

# 靶场紫外望远系统光学设计

李 博

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要** 紫外(UV)波段是靶场光电测量的重要方式,但紫外波段目标信号弱,可选取的光学材料很少,这都为高分辨率紫外观测带来了困难。设计的用于靶场的大相对孔径长焦距紫外望远系统解决了上述问题,利用折反系统与二次成像的方法获得  $F$  数 2、焦距 400 mm、视场  $1^\circ$ 、波段范围 250~400 nm 的紫外光学系统。经过光学软件分析,望远系统各视场奈奎斯特频率(38 lp/mm)调制传递函数(MTF)分别高于 0.7。考虑到外场环境的适应性,进一步考察了望远系统在  $-40^\circ\text{C}\sim 60^\circ\text{C}$  环境下的调焦量以及成像质量,分析结果表明,各温度下调焦后的奈奎斯特频率 MTF 均优于 0.5,设计结果满足靶场设计指标与实际应用需求。

**关键词** 光学设计; 靶场测量; 紫外遥感; 紫外成像

**中图分类号** V556.3      **文献标识码** A      **doi**: 10.3788/CJL201441.1016001

## Optical Design of Target Range UV Telescope System

Li Bo

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

**Abstract** Ultraviolet (UV) spectrum is an important method for photoelectric measurement. Ultraviolet target signal is weak, only a few kinds of optical materials in this spectral range can be chosen, so it's difficult for the high-resolution ultraviolet observations. A large relative aperture and long-focus UV optical system is designed which is used in target range measurement, and it solves those problems by catadioptric imaging and reimaging. The UV optical system has the parameters of  $F$  number of 2, focal length of 400 mm, field of view (FOV) of  $1^\circ$ , wavelength range of 250~400 nm. The Nyquist frequency (38 lp/mm) modulation transfer function (MTF) is better than 0.7 in the telescope system FOV according to the analysis of optical software. Taking into account the environmental adaptability, focusing amount and image quality are considered at  $-40^\circ\text{C}\sim 60^\circ\text{C}$  for the UV telescope system. Result shows that the Nyquist frequency MTF is better than 0.5 after focusing which meets the design specifications and the practical application.

**Key words** optical design; target range measurement; ultraviolet remote sensing; ultraviolet imaging

**OCIS codes** 120.4240; 110.4234

## 1 引 言

靶场紫外(UV)光学系统能够辅助可见光与红外光电设备进行多波段观测,对靶场测量具有重要意义<sup>[1-3]</sup>。国外对靶场紫外目标观测进行了大量研究,包括紫外目标光谱测量、日盲紫外观测、紫外告警技术、多波段光学观测技术等<sup>[4-7]</sup>。1977年,美国空军物理实验室(AFGL)进行了多光谱测量计划(MSMP)实验,获得 150 km 高空以下低推力火箭

发动机喷焰的紫外光谱、空间背景与总辐射强度的数据,仪器波段范围中包括真空紫外、紫外、近红外、短波红外、中波红外及长波红外多个观测波段,系统协同工作,跟踪并探测火箭发动机尾羽信号。实验获得了成功,仪器观测到了很强紫外波段信号<sup>[8]</sup>。近年来,美国、以色列与欧洲国家积极开发紫外告警仪,仪器利用日盲紫外波段(240~280 nm)这一太阳光谱盲区对来袭威胁目标进行告警。目前,紫外

**收稿日期**: 2014-03-21; **收到修改稿日期**: 2014-05-07

**基金项目**: 国家自然科学基金(41105014)

**作者简介**: 李 博(1981),男,博士,副研究员,主要从事紫外-真空紫外光谱技术方面的研究。

E-mail: libo0008429@163.com

告警技术已经在靶场测量、机载光学平台与车载光学平台得到了广泛的应用<sup>[9-11]</sup>。但日盲紫外波段大气透射率极低,主要缺点在两个方面:1) 对仪器的探测器灵敏度提出了极高要求,需要采用增强电荷耦合器件(ICCD)紫外面阵探测器,利用微通道板(MCP)对光阴极转换的电信号放大 $10^4 \sim 10^6$ 倍,再经荧光转换膜变成光信号由电荷耦合器件(CCD)接收,整个探测器造价昂贵、制作工艺要求严格、寿命较短(辐照信号越强寿命越短);2) 日盲紫外波段大气透射率极低,50 km以下的大气层对太阳日盲紫外波段产生了严重的吸收,在地面形成了观测暗背景,但目标的日盲紫外光谱也被大气严重吸收,这极大制约了光学系统的作用距离,目前,国外研制日盲紫外告警仪器最远做用距离不超过10 km。因此,该种类型仪器不适用于靶场远作用距离应用。

