

· 光学设计 ·

临近空间红外紫外双色预警光学系统分析与设计

王文丛, 金东东, 李文斌, 胡慧君, 史钰峰, 楚新波, 罗玉祥, 邵思霏

(山东省航天电子技术研究所, 山东 烟台 264000)

摘要:对日盲紫外预警和红外预警的相关发展现状进行了综述。针对当前对临近空间导弹预警载荷的应用需求,提出了一种覆盖日盲紫外(250~280 nm)、中波红外(3 000~5 000 nm)双波段预警系统。系统采用双波段实现对导弹等军事目标的探测和预警,可以有效的减少虚警率。该光学系统利用一个离轴三反系统作为主光学系统,利用分束器分别实现对两个波段的分光。根据两个波段光学系统所使用的探测器以及相应的应用需求,完成了对两个波段光学系统结构计算与光学设计工作。设计完成之后,两个波段光学系统的MTF在奈奎斯特频率分别为:日盲紫外 $MTF > 0.8@39$ lp/mm,中波红外 $MTF > 0.8@17$ lp/mm,两个光学系统最大RMS光斑直径小于一个探测器的尺寸,单个像元能量集中度大于80%。

关键词:临近空间;双色预警;双波段;光学系统设计

中图分类号:O439

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2017)-05-0005-07

Analysis and Design of Optical System for the Infrared and Ultraviolet Warning in the Near-space

WANG Wen-cong, JIN Dong-dong, LI Wen-bin, HU Hui-jun, SHI Yu-feng, CHU Xin-bo, LUO Yu-xiang, SHAO Si-pei

(Shandong Aerospace Electro-technology Institute, Yantai 264000, China)

Abstract: The relevant development status of solar blind ultraviolet and infrared warning is reviewed. According to current application demands for the missile warning payload in near-space, a dual-band early warning system is presented, which covers the solar blind ultraviolet 250~280 nm and middle wavelength infrared (MWIR) 3 000~5 000 nm. The dual-band system is used to realize the detection and warning to military targets such as missile, which can effectively reduce the false alarm rate. A three-mirror off-axis system is taken as the main anti-optical system and the splitter is used to realize beam splitting on two spectral bands. According to the detector used by the optical systems on two bands and the corresponding application needs, the structure calculation and optical design of the optical system are completed. After the design is completed, the modulation transfer function (MTF) of two bands of the optical system at Nyquist frequency are solar blind ultraviolet $MTF > 0.8@39$ lp/mm and MWIR $MTF > 0.8@17$ lp/mm respectively. The maximum root mean square (RMS) spot diameter of two optical systems is smaller than the size of a detector and the single cell energy concentration is greater than 80%.

Key words: near-space; dual-band warning; dual-band; optical system design

在如今的高科技战争中,导弹已成为攻击飞机、战车等空中和地面目标的强有力的武器。因此,在现代战争中如何及早发现威胁,防止和减小精确制导导弹的攻击,已经成为导弹告警技术面临

的新课题,发展先进的导弹告警技术是提高作战平台生存能力的重要措施^[1-3]。

根据应用波段的不同,导弹告警技术分为紫外预警和红外预警两种方式。两种预警探测系统共

收稿日期:2017-07-01

作者简介:王文丛(1987-),博士,工程师,主要研究领域为光学系统仿真、设计等。

性工作原理为:系统将目标和背景发出的辐射接收,辐射信号中包含日盲紫外和红外两个波段。然后再通过一些算法软件以及高速的图像处理硬件对所接收的信息进行提取,得出所探测目标的特性以及目标的运动曲线,然后将这些信息作为情报提供供给系统。

早期的导弹预警都以红外预警为主,这是因为由于导弹尾焰辐射的谱线在 $2.7\ \mu\text{m}$ 和 $4.3\ \mu\text{m}$ 处具有特征峰,且 CO_2 和水蒸气对这两个谱段有强烈的吸收,因此早期的导弹预警大都选择这两个谱段。红外预警系统这种被动的工作方式有着自身的一些优势,例如抗干扰能力较强,隐蔽性较好,可在任何时间工作^[4-5]。

但是目前的导弹的发动机很多技术方面的改进正在努力降低导弹尾焰在这个两个特征峰处的辐射强度。目前国外已经生产设计了出了导弹尾气中不含有 CO_2 和水蒸气的发动机,这导致导弹尾焰中的红外辐射大大降低,使得红外预警的虚警率大大增高^[6-7]。并且目前所发展的激光武器大都集中在红外波段,对红外预警系统的安全性也产生了一定的威胁。因此单纯红外预警系统已经逐渐的不能满足技术发展的需求,紫外预警系统应运而生。

