

双 DMD 变焦红外双波段场景模拟器光学引擎设计

潘越*, 徐熙平, 乔杨

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要:为仿真现实场景中目标和干扰的光谱分布差异,设计了一种基于双数字微镜器件(DMD, Digital Micro-mirror Device)的双通道、共口径、变焦光学引擎,包括投影光学系统和两套照明光学系统.光学引擎以红外中波和长波柯勒远心光路分别直接照明两 DMD 靶面,采用空间立体布局避免不同光路间干扰.设计结果表明:照明光学系统的照度均匀性优于 94%;中波(3.7~4.8 μm)和长波(8~12 μm)内,变焦投影光学系统在 10 lp/mm 处的调制传递函数(MTF, Modulation Transfer Function)值分别优于 0.7 和 0.4;系统畸变小于 0.5%,满足使用要求.

关键词:光学设计;红外仿真;数字微镜器件(DMD);双波段;光学引擎

中图分类号:TN216 **文献标识码:**A

Design of optical engine for zoom infrared two-band scene simulator based on dual-DMD

PAN Yue*, XU Xi-Ping, Qiao Yang

(School of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to simulate the spectral distribution difference between the target and the interference in real scene, a zoom optical engine with two channels and the same caliber has been designed based on dual digital micro-mirror device (DMD), it includes projection optical system and two illumination optical systems. The optical engine directly illuminates two DMD target surfaces respectively with long-wave infrared (LWIR) and mid-wave infrared (MWIR) Kohler telecentric beam. It uses spatial stereoscopic layout to get avoid of interference between different optical paths. The design result shows that the illuminance uniformity of illumination optical system is better than 94%. The modulation transfer function (MTF) values of zoom projection optical system are better than 0.4 and better than 0.7 at 10 lp/mm respectively in bands of LWIR (8~12 μm) and MWIR (3.7~4.8 μm). And the distortion is better than 0.5%, which meet the requirements.

Key words: optical design, infrared simulation, dual digital micro-mirror device (DMD), two-band, optical engine

PACS: 42. 79. Ag, 42. 15. Eq

引言

红外双波段成像制导可同时获得两波段的图像信息,通过比对目标和干扰的光谱分布差异来识别真实目标,既继承单波段成像制导优点又进一步提升了导弹的抗干扰能力^[1].红外双波段场景模拟器作为红外双波段成像制导系统的性能测试和评估设

备,可在半实物仿真实验中生成与现实场景辐射特征一致的虚拟红外场景,是部分外场测试的有效替代方法^[2].

目前,红外双波段场景模拟器多基于单数字微镜器件(DMD, Digital Micromirror Device)设计,单 DMD 虽然可以生成场景在两波段内的红外图像,但却不能模拟场景中不同温度景物在两波段内辐射能

收稿日期:2017-11-01,修回日期:2018-04-12

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(61605016)

Foundation item: Supported by the Young Scientists Fund of National Natural Science Foundation of China(61605016)

作者简介(Biography):潘越(1989-),男,吉林长春人,讲师,博士,主要研究领域为光电系统的总体技术

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: py_cust@sina.com

Received date: 2017-11-01, revised date: 2018-04-12

量比的差别,因此无法仿真目标和干扰的光谱分布差异,只满足仿真测试的工作波段需求,但无法测试红外双波段成像制导系统的抗干扰性能^[3-4].

为解决上述问题,提出以双 DMD 作为景象生成器件设计红外双波段场景模拟器的光学引擎,两 DMD 通过分别调制入射的两红外波段光束生成长波(8 ~ 12 μm)红外动态场景和中波(3.7 ~ 4.8 μm)红外动态场景,经双色合束镜合束后,再由投影光学系统准直投影. 由于双 DMD 光学引擎架构不适用分光元件分离投影光路与照明光路,因此采用直接照明 DMD 靶面的方式,并利用空间立体式布局避免不同光路间的干扰,有效提升了光学引擎的集成度及能量利用率,具有双通道、共口径、两档变焦等特点.

1 双 DMD 光学引擎的总体架构

DMD 属于辐射调制型景象生成器件,其调制原理如图 1 所示,微镜开态下能量进入投影光学系统形成亮像素,关态下形成暗像素,平态为过渡状态不可控,由脉宽调制技术产生对应的红外灰度图像. 从图 1 中可以看出投影光学系统和照明光学系统共用器件前方的相同空间,由于两者光轴夹角受到微镜翻转角度限制,考虑到光机结构设计的合理性,单 DMD 光学引擎通常会采用分光元件将投影光路与照明光路分离,现对两种典型分光架构的缺点进行分析.