在国内,部分学者已经开展靶场紫外辐射传输特性与靶场紫外光电设备研究<sup>[12-13]</sup>,日盲紫外技术也已经应用到了机载与车载平台,而用于远作用距离的紫外光电设备及应用尚未开展深入研究。目前,紫外光电设备将是国内外靶场光电设备研究的重要发展方向,迫切需要研制相关靶场紫外望远系统。

根据靶场紫外观测的特点,本文设计了一套紫外望远系统,该系统具有作用距离远、相对孔径大、焦距长、加工成本低等优点,能够满足靶场应用要求,对靶场紫外光学测量、机载紫外光学探测具有重要意义。

## 2 应用要求及主要技术指标

紫外望远系统工作波段主要取决于应用需求与大气紫外传输特性,光学系统作用距离要求优于100 km,利用Modtran对不同作用距离下各紫外谱段大气透射率进行了分析,见图1,其中观测点设置于地面,观测方向距地面仰角为 $30^\circ$ ,可视距离

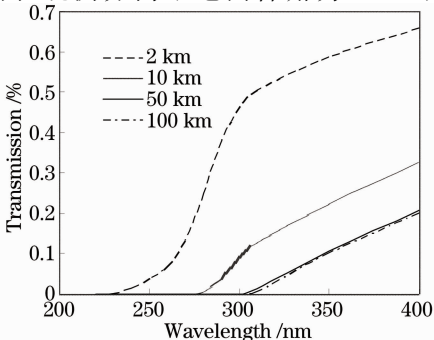


图1 不同作用距离下的大气透射率

Fig. 1 Atmosphere transmission in different distances

23 km。根据图中可知,在200~250 nm波段透射率极低,不适合观测应用,250~290 nm透射率较低,但在实际应用中目标与背景对比度极高,比较适合近距离观测,这也说明了日盲紫外波段应用的局限性,300~400 nm处大气透射率较高,比较适合远距离观测,根据不同观测距离的需求,望远系统工作波段在250~400 nm之间。

根据紫外目标、大气背景及大气光学传输特性,凌晨、黄昏与夜晚为望远系统最佳工作时间,目标背景对比度较高。根据约翰逊判据,发现目标光学系统焦面需要占 $2 \times 2$ 个像元,识别目标光学系统焦面需要占 $8 \times 8$ 个像元,要求识别100 km处尺寸为50 m的目标,对应的紫外望远系统空间分辨率至少为25 m(发现目标)与6.25 m(识别目标)。为了能更准确识别目标,获得更细致的目标形貌,考虑到光学系统与探测器像元尺寸,紫外跟踪系统100 km处空间分辨率为3.25 m。光学系统采用 $512 \times 512$ 像元紫外CCD,像元尺寸 $13.3 \mu\text{m}$ ,为满足光学系统分辨率,系统焦距可设为400 mm,此时光学系统视场约 $1^\circ$ ,能够满足经纬仪定位精度与常规目标的探测需求。紫外波段目标能量较弱,因此需要光学系统具有较大口径,根据系统设计能够达到的性能指标,综合考虑光学系统加工难度(无非球面)、装配精度与公差分配的情况下,紫外望远系统口径取200 mm, $F$ 数为2。表1总结了紫外望远系统主要技术指标。

表1 紫外望远系统主要技术指标

Table 1 Specifications of UV telephone system

Specifications	UV telephone
Field of view / $^\circ$	1
Focus length /mm	400
$F$ number	2
Aperture /mm	200
Spectral range /nm	250~400
Resolution / $^\circ$	0.0019
Pixel size / $\mu\text{m}$	13.3
Pixel	$512 \times 512$

