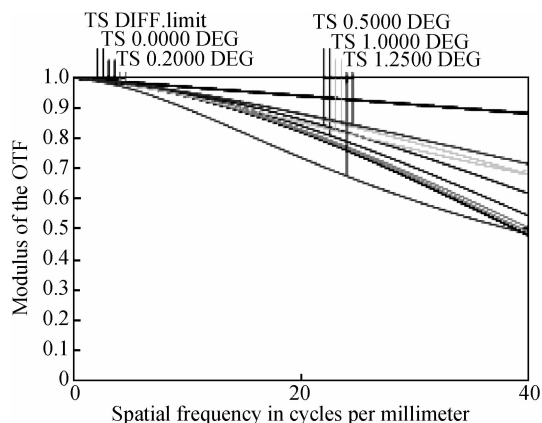


图 4 可见光观瞄单元的光学传递函数仿真结构

Fig. 4 The graph of optical transfer function for VIS collimate unit

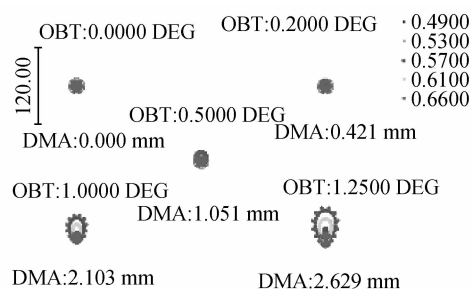


图 5 可见光观瞄单元的弥散圆

Fig. 5 The graph of blur circle for VIS collimate unit

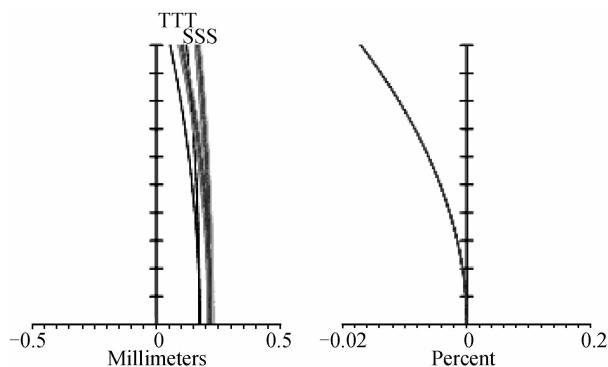


图 6 可见光观瞄单元的像差曲线

Fig. 6 The curve of aberration for VIS collimate unit

1.3 Seya-Namioka 型色散单元

紫外波段的分光系统种类较多, 根据紫外光谱辐射测量系统的外场需求, 选择了 Seya-Namioka 凹面光栅型分光方式, 它覆盖的光谱范围大, 结构尺寸小, 只要转动凹面光栅, 保持入射和出射狭缝不动, 在出射狭缝处便可获得所需波长的聚焦像^[6]. 但 Seya-Namioka 凹面光栅单色仪中, 由于入射光线和衍射光线间的角

度大,会引起较大的像散和彗差,因此选用 NEWPORT 公司的 IV 型消像差全息凹面光栅. 该光栅的主要技术特性参数:光谱范围为 200 nm ~ 800 nm; $\sigma=1200$ g/mm; 光栅尺寸为 32 mm × 32 mm; 入射臂长度 $l_A=100$ mm, 出射臂长度 $l_B=94$ mm; 入射光束与出射光束夹角为 $2\delta=61.6^\circ$; F 数: 3.6.

利用光学设计软件对进行了光线追迹,图 7 为 Seya-Namioka 色散单元的光路图,图 8 为单色仪出缝处的点列图分布.