紫外预警光学系统是探测导弹尾焰和羽烟中的紫外辐射,达到对导弹进行预警的目的。无论导弹采用任何材料,其尾焰中都会含有紫外辐射。紫外预警是利用“日盲紫外”探测飞出大气层外导弹尾焰的紫外辐射。“日盲紫外”是指 $0.25\sim 0.28\ \mu\text{m}$ 的谱段,其形成主要是由于太阳辐射(紫外辐射的主要来源)的这一波段的光波绝大部分被地球的臭氧层所吸收,只有极少数的自然太阳光能射到地面。当目标物体的高度超过 $50\ \text{km}$ 之后,由于臭氧的减少,大气对紫外波段的吸收作用下降,紫外目标信号增强。因此当军事目标譬如导弹出现在臭氧层之外的时候,其发动机尾焰的紫外辐射不受大气吸收和衰减的影响,到达紫外探测设备的信号较强,而背景信号很小并且很平滑,紫外探测仪接收到的紫外信号的信噪比就相当高,从而达到对军事目标进行探测预警的目的^[8-10]。

红外预警和紫外预警各有其优势,但是单一的预警方式很难对目标进行有效的探测。为了减少虚警率,提高预警效率研究,紫外-红外双色预警技

术具有重要意义。

目前发展的导弹预警系统大都基于天基探测,但是天基探测具有成本高、在轨维护比较困难的特点。目前对于临近空间载荷的需求越来越迫切^[11-12]。

临近空间(near-space)是空天一体化作战的重要战略领域,其是处于太空和天空之间的区域($20\sim 100\ \text{km}$),处于传统的空天之间,其下面的区域在临近空间中部署的军事装备,向上可威胁天基平台,向下可攻击航空器等空基平台,甚至地面目标,并可以相对较低的成本完成通信、遥测、情报、侦察和监视等各种军事任务。作为一个新兴的研究领域,临近空间将传统的航天与航空联系在一起,在未来空间攻防、信息对抗、一体化联合作战方面具有重要的应用价值和特殊的军事战略意义。因此,世界主要军事强国正在对临近空间平台的军事应用展开深入研究,从而在未来的军事对抗中获取优势及主导地位。

1 国外发展现状

由于光学预警系统的重要性,其受到了研究机构的广泛关注^[13-19]。

美国的天基红外预警系统在20世纪60年代初期开始研制,主要是对目标、背景与大气的红外辐射特性、相互作用与影响进行深入的基础研究,并开展了一系列工程试验。1970年正式确定了基本方案,即地球同步轨道卫星的预警方案。

70年代末,美国研制了真空紫外(VUV)背景卫星试验装置,搭载在1978年发射的S3-4极轨卫星上。该仪器包括了光谱仪和光度计两部分。极光/电离层绘图仪AIM(auroral ionospheric mapper)除可进行光谱和光度测量外,也具有获得特定波段单色像的能力。该仪器由紫外光谱仪和光度计组成。紫外辐射通过扫描镜后被抛物镜聚焦在Ebert-Fastie光谱仪的入射狭缝上,光谱仪焦距 $125\ \text{mm}$,工作波段 $110\sim 190\ \text{nm}$,光谱分辨率 $3\ \text{nm}$,仪器视场角 $0.4^\circ\times 1.7^\circ$,在 $100\sim 150\ \text{km}$ 极光、气辉高度的空间分辨率为 $4\ \text{km}\times 20\ \text{km}$,扫描宽度 134.8° ,扫描周期 $3\ \text{s}$ 。探测器采用CsI阴极日盲型光电倍增管,能有效阻止可见光和近紫外波段背景辐射对测量结果的干扰。

1991年,美国进行了星实验室(STARLAB)空间

试验任务,其目标之一就是进行导弹尾焰、空间、地球及临边背景的高分辨率多波段观测,获得目标和背景辐射强度随时间、空间及光谱的变化,轨道高度 330.4 km,轨道倾角 33.4°。其上搭载的紫外相机设备(UVCA)工作于 0.2~0.32 μm ,光学系统采用卡塞格林望远镜结构,口径 200 mm,采用 8 片滤光片轮实现不同波长的观测,探测器采用像增强器与面阵 CCD 耦合器件。

1992 年美国天基红外系统(SBIRS)计划获得批准,SBIRS 包括空间段和地面段两部分,空间段由低轨卫星星座、高轨卫星星座和静止轨道卫星星座 3 种组成。

1996 年美国发射了中段空间试验 MSX (mid-course space experiment) 卫星,其轨道为高度 888 km 倾角 99.16°的圆形近太阳同步轨道。其上搭载了紫外可见光成像仪与光谱成像仪(UVISI),获得了大量背景和特性目标的探测结果,为导弹探测预警提供了宽波段的精确背景辐射。