## 3 紫外跟踪详查光学系统

紫外望远系统主要可采用三种结构,包括透射式、全反射式与折返式。对于透射型紫外望远系统,为了矫正紫外宽波段色差,需要引入 $\text{CaF}_2$ ,200 mm直径的 $\text{CaF}_2$ 晶体稀少,而且加工难度较大,为了消除色差及高级像差,光学系统结构复杂。全反射结构没有色差,结构简单,光学效率较高,但需引入非

球面,光学和检测工艺难度大,装调困难。折-反射式光学系统对环境温度变化不敏感,光学系统结构容易实现大相对孔径,无需引入非球面,光学工艺及装配难度比较折中。因此,本系统采用折-反射结构。为获得较大相对孔径,光学系统采用二次成像结构,折射元件能够校正球面反射镜的像差,其自身产生的色差可以通过不同的紫外光学材料抑制,能够使系统获得较好的成像质量。

### 3.1 紫外望远系统设计

根据目标与大气信杂比特点,紫外光学系统工作波段为 250~400 nm,可采用的紫外光学材料包括蓝宝石、融石英与氟化物晶体,考虑到系统加工的难易程度,蓝宝石材料较硬,难以满足加工精度要求,熔石英材料可塑性强、抗紫外辐照且容易加工制作,可作为镜头主要光学材料。光学系统工作波段较宽,还需要校正光学系统中存在的色差,根据可选的氟化物晶体材料,CaF<sub>2</sub>性能相对较好,因此,光学系统透镜材料主要选择熔石英与 CaF<sub>2</sub>。

在折反结构中,为降低透镜尺寸,只能采用反射式主镜结构,根据技术指标要求,主镜口径200 mm,焦距 400 mm,为控制系统整体结构,考虑到单个球面主镜无法满足成像质量要求,考虑到系统采用二次成像的折反结构,主镜一次成像,再经过中继透镜再次成像,通过中继透镜合理选择熔石英与 CaF<sub>2</sub>材料,能够校正系统球差与色差,获得较好的成像质量。折反结构将对主镜产生中心遮拦,光学系统在设计时应控制遮挡透镜与反射镜尺寸,本系统遮挡透镜直径约为 50 mm,主镜口径 200 mm,遮拦比较小,根据软件分析结果,主镜被遮挡后,光学系统奈奎斯特频率处调制传递函数(MTF)下降较小,约为 0.03。

为控制光学系统结构,一次像面被反射至主光路上方,中继透镜将对一次像面再次成像。在光学系统优化之前,一次像面位置放置场镜,这样能够降低中继透镜尺寸。在优化过程中,针对场镜部分主要有两种考虑:1)避免一次像面位于场镜内部,防

止透镜材料不均匀或微小气泡使二次像面产生斑点;2)为获得更好成像质量,要考虑对场镜复杂化,场镜复杂化需要尽量利用熔石英与 CaF<sub>2</sub>配合消色差,降低中继透镜复杂程度。经过光学系统优化后,场镜由单块透镜变成 CaF<sub>2</sub>+熔石英+CaF<sub>2</sub>的结构。光学系统在优化的过程中会产生较大场曲,为降低光学系统场曲,在 CCD 焦面前还需增加一块近似弯月型厚透镜来抑制光学系统场曲。

光学系统工作波段在 250~400 nm 之间,根据紫外光学系统特点,需要引入高抑制比紫外带通滤光片,根据大气背景紫外/可见/近红外波段的特性,在确保带外杂光优于 1%的情况下,要求滤光片抑制比达到 4OD。为使滤光片获得较高抑制比,必须对多块干涉滤光片叠加,根据干涉薄膜原理,由于滤光片入射角度的不同会引起透过中心波长发生变化,因此,要保证滤光片放置位置的入射光角度尽量保持一致。如果将滤光片放于光阑处,滤光片口径将达到 200 mm,滤光片面型以及胶合不易满足,这将对滤光片研制带来一定困难。综合考量,滤光片放置于场镜位置,这样既能够保证入射光角度接近一致,又降低了滤光片尺寸。