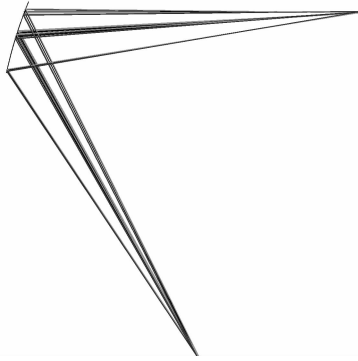


图 7 Seya-Namioka 色散单元光学结构

Fig. 7 The optical structure of Seya-Namioka beam splitting unit

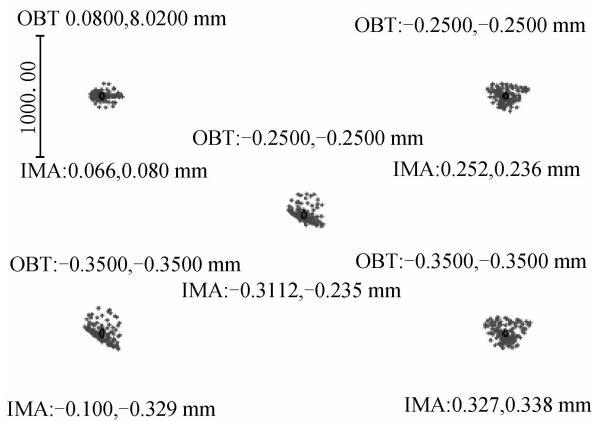


图 8 出缝处的点列图分布

Fig. 8 The graph of range points for exit slit

光谱带宽是分光系统的重要技术指标,从出缝输出辐射的光谱带宽 $\Delta\lambda$ 可表示为^[7]

$$\Delta\lambda = \sqrt{\Delta\lambda_0^2 + \Delta\lambda_s^2} \quad (1)$$

式中, $\Delta\lambda_0$ 为分光系统的固有光谱分辨率; $\Delta\lambda_s$ 为狭缝宽度对应的光谱增宽. 狭缝宽度对应的光谱增宽可以表示为

$$\Delta\lambda_s = b \times \frac{d\lambda}{dl} \quad (2)$$

式中, b 为狭缝宽度, $d\lambda/dl$ 为单色仪的线色散率倒数. 在光栅常数为 σ , 光谱级次为一级, 不同扫描波长 λ 的光按定偏向角 2δ 出射时, 对应的光栅法线转角为^[8]

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{\sigma\lambda}{2\cos\delta}\right) \quad (3)$$

则单色仪的线色散可以表示为

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{\sigma l_B}{\cos\beta} \cdot 10^{-6} \quad (4)$$

由式(4)联立求得该单色仪的线色散和狭缝宽度在 0.2 mm 时对应的光谱带宽如表 2 所示, 满足 0.5 nm 的光谱分辨率要求.

表 1 0.2 mm 缝宽对应的光谱带宽
Table 1 The spectral bandwidth for 0.2 mm slit width

nm	200	300	380
$\Delta\lambda_s$	0.393 991	0.412 638	0.427 243
$\Delta\lambda_0$	0.003 42	0.007 65	0.011 90
λ	0.394 01	0.412 71	0.427 41

2 基于石英延迟器的退偏器

为了减小因入射光的偏振影响, 提高探测准确度, 需要在光路中设置退偏器, 高准确度紫外光谱辐射系统退偏器采用四片石英延迟器叠拼而成, 放置在 Seya-Namioka 色散单元入缝的前端^[9].

光学退偏器是用来消除入射辐射光的偏振, 由一组石英晶体制成. 每组由依次放置的四片石英晶体延迟器构成, 第一块石英晶体的厚度为 d , 第二块厚度为 $2d$, 光轴与第一块石英光轴的夹角为 45° , 同理第三块、第四块厚度为 $3d$ 、 $4d$, 光轴与前一块石英光轴的夹角为 45° .