2003 年,将 GUVI 进一步改进为 SSUSI,搭载在 DMSP 卫星上对热层和电离层空间天气效应进行监测。

2007 年 4 月 25 日,美国发射了 AIM 卫星,轨道高度 600 km,倾角 97.78°。其上搭载了 CIPS 载荷,通过 4 台紫外相机拼接实现大视场覆盖。

文中分析了光学预警系统的原理和特点,总结了光学预警成像系统的发展现状,并设计了一款基于临近空间的紫外-红外双色预警光学系统。设计完成之后,双色光学系统具有成像质量好、结构简单紧凑的特点,具有很高的应用价值。

2 系统基本原理

文中所提出的基于临近空间双色预警光学系统如图 1 所示。系统由三部分组成,即主光学系统、紫外分成像光学系统和红外分成像光学系统。系统的工作原理为:目标物体发出的光束经过主光学系统之后,经由分束器分成两个波段的光,即日盲紫外波段和红外波段,两个波段的光分别经过紫外分成像光学系统和红外分成像光学系统之后,在探测器上就可以获得目标物体的信息,将两个波段的目标物体的信息进行整合处理之后,就可以达到对目标物体进行双色预警的目的。

由于预警的目标信号都比较弱,因此需要增大

光学系统的口径去提高系统的信噪比。离轴三反式光学系统具有结构紧凑,易消像差的优点,因此主光学系统采用离轴三反式无焦光学系统实现焦距缩放和光束口径压缩,并且可以有效的降低后置光学系统的口径,减少整个光学系统的体积和重量。利用分束器分别实现对两个波段的分光,分束器材料选择为氟化钙材料,考虑到紫外波段在材料的透过率比较低,因此选择反射紫外,透射红外的分光束方法。假设主光学系统的缩放倍率为 β ,则与后置紫外与红外分成像光学系统相结合之后,与单独的两个分成像光学系统相比,整个系统的焦距扩大了 β 倍,这样整个系统的空间分辨率也相应的扩大 β 倍。

该系统可以同时实现对目标物体的紫外与红外预警,并且具备结构紧凑、易于实现的优点。

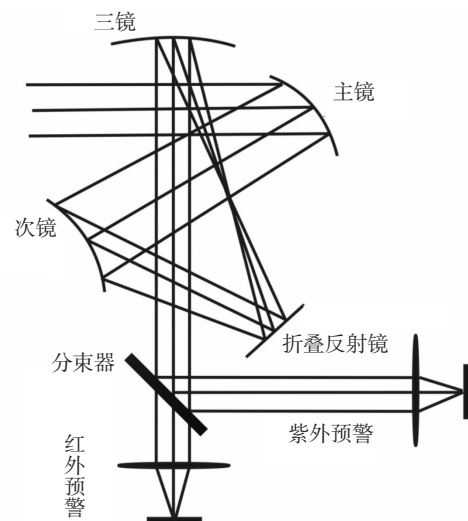


图1 临近空间双波段预警光学系统结构图

3 光学系统分析与设计

该部分主要是对所提出的日盲紫外光学系统进行分析与设计工作,包括光学系统参数计算、主光学系统设计、紫外预警光学系统设计、红外预警光学系统设计。首先是光学系统参数计算。

3.1 光学系统参数计算

所提出的双色预警光学系统是基于临近空间探测,临近空间的高度为 20~50 km,根据临近空间

大气层的分布,取作用距离 $H=50\text{ km}$,其探测刈幅宽度如式(1)所示

$$a = 2H \tan(\omega) \quad (1)$$

其中, a 为探测刈幅宽度; ω 为系统的半视场角,由于采用同一个主光学系统,因此两个波段光学系统的视场角相同。

结合对相关预警光学系统的研究,其刈幅宽度要大于 2 km ,则代入式(1)中可以得出,其系统的视场角要大于 1.14° ,取其视场角 $\omega = \pm 2^\circ$ 。

“日盲紫外”预警光学部分包括主光学系统和紫外分成像光学系统,整个系统所采用的探测器为E2V公司的4 820紫外探测器,其参数为:像元数 $1\ 024 \times 1\ 024$,像元尺寸为 $13\ \mu\text{m}$,系统的奈奎斯特频率为 39 lp/mm ,则紫外预警光学部分的焦距 f_1' 如式(2)所示

$$f_1' = \frac{1\ 024 \times 13 \times \sqrt{2}}{2 \times 1\ 000 \tan(\omega)} = 270\text{ mm} \quad (2)$$

其在 50 km 处可以实现的空间分辨率为

$$\text{GSD}_1 = \frac{H \times 13}{1\ 000 \times f_1'} = 2.41\text{ m} \quad (3)$$