经过光学软件设计优化后,光学系统 38 线对处 MTF 约为 0.7,点列图均方根半径优于 9 μm,0.013 mm 径向能量就已经超过 80%,完全满足 CCD 像元成像要求。光学系统结构见图 2,光学系统结构参数见表 2,MTF 见图 3,点列图见图 4。

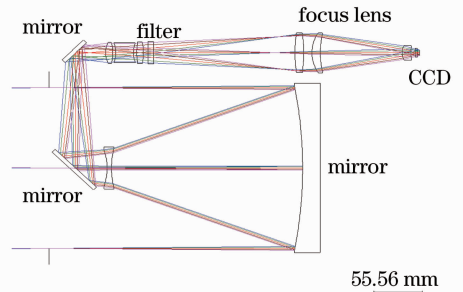


图 2 望远系统结构

Fig. 2 Structure of telescope system

表 2 光学系统结构参数

Table 2 Structural parameters of optical system

Element No.	Material	Front radius /mm	Thickness /mm	Back radius /mm	Thickness /mm
1	Mirror	-560.46	218.835	\	\
2	Silica	109.14	5	-73	35.7683
3	Mirror	Infinity	143.3058	\	\
4	Mirror	Infinity	34	\	\
5	CaF <sub>2</sub>	-29.79	8.377	49.2	3.397
6	Silica	34.544	20	-31.173	4.05

Element No.	Material	Front radius /mm	Thickness /mm	Back radius /mm	Thickness /mm
7	CaF <sub>2</sub>	-94.081	7.516	70.8	5.5
8	Filter	Infinity	6	Infinity	162.03
9	CaF <sub>2</sub>	-154.53	10	188.49	7.994
10	Silica	-46.13	-9.5748	110.66	93.24
11	CaF <sub>2</sub>	-17.625	10	-30	10
12			Image		

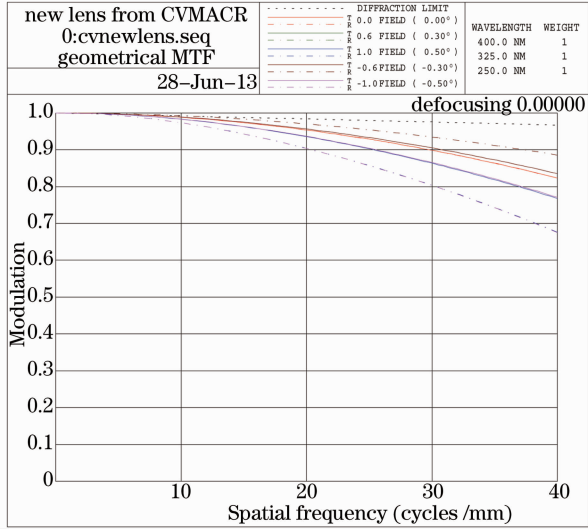


图 3 光学系统 MTF

Fig. 3 MTF of optical system

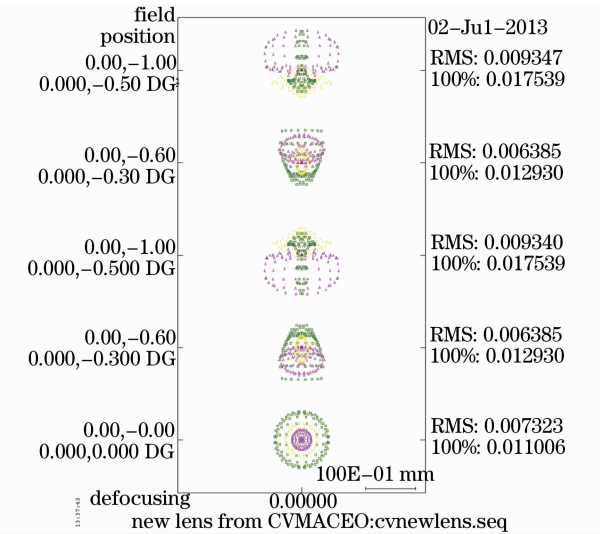


图 4 光学系统点列图

Fig. 4 Spot diagram of optical system

光学系统折转反射镜与焦平面为装配时可以作为补偿的部分,系统公差分析将焦平面与折转反射镜设置为角度与位置补偿,光学元件偏心、曲率半径、厚度最严公差为 0.02 mm,光学元件楔角最严公差 30",光学元件装配倾角最严公差 1'的情况下,边缘视场 CCD 奈奎斯特频率处 MTF 高于 0.4 的