偏振光沿垂直方向入射到退偏器上, 入射进入第一个延迟器后分解为寻常光和非寻常光, 前者的振动方向与石英的光轴垂直, 后者的振动方向与石英的光轴平行. 由于在石英内寻常光比非寻常光传播的快, 因此, 寻常光与非寻常光之间相对位相发生延迟. 通过第一块延迟器后, 寻常光与非寻常光之间的位相延迟^[10]为

$$\delta_1 = \frac{2\pi d}{\lambda} (n_o - n_e) \quad (5)$$

由于二延迟器光轴间的夹角为 45° , 从第一延迟器出射的寻常光和非寻常光进入第二延迟器后, 又分别分解为新的寻常光和非寻常光. 通过第二延迟器后, 在每对寻常光和非寻常光之间又产生新的位相延迟为

$$\delta_2 = \frac{2\pi d}{\lambda} (n_o - n_e) \quad (6)$$

进入第三、第四延迟器相位延迟为

$$\delta_3 = \frac{2\pi d}{\lambda} (n_o - n_e) \quad (7)$$

$$\delta_4 = \frac{2\pi d}{\lambda} (n_o - n_e)$$

式中: n_o 和 n_e 分别是寻常光和非寻常光的折射率.

令退偏器的入射光和出射光分别为^[11]

$$V_i = \begin{bmatrix} i_i \\ m_i \\ c_i \\ s_i \end{bmatrix}, \quad V_e = \begin{bmatrix} i_e \\ m_e \\ c_e \\ s_e \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: i 为光强, m 为水平方向偏振度, c 为 $+45^\circ$, s 右旋偏振度, 则出射光为

$$\begin{pmatrix} i_e \\ m_e \\ c_e \\ s_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta_2 & \sin \delta_1 \cdot \sin \delta_2 & -\sin \delta_2 \cdot \cos \delta_1 \\ 0 & 0 & \cos \delta_1 & \sin \delta_1 \\ 0 & \sin \delta_2 & -\sin \delta_2 \cdot \cos \delta_2 & \cos \delta_1 \cdot \cos \delta_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_i \\ m_i \\ c_i \\ s_i \end{pmatrix} \quad (9)$$

因此可得

$$\begin{cases} i_e = i_i \\ m_e = m_i \cos \delta_2 + c_i \sin \delta_1 \sin \delta_2 - s_i \cos \delta_1 \sin \delta_1 \\ c_e = c_i \cos \delta_1 + s_i \sin \delta_1 \\ s_e = m_i \sin \delta_2 - c_i \sin \delta_1 \cos \delta_2 + s_i \cos \delta_1 \cos \delta_2 \end{cases}$$

设在波长间隔 Δ 内, 入射光的光强和偏振特性与波长无关, 则

$$\begin{aligned} I_e &= \int_{\lambda}^{\lambda+\Delta} i_e d\lambda \\ M_e &= \int_{\lambda}^{\lambda+\Delta} m_e d\lambda \\ C_e &= \int_{\lambda}^{\lambda+\Delta} c_e d\lambda \\ S_e &= \int_{\lambda}^{\lambda+\Delta} s_e d\lambda \end{aligned} \quad (10)$$

该波长间隔 Δ 的出射光偏振度为

$$P = \frac{\sqrt{M_e^2 + C_e^2 + S_e^2}}{I_e} \quad (11)$$

为将出射光的偏振性消除, 要求 P 、 M_e 、 S_e 、 C_e 趋近于 0, 对于 $\Delta = 1 \text{ nm}$, 消偏条件为: $\frac{\lambda(\lambda+\Delta)}{2\pi d \cdot \Delta n} \rightarrow 0$, 在 $180 \sim 380 \text{ nm}$ 波长范围内, $\Delta n = 0.009$. 表 2 给出了四片组退片器偏振度随厚度变化的残余偏振度计算结果.

表 2 不同厚度石英晶体的残余偏振量

Table 2 The value residual polarization for different quartz crystal thickness

Type	Triple quartz crystals		
Quartz crystal thickness/mm	3	5	10
Depolarization thickness/mm	30	50	100
Residual polarization/(%)	4.5	2.5	1.6

计算结果表明, 采用增大石英晶体延迟器的厚度来降低出射光偏振度有局限性, 选用厚度为 5mm 的石英晶体, 波长间隔为 Δ 的出射光偏振度为

$$P_3 = \left[\frac{\lambda(\lambda+\Delta)}{2\pi d \cdot \Delta n \cdot \Delta} \right]^3 \quad (12)$$

由上表可以看出残余偏振度为 2.5%, 可以满足高精度紫外辐射度测量的技术要求.