与“日盲紫外”预警光学部分类似,红外预警光学部分由主光学系统和红外分成像组成,整个系统所采用的探测器为法国Sofradir公司所生产的制冷型碲镉汞面阵探测器,其波谱范围为 $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$,中心波长为 $4\ \mu\text{m}$ 。其像元数为 512×512 ,像元尺寸为 $30\ \mu\text{m}$,其奈奎斯特频率为 17 lp/mm ,红外预警光学部分的焦距 f_2' 如式(4)所示

$$f_2' = \frac{512 \times 30 \times \sqrt{2}}{2 \times 1\ 000 \tan(\omega)} = 310\text{ mm} \quad (4)$$

其在 50 km 处可以实现的空间分辨率为

$$\text{GSD}_1 = \frac{H \times 30}{1\ 000 \times f_1'} = 4.84\text{ m} \quad (5)$$

对于主光学系统而言,其主要作用为实现光束缩放以及视场压缩,出于设计和加工方面的考虑,取主光学系统的缩放倍率 $\beta=0.25$,则对于紫外和红外分成像光学系统而言,其焦距和视场角分别为

$$f_{11} = f_1' / \beta = 67.5\text{ mm} \quad (6)$$

$$\omega_1 = \omega \times \beta = 8 \quad (7)$$

$$f_{22} = f_2' / \beta = 77.5\text{ mm} \quad (8)$$

$$\omega_2 = \omega \times \beta = 8 \quad (9)$$

根据以上分析与计算,可以得出临近空间紫外红外双色预警光学系统的参数,如表1所示。

表1 双色预警光学系统参数表

	紫外预警光学部分	红外预警光学部分
视场角/ ω	$\pm 2^\circ$	$\pm 2^\circ$
焦距/mm	270	310
作用距离/km	50	50
空间分辨率/(m)@50 km	2.41	4.84
$F^\#$	2	2
MTF	$>0.7@39\text{ lp/mm}$	$0.8@17\text{ lp/mm}$

3.2 前置无焦光学系统设计

根据前面分析计算的光学系统参数,完成了相应的光学系统设计工作,包括主光学系统,紫外预警光学系统设计和红外预警光学系统设计,首先为主光学系统设计。

由前面的分析可知,主光学系统为无焦系统,其目的主要是对焦距进行缩放,对视场进行压缩,由前面分析可知,其放大倍率 $\beta=0.25$,视场角 $2\omega=\pm 2^\circ$,系统为一个缩束系统。出于光学系统透过率 and 设计方面的考虑,前置无焦光学系统采用离轴三反式光学系统。在设计的时候,为了避免各个反射面之间的光束干扰,将第三反射镜移从由于无焦光学系统无法评价其成像质量,因此在系统设计的时候引入一个理想透镜,其设计图如图2所示。