装配概率高于 90%,中心视场 MTF 高于 0.6 的装配概率高于 90%,MTF 累积概率见图 5。分析结果表明,光学系统加工与装配容易实现,能够满足实际应用需求。

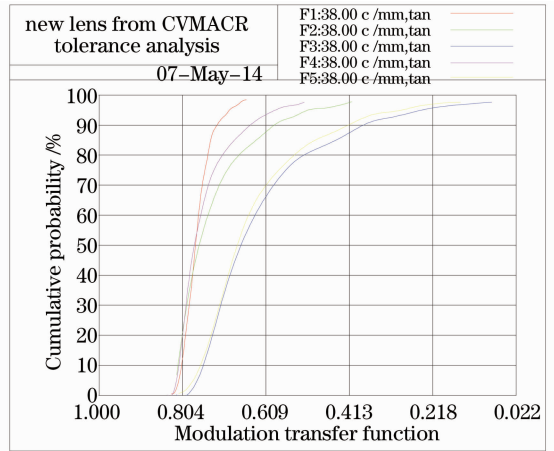


图 5 MTF 累积概率

Fig. 5 Cumulative probability of MTF

### 3.2 系统温度分析

一般情况下,光学系统在外场工作时温度一般在 -40 °C ~ 60 °C,系统工作温差较大,且系统焦距较长,因此需要考虑进行调焦。光学系统温度分析主要考虑以下三方面因素:1) 折射率随温度变化 (dn/dt),包括光学材料与空气;2) 介质的线膨胀系数,包括光学材料与结构材料;3) 光学元件曲率半径随温度变化。这些因素都将导致光学系统焦平面位置发生改变,需进行相应温度的分析。

系统光学元件采用氟化钙与熔石英两种材料,线膨胀系数分别为  $185 \times 10^{-7}$  与  $5 \times 10^{-7}$ ,325 nm 处,氟化钙与熔石英的折射率温变系数分别为  $-12.1 \times 10^{-6}$  与  $8.5 \times 10^{-6}$ 。光学系统结构的主要材料为碳钢,线膨胀系数为  $5.6 \times 10^{-7}$ 。

将折射率温变系数与各种材料膨胀系数参数代入光学软件,分析了光学系统在 60 °C、0 °C、-20 °C 温度下的离焦量与调焦量,见表 3 与表 4。光学系统调焦精度对成像质量至关重要,光学系统的焦深  $\frac{\lambda}{NA^2} \approx 5.2 \mu\text{m}$ ,根据表 3 与表 4 中离焦量变



化与调焦镜的变化数据可知,温度变化后焦面位置变化量为调焦镜变化量的 1/2,建议像面调焦精度优于 $\pm 0.01$  mm,这样能够使像面位置在望远系统焦深以内,保证各温度下的成像质量。利用光学软件对各温度下调焦后的成像质量进行了分析,包括 60 °C、40 °C、20 °C、0 °C、-20 °C、-40 °C 下的

MTF,见图 6,其中 20 °C 为软件初始设置 MTF,未考虑温度变化。根据图 5 中的 MTF 数据,各温度下光学系统调焦镜补偿后的 MTF 均优于 0.5,系统具有较好的温度适应性,能够满足光学系统外场工作的成像需求。