3 弱信号锁相放大技术

由于紫外光谱辐射测量系统的探测目标是微弱信号, 因此选用的探测元件为光电倍增管, 光电倍增管是系统的光电信号转换部分, 将调制后的光信号转换为

电信号^[12-13]. 系统的电子学核心部分是放大器单元和信号调理单元, 信号调理单元采用锁相放大技术用以提高探测数据测试准确性和高稳定性.

3.1 放大器单元

放大器将光电倍增管输出的电信号进行放大, 采用电流电压转换器, 为提高探测准确度, 前置放大器将与倍增管近距离封闭壳体连接, 以减少噪声干扰. 前置放大器由主控单元依据信号范围自动调整, 通过控制模拟开关(AD7511)来选择适合的三个档位衰减, 其比例为 1 : 100 : 1000, 分别对应信号中 0.3 mV、30 mV、3 V 放大的信号范围.

3.2 信号调理单元

信号调理单元将前置放大器输出的信号进行进一步的处理, 使其能够为相敏检波使用. 系统采用陷波器消除信号中的 50 Hz 工频及二次谐波的干扰, 通过设计选择阻容值, 使得信号中的 $50 \pm 1 \text{ Hz}$ 的干扰滤除, 并需要使 800 Hz 有用信号通过, 稍有衰减一般小于 1%~5%. 信号经陷波器射随器输出, 降低输出阻抗. 采用选频网络对有用的 800 Hz 信号进行频率选择放大, 对其他频段信号进行衰减, 以提高信号比和动态范围, 频率特性为 50 Hz~2 kHz. 通过移相器将信号移相以使调制的光信号与参考频率信号的相位相差 0° . 移相的范围为 $0 \sim 180^\circ$, 在设备经较大振动和长时间运输时用于调整相位变化影响.

相敏检波器是锁相放大技术的核心, 锁相放大原理见图 9. 系统采用相干探测的原理对调制的光信号与参考信号进行相乘处理^[10-11]. 其输出的直流信号有残余交流, 需经积分器进行平滑. 后输出给 A/D 转换器和数显表. 为保证装置高精度测量, 相敏检波器亦有可调整部分, 在每次测量使用前都应使输出在数显表上显示不大于 10 mV, 以保证测量准确度和稳定度.

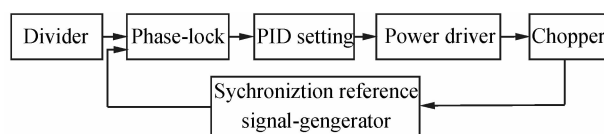


图 9 锁相放大器原理

Fig. 9 The skeleton of phase-lock amplifier

4 实验部分

为了验证紫外光谱辐射系统主要指标和功能, 对系统的可见光观瞄单元、石英退片器和锁相放大技术进行了实验验证.

4.1 可见光观瞄测试

可见光观瞄单元采用 MVC360MF/F-M00 CCD 相机, 像元大小为 $6 \mu\text{m} \times 6 \mu\text{m}$, 像元数为 758×480 . 将紫外光谱辐射系统和靶标放置在 3 m 的光学导轨上, 在距离系统望远单元 3 m 处, 将靶标调整到, 对可

见光观瞄单元进行成像测试,测试结果见图 10. 由图 10 可以看出,直径为 105 mm 的黑色圆斑刚好与 CCD 相机 480 个像元方向工作区相切,由此可以判断,该单元的市场角小于 2° ,并验证了系统的紫外/可见分束器能够把入射光的可见光波段反射到可见光观瞄单元,并且满足 CCD 相机的测试信噪比要求.

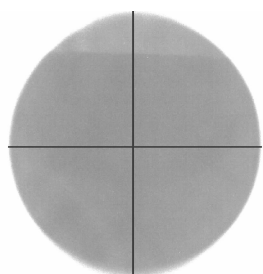


图 10 可见光观瞄单元测试结果

Fig. 10 The results of VIS light collimate unit

4.2 偏振响应度测试

系统的偏振响应度测试采用布儒斯特起偏器,起偏器的偏振方位角由电控箱精确控制.测试偏振角度选取 0° 、 90° 、 180° 、 270° 时仪器输出信号,测量结果见图 11.可以看出在工作波段内,4 个偏振方向仪器响应度的最大误差值为 0.3%,验证了仪器加入石英退片器后对入射光的偏振状态不敏感.