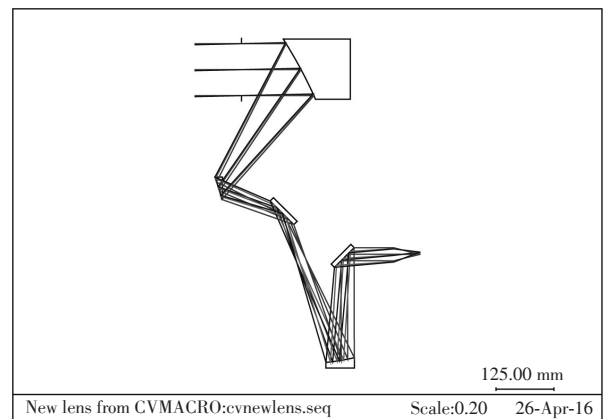


图2 主光学系统设计图

系统采用离轴三反式结构,利用一个 45° 平面镜实现光路的偏转。为了提高成像质量,系统的三个反射镜均采用非球面结构,并且在表面镀有紫外-红外增反膜。

图3为前置无焦光学系统的MTF,由图可得系统的MTF可以接近衍射极限。

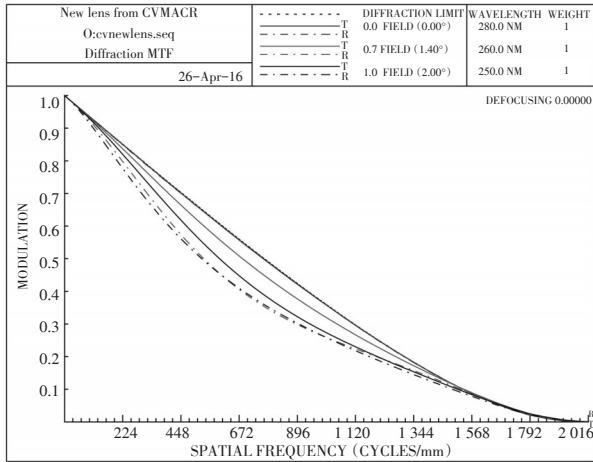


图3 主光学系统MTF

图4为系统的点列图,其中最大RMS光斑直径为0.8 μm,由两图可得前置无焦光学系统像差校正良好。

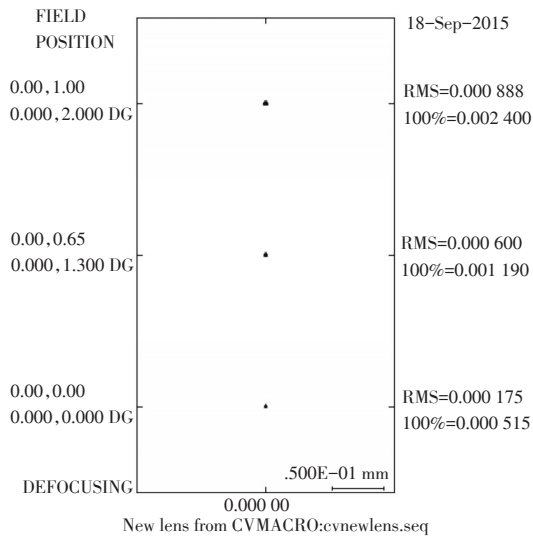


图4 主光学系统点列图

3.3 紫外预警光学通道系统设计

由以上分析可得紫外分成像光学系统参数为:视场角 $2\omega=\pm 8^\circ$,焦距 $f'=67.5\text{ mm}$, $F^\# = 2$ 。根据以上参数完成了紫外预警光学系统的设计工作,其结构图如图5所示。