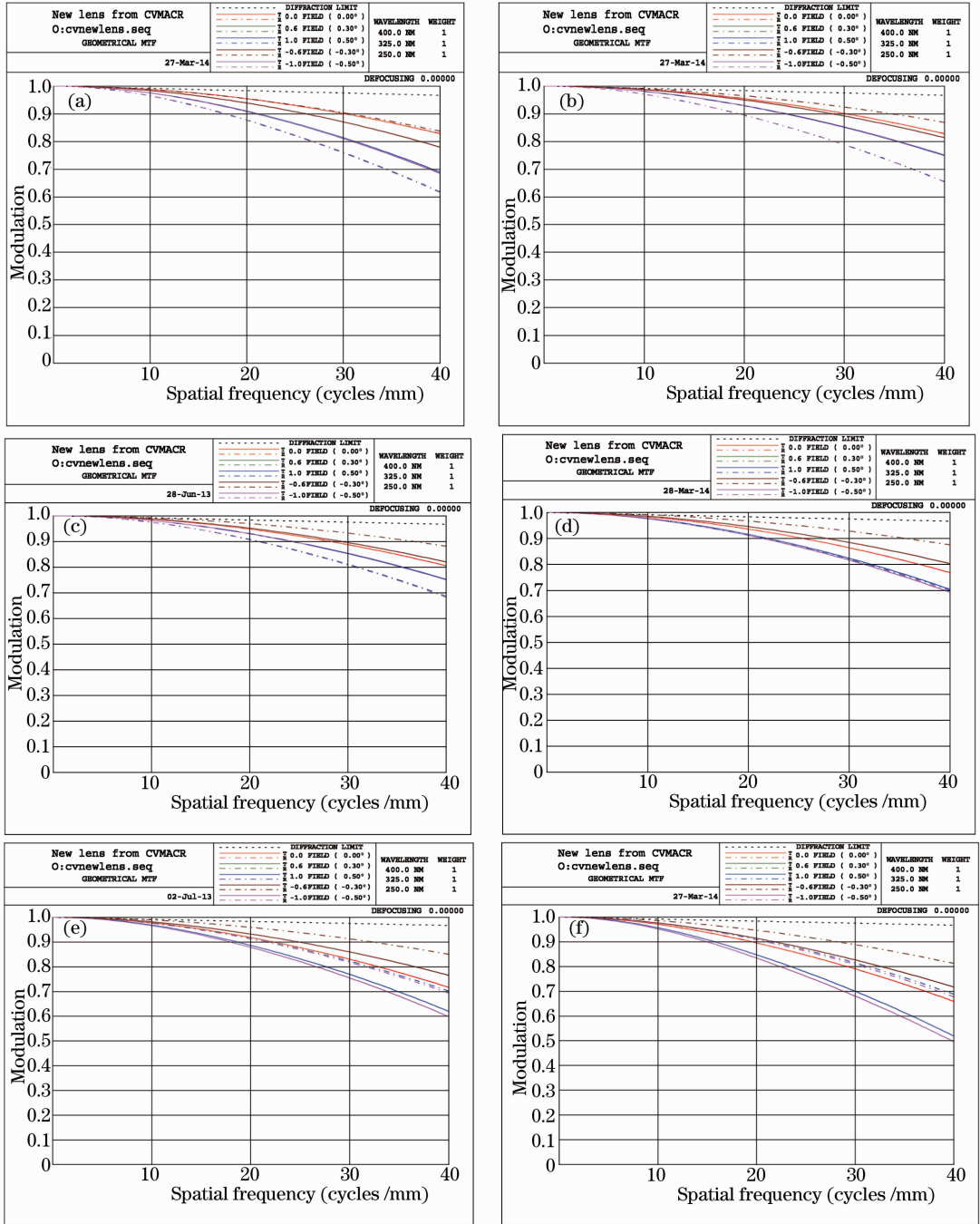


图 6 各温度下光学系统 MTF。(a) 60 °C；(b) 40 °C；(c) 20 °C；(d) 0 °C；(e) -20 °C；(f) -40 °C  
 Fig. 6 Optical system MTF in different temperatures. (a) 60 °C；(b) 40 °C；(c) 20 °C；(d) 0 °C；  
 (e) -20 °C；(f) -40 °C