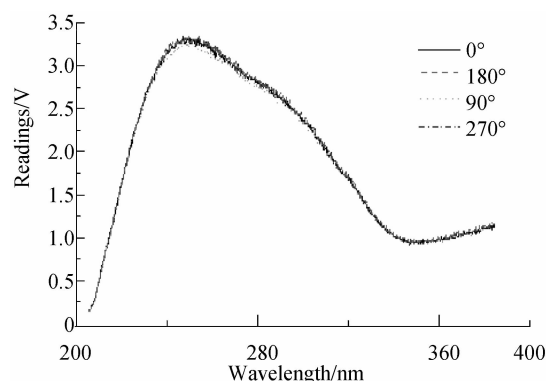


图 11 不同偏振角的仪器响应度

Fig. 11 The curve of instrumental value in different polarization angle

4.3 仪器准确度和稳定性测试

紫外光谱辐射系统的准确度和稳定性测试可以反映出电子学系统中锁相放大器的设计水平,对锁相放大器性能的评价可以通过系统对光源光谱辐射测量的重复性和稳定性来表征.将标定过的紫外光谱辐射系统放置在标准氙灯前方(距离为 1 m)^[14-15],对标准氙灯进行光谱辐照度准确度和稳定性测试(测试次数 5 次),光谱辐照度测试准确度结果见图 12.

由图 12 可得出,紫外光谱辐射系统在 200 nm~380 nm 所测得的辐照度数据与标准氙灯在 1 m 处的辐照度理论计算值基本一致,系统测试的最大误差出现在 332 nm 处,误差值为 4%,.系统 5 次测量稳定性

最大误差值为 1%.

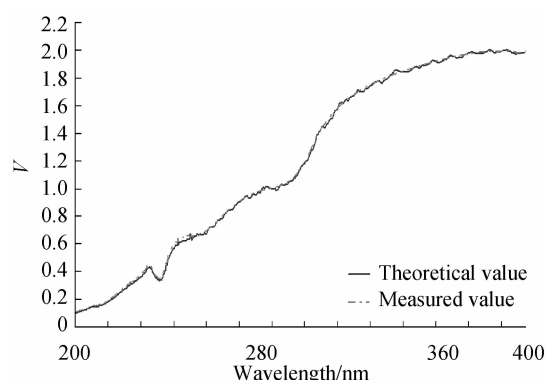


图 12 光谱辐照度测试准确度曲线

Fig. 12 The accuracy curve of spectral irradiance measurement

5 结论

高准确度紫外光谱辐射测量系统采用了紫外/可见分束器,实现了紫外光谱辐射测量与可见光望远观瞄系统的同轴共光路设计,.系统采用四组片的石英光学退偏器,使在 200 nm~380 nm 工作波段内的入射光残余偏振度最大值降低到 3%,经测试系统对 4 个方向偏振响应度误差优于 0.3%.系统采用锁相放大技术,利用相干探测的原理对调制的光信号与参考信号进行相乘处理,增加了相敏检波器可调整功能,经对标准氙灯光谱辐照度测量,定标准准确度优于 4%,重复性优于 1%.通过对紫外光谱辐射测量与可见光望远观瞄单元的同轴共光路系统的设计与实验研究,可为今后外场高热源、导弹羽烟和紫外光源的光谱辐射强度探测与标定奠定理论和试验基础.