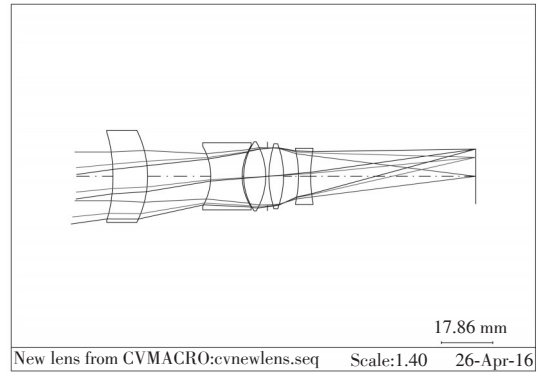


图5 紫外分成像光学系统设计图

系统采用5片式成像结构,材料为氟化钙和紫外熔石英的组合,以消除系统的色差。

图6为紫外分成像光学系统MTF。由图6可得,在探测器Nyquist 39 lp/mm处系统的MTF>0.8。

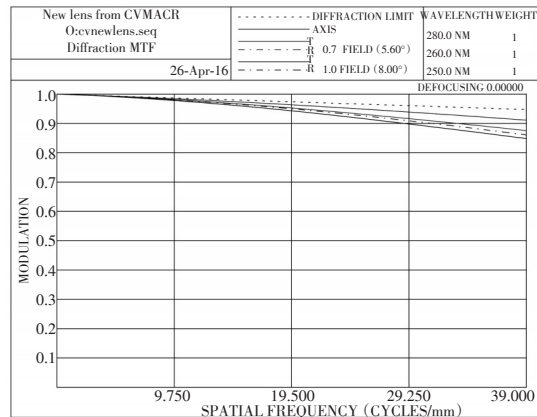


图6 紫外分成像光学系统MTF

将紫外预警分成像光学系统与主光学系统整合之后,对紫外预警光学部分进行优化设计,其设计图如图7所示。

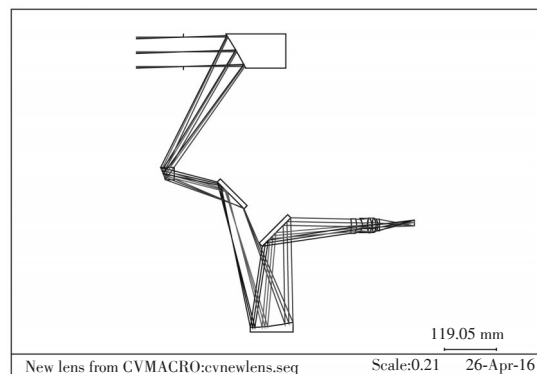


图7 紫外预警光学部分设计图

图8为紫外预警光学系统的MTF。由图8可得,经过优化设计之后,系统MTF在探测器Nyquist 39 lp/mm处系统的MTF>0.8。

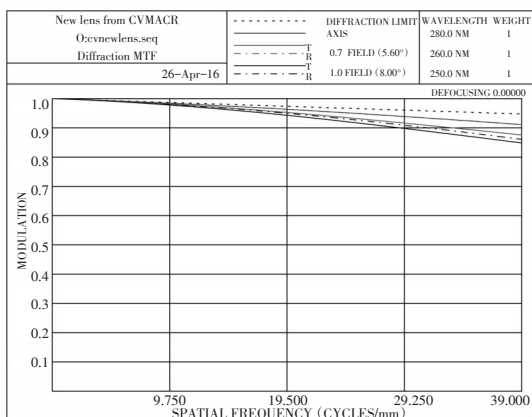


图8 紫外预警光学部分 MTF

图9为紫外预警光学系统的点列图。由图9可得,系统最大RMS光斑直径为7.036 μm,小于一个探测器的尺寸。

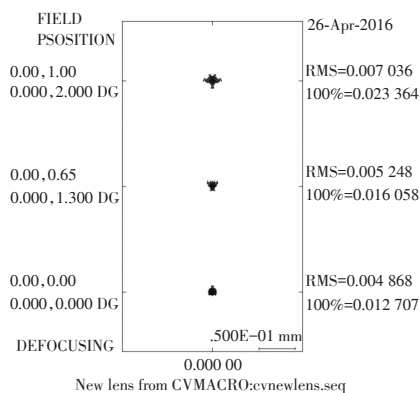


图9 紫外预警光学系统点列图

图10为紫外预警光学系统的能量集中度曲线。

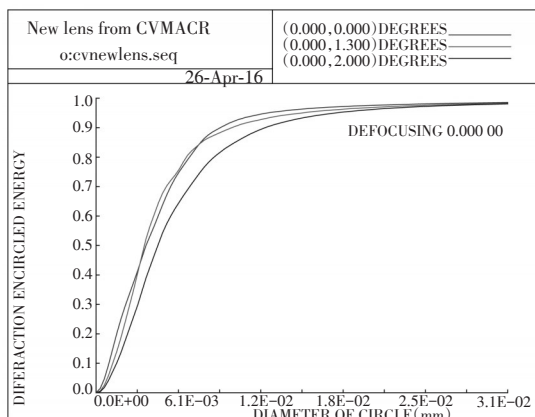


图10 紫外预警光学部分系统包围能量曲线

由图10可得,在单个像元范围内,系统的能量集中度>80%。可以满足系统要求。

3.4 红外预警光学系统设计

红外预警光学系统由一个主光学系统和后置红外分成像光学系统组成,后置红外分成像系统的参数为: $2\omega=\pm 8^\circ$,焦距 $f'=77.5\text{ mm}$, $F\#=2$ 。根据以上参数,完成了红外分成像系统的设计工作,其设计图如图11所示。系统由九片镜子组成,材料为硅和锗的组合,系统采用二次成像的方式,实现100%冷屏光阑匹配效率。

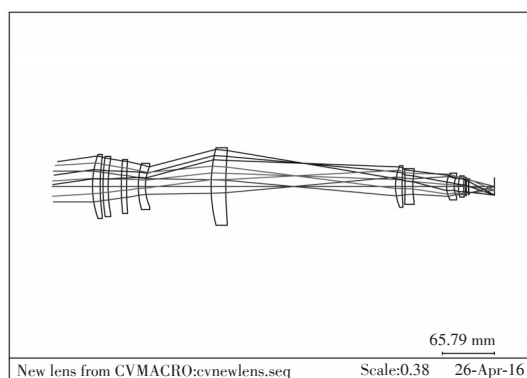


图11 红外分成像光学系统设计图

图12为红外分成像系统的MTF。由图可得,系统在探测器Nyquist 17 lp/mm处系统的MTF>0.7。

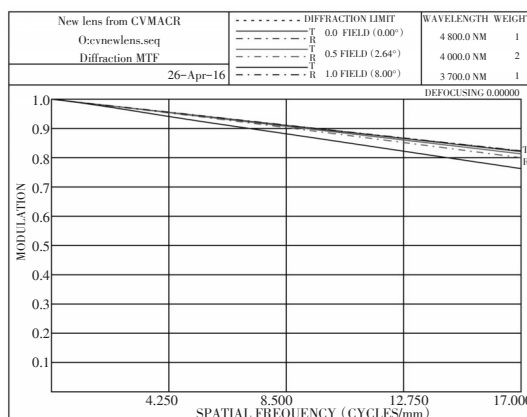


图12 红外分成像系统 MTF

将红外分成像光学系统与主光学系统整合之后,对红外预警光学部分进行优化设计,其设计图如图13所示。在系统优化过程中,在系统分束镜后引入一个折转反射镜,用来折转光路,减少系统的体积。