表 3 焦面离焦量随温度变化

Table 3 Variety of defocusing amount in different temperatures

Parameter	Value					
Temperature / $^{\circ}\text{C}$	-40	-20	0	20	40	60
Defocusing amount /mm	0.2258	0.1510	0.0749	0	-0.0755	-0.1512

表 4 调焦镜位置随温度变化

Table 4 Distance of focus lens in different temperatures

Parameter	Value					
Temperature / $^{\circ}\text{C}$	-40	-20	0	20	40	60
Distance /mm	0.4627	0.3096	0.1552	0	-0.1568	-0.3144

## 4 结 论

紫外望远系统是目前靶场光电设备重要发展方向,国内的可见光与红外靶场观测设备已经成熟,紫外光电设备由于作用距离短、信号弱未得到应有的重视,近年来靶场观测开始朝多波段与多种手段方向发展。分析了紫外波段大气光谱传输特性,克服紫外波段观测作用距离短(日盲紫外小于 10 km)、光学材料少与相对孔径小的局限性,利用折反结构设计了工作波段 250~400 nm 的紫外大相对孔径望远系统,系统焦距 400 mm,  $F$  数为 2,系统奈奎斯特频率处 MTF 优于 0.7,光学系统工作温度范围  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,调焦镜的调焦量 0.77 mm,调焦精度  $\pm 0.01\text{ mm}$ 。该系统具有结构简单、无非球面、光学工艺容易实现、成本低的特点,能够满足靶场紫外观测需求。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Shurong, Li Futian, Qu Yi. Space UV optical remote sensing technology and development[J]. Chinese Journal of 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.
- 2 Li Bo, Wang Shurong, Wang Junbo. Optical design of space-based ultraviolet tracking and detailed reconnaissance system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0916003.  
李博,王淑荣,王俊博.天基紫外跟踪详查光学系统设计[J].中国激光,2013,40(9):0916003.
- 3 Louis H Reynolds, William D Ramsey, H D Wolpert, et al..

- Design and description of the ultraviolet plume instrument (UVPD)[C]. SPIE, 1989, 1158: 196-211.
- 4 Bruce D Guilmain. Midcourse space experiment (MSX), an overview of the program, organization, targets, and schedule [C]. SPIE, 1993, 2232: 188-199.
- 5 D J Strickland, R Link, L J Paxton. Far-UV remote sensing of thermospheric composition and the solar EUV flux[C]. SPIE, 1993, 1764: 117-131.
- 6 Lou Ying, Bai Tingzhu. A study on UV missile plume emission model[C]. SPIE, 2006, 6031: 60310F.
- 7 J L Rapanotti. FLUENT-based modeling of rocket exhaust signatures[C]. SPIE, 2006, 6239: 62390S.
- 8 Adalbert McIntyre. Multispectral measurements program (MSMP) results and status[C]. SPIE, 1978, 156: 116-119.
- 9 R Jeenu, K Pinumalla, D Deepak. Size distribution of particles in combustion products of aluminized composite propellant[J]. J Propulsion and Power, 2010, 26(4): 715-723.
- 10 F W Schenkel, B S Orgorzalek. Auroral images from space: imagery, spectroscopy, and photometry[J]. Johns Hopkins APL Tech Dig, 1987, 8: 309-317.
- 11 R C Henry, J Murthy, M Allen, et al.. Spectroscopy and imaging of the cosmic diffuse UV background radiation[C]. SPIE, 1992, 1764: 61-71.
- 12 Guo Aiyan, Bai Tingzhu, Hu Haihe, et al.. Analysis of ultraviolet radiation characteristics of solid propellant rocket motor exhaust plume[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1016002.  
国爱燕,白廷柱,胡海鹤,等.固体火箭发动机羽烟紫外辐射特性分析[J].光学学报,2012,32(10):1016002.
- 13 Guo Aiyan, Bai Tingzhu, Tang Yi, et al.. UV plume simulation for a solid propellant rocket[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(s1): 295-299.  
国爱燕,白廷柱,唐义,等.固体火箭发动机羽烟紫外辐射仿真研究[J].光学学报,2009,29(s1):295-299.

栏目编辑:韩峰