参考文献

- [1] PIOTR W K, JOSEPH J M, JERRY I B, *et al.* Comparison of spectral irradiance standards used to calibrate shortwave radiometers and spectral radiometers [J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(12):2432-2439.
- [2] RICHTER M, HOLLANDT J, KRÖTH U. Source and detector calibration in the UV and VuV at BESSY II [J]. *Metrologia*, 2003, **40**(1):107-110.
- [3] XING Jin, WANG Shu-rong, LI Fu-tian. Comparisons between radiometric scales on UV-VUV radiant standard light sources [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, **12**(4):373-379. 刑进,王淑荣,李福田. 紫外-真空紫外辐射标准光源的比对 [J]. *光学精密工程*, 2004, **12**(4):373-379.
- [4] WU Fu-quan, LI Guo-hua, FENG Tai-zhong, *et al.* Study on the measurement of spectral properties of monochromatic lightcrystalline quartz depo-larizer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 1996, **16**(3):23-26. 吴福全,李国华,封太忠,等. 单色石英退偏器的光谱性能测试研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 1996, **16**(3):23-26.
- [5] De SANDE J C G, PIQUERO G, TEIJEIRO C. Polarization changes at Lyot depolarizer output for different types of input beams [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2012, **29**(3):278-284.
- [6] XUE Qing-sheng, WANG Shu-rong, SONG Ke-fei, *et al.* Design of a single beam UV-VUV spectrophotometer [J].

- Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(10):102-105.
薛庆生,王淑荣,宋克非,等. 一种单光束紫外-真空紫外分光光度计的设计[J]. *光电工程*, 2008, **35**(10):102-105.
- [7] 吴国安. 光谱仪器设计[M]. 北京:科学出版社,1978.
- [8] ARNE D, HANS A E, BRITT A K, *et al.* Comparison of data for ozone amount and ultraviolet doses obtained from simultaneous measurements with various standard ultraviolet instruments[J]. *Optical Engineering*, 2005, **44**(4):04101.
- [9] ZHAO Fa-cai, WANG Shu-rong, QU Yi, *et al.* Design and analysis of a depolarizer for the space-borne grating imaging spectromete[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, **31**(7):1991-1994.
赵发财,王淑荣,曲艺,等. 星载光栅成像光谱仪的退偏器设计与分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, **31**(7):1991-1994.
- [10] LIU Ying, FU Shao-jun, LI Fu-tian. The depolarization characteristic of quartz depolarizer in UV-VUV. spectral region[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2004, **24**(3):372-375.
刘颖,付绍军,李福田. 石英消偏器紫外-真空紫外消偏特性研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2004, **24**(3):372-375.
- [11] JIA Hui, LOU Jian-ming, DING Zhi-qun. Study on the detecting system of single photon counting spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(1):1-5.
贾辉,楼建明,丁志群. 单光子计数光谱仪探测系统的研究[J]. *光子学报*, 2013, **42**(1):1-5.
- [12] WANG Yuan-wei, LIU Yu-bin, ZHOU Zhi-wei, *et al.* Design and application of lock-in amplifier in spectrum absorptive optical methane gas sensors[J]. *Sensorworld*, 2013, **11**(11):36-39.
王元委,刘宇彬,周志炜,等. 锁相放大技术在光谱吸收式甲烷传感器中的设计应用[J]. *传感器世界*, 2013, **11**(11):36-39.
- [13] ZHAO Jun-jie, HAO Yu-wen, GUO Lu-lu, *et al.* Research on digital lock-in amplifier[J]. *Modern Electronics Technique*, 2012, **35**(3):191-198.
赵俊杰,郝育闻,郭璐璐,等. 数字锁相放大器的实现研究[J]. *现代电子技术*, 2012, **35**(3):191-198.
- [14] SPERFELE P, TOCK K D, RAArZ K-H, *et al.* Characterization and use of deuterium lamps as transfer standards of spectral irradiance[J]. *Metrologia*, 2003, **40**(1):111-114.
- [15] HUANG Yu, WANG Shu-rong, ZHANG Zhen-duo, *et al.* Spectral irradiance calibration of space remote sensing spectral radiometer in range of UV and VUV[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**:187-191.
黄煜,王淑荣,张振铎,等. 空间遥感光谱辐射计紫外/真空紫外光谱辐照度定标技术[J]. *光子学报*, 2007, **36**:187-191.