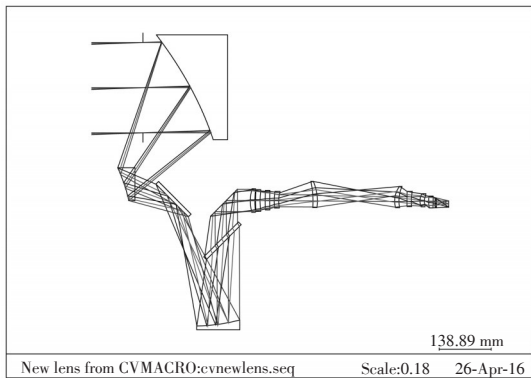


图13 红外预警光学系统设计图

图14为红外预警光学系统的MTF。由图可得,经过优化设计之后,系统在探测器Nyquist 17 lp/mm处系统的MTF>0.8。

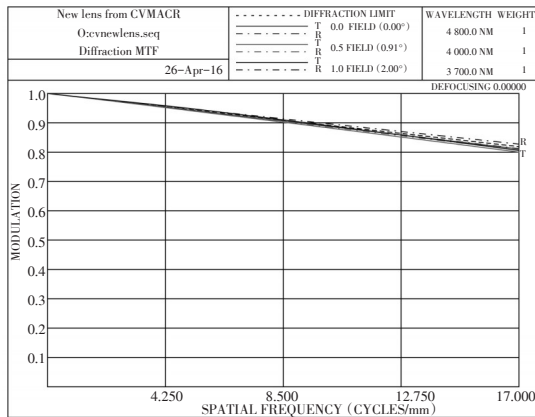


图14 红外预警光学系统MTF

图15为红外预警光学系统的点列图。由图15可得,系统最大RMS光斑直径为8.43 μm,小于一个探测器的尺寸。

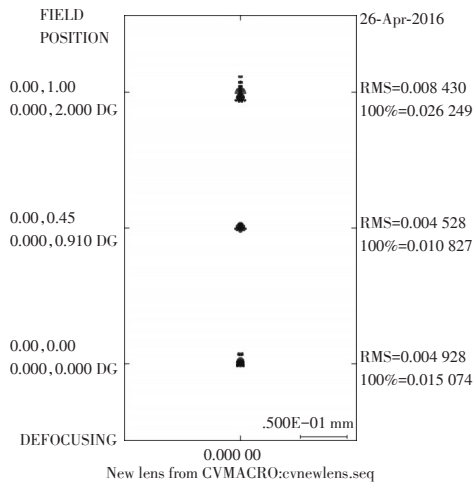


图15 红外预警光学系统点列图

图16为红外预警光学系统的能量集中度曲线。由图16可得,在单个像元范围内,系统的能量集中度>80%,可以满足系统要求。

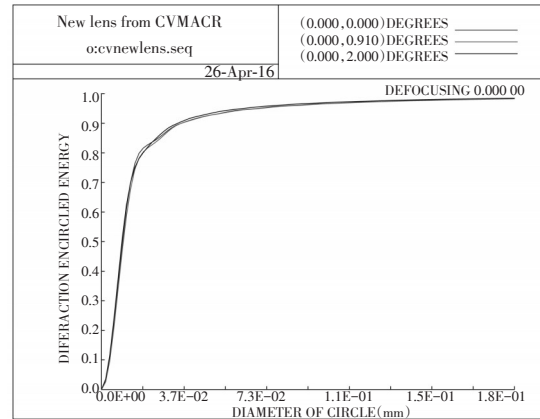


图16 红外预警光学系统包围能量曲线

4 结论

对光学预警的相关发展现状进行了综述,根据相关的发展需求,提出了一种基于临近空间的紫外-红外双色预警光学系统。该结构可以实现对导弹等军事目标的双色预警。完了对光学系统参数计算工作,根据所计算的参数,对紫外预警和红外光学系统进行了设计。设计完成之后,两个波段的光学系统的MTF在探测器Nyquist频率处均大于0.8,两个光学系统最大RMS光斑直径小于一个探测器的尺寸,单个像元能量集中度大于80%。该光学系统结构简单,易于实现,其在导弹预警、航空航天遥感、军事目标探测等很多方面具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 王志刚. 战场光电信号环境分析[J]. 光电技术应用, 2005, 20(3): 14-15.
- [2] 晋培利, 李晓林, 毛登森, 等. 红外预警探测系统的现状和发展[J]. 光电技术应用, 2006, 21(3): 1-4.
- [3] 崔长琦. 21世纪空袭与反空袭[M]. 北京: 解放军出版社, 2002: 97.
- [4] 蒋跃, 邓磊, 臧鹏. 美国天基红外预警系统的发展现状和技术特点[J]. 空军雷达学院学报, 2011, 25(2): 105-112.
- [5] 赵强, 刘隆和, 唐志凯. 目标在复杂背景中的红外成像

(下转第23页)

- Journal of the Franklin Institute, 2015, 352(8): 3166-3177.
- [12] WEI Y Y, ZHOU H P. Parameter identification adaptive synchronization of Liu chaotic system[J]. Journal of Henan Institute of Science and Technology, Natural Science Edition, 2017, 11(2): 69-81.
- [13] WANG Z Y, HUANG L H, YANG X X. Adaptive modified function projective lag synchronization for two different chaotic systems with stochastic unknown parameters[J]. Mediterranean Journal of Mathematics, 2016, 13(3): 1391-1405.
- [14] ALASWALHA M M, ALASWALHA A. Anti-synchronization of fractional order chaotic and hyperchaotic systems with fully unknown parameters using modified adaptive control[J]. Open Physics, 2016, 14(1): 304-313.
- [15] LI C, Lü L, SUN Y, et al. Parameter identification and synchronization for uncertain network group with different structures[J]. Physica A, 2016, 457(14): 624-631.
- [16] LI C P, SUN W G, KURTHS J. Synchronization between two coupled complex networks[J]. Physical Review E, 2007, 76(2): 046204.
- [17] TANG H W, CHEN L, LU J A, et al. Adaptive synchronization between two complex networks with nonidentical topological structures[J]. Physica A, 2008, 387(22): 5623-5630.
- [18] ZHAI S, XIAO M, LI Q. Synchronization analysis of coupled identical linear systems with antagonistic interactions and time-varying topologies[J]. Neurocomputing, 2017, 244(12): 53-62.
- [19] ZHAI S D. Modulus synchronization in a network of nonlinear systems with antagonistic interactions and switching topologies[J]. Communications in Nonlinear Science & Numerical Simulations, 2016, 33(12): 184-193.
- [20] PROSKURNIKOV A V, MATVEEV A S, CAO M. Opinion dynamics in social networks with hostile camps: consensus vs. polarization[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2016, 61(6): 1524-1536.
- [21] LI X, WANG X F, CHEN G R. Synchronization in complex dynamical networks and its applications[J]. Journal of Ningxia University, 2010, 31(1): 44-48.
- [22] WU H Q, WANG L F, NIU P F, et al. Global projective synchronization in finite time of nonidentical fractional-order neural networks based on sliding mode control strategy [J]. Neurocomputing, 2017, 235(C): 264-273.
- [23] WANG D Y, LI L S. Mean-square stability analysis of discrete-time stochastic Markov jump recurrent neural networks with mixed delays[J]. Neurocomputing, 2016, 189(12): 171-178.

~~~~~  
 (上接第11页)

- 特性研究[J]. 制导与引信, 2005, 26(3): 15-17.
- [6] 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.
- [7] 唐绍凡, 沈洪兵. 天基导弹紫外预警及紫外预警探测仪[J]. 航天返回与遥感, 2003(4): 25-27.
- [8] 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.
- [9] 李炳军, 江文杰, 梁永辉. 基于导弹羽烟紫外辐射的日盲型探测器[J]. 航天电子对抗, 2006, 22(6): 7-10.
- [10] 于远航, 王文生. 折衍混合紫外告警光学系统设计[J]. 激光技术, 2012, 36(3): 421-427.
- [11] 何彦峰. 浅析临近空间平台的军事应用[J]. 尖端科技, 2007, 6: 31-35.
- [12] 汪连栋, 曾勇虎, 高磊, 等. 临近空间高超声速目标雷达探测技术现状与趋势[J]. 信号处理, 2014, 30(1): 72-85.
- [13] 王红. 大相对孔径大视场紫外告警相机光学系统[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3212-3216.
- [14] 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): 0916003-1-0916003-5.
- [15] Smathers H W, Horan D M, Cardon J G, et al. UVPI Imaging from the LACE Satellite[R]. The Starbird Rocket Plume, 1993.
- [16] Bechis K P. UV observations during the STARLAB space shuttle mission[J]. SPIE, 1989, 1158: 232-241.
- [17] Kordas J F, Lewis I T, Priest R E, et al. UV/visible camera for the clementine mission[J]. SPIE, 1995, 2478: 175-186.
- [18] Morrison D, Paxton L, Humm D, et al. On-orbit calibration of the special sensor ultraviolet scanning imager (SSUSI): a far-UV imaging spectrograph on DMSP F-16[J]. SPIE, 2002, 4485: 328-337.
- [19] Rusch D W, Thomas G E, McClintock W, et al. The cloud imaging and particle size experiment on the aeronomy of ice in the mesosphere mission[J]. Instrument Concept, Design, Calibration and on-orbit Performance Journal of Atmospheric and Solar-terrestrial Physics, 2009, 71: 356-364.