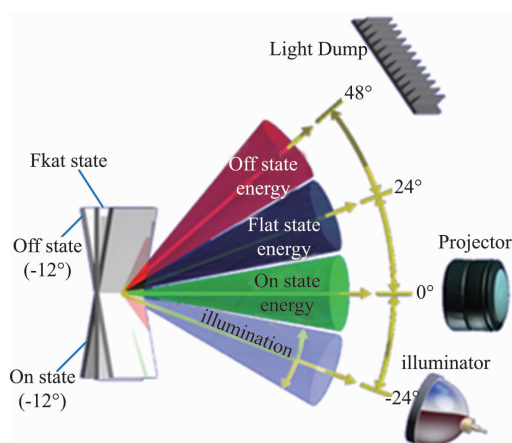


图 1 DMD 调制原理图

Fig. 1 Principle diagram of DMD the modulation

1.1 基于光路分离的单 DMD 光学引擎缺点

图 2 为采用 TIR 棱镜分光的单 DMD 光学引擎,微镜开态下能量进入投影光学系统,关态下能量从棱镜的其他工作面射出. 棱镜内全反射临界面的能

量损耗在可见光范围内约为 2% ~ 3%,在红外波段的损耗会更高,而且临界面一般存在三个以上,棱镜内的长光路使得红外材料对能量的吸收变强,进一步制约了光学引擎的能量利用率. 同时,棱镜的使用会增加成本、尺寸和重量,对于双 DMD 光学引擎而言,上述影响将加倍^[5].

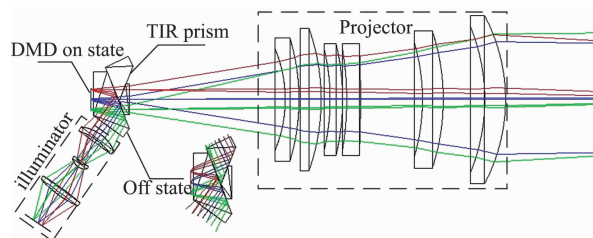


图 2 基于 TIR 棱镜分光的单 DMD 光学引擎

Fig. 2 Single DMD optical engine with TIR prism for beam split

如图 3 所示,利用场镜和反射镜代替 TIR 棱镜进行光路分离可有效提升光学引擎的能量利用率,同时有益于小型化设计. 但这种光学引擎受杂散辐射影响严重,由于场镜与投影光路共轴,入射到场镜表面的光可能被直接反射进入投影光学系统,在像面形成杂光光斑,需要在合适位置添加半月型光阑以消除影响. 如果将这种架构应用于双 DMD 光学引擎,将会有更为集中的能量被耦合进入投影光学系统,杂散辐射抑制也将变得更为复杂,而且由于限制了照明光束的辐射口径,只能通过提升黑体工作温度的方式以弥补表现温度的不足^[6-7].

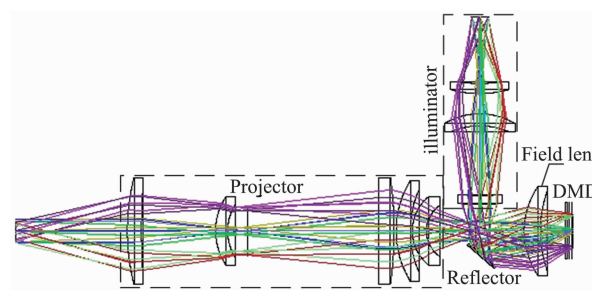


图 3 基于场镜和反射镜分光的单 DMD 光学引擎

Fig. 3 Single DMD optical engine with field lens and reflector for beam split

1.2 基于空间立体布局的双 DMD 光学引擎

由于双 DMD 光学引擎不适用分光元件,决定采用直接照明 DMD 靶面的方式,利用空间立体式布局避免不同光路间的干扰. 如图 4 所示,以投影光学系统光轴为主光轴,双色合束镜的光轴与主光轴

子午角为 30° ,且合束方式为红外长波透射,红外中波反射.因此长波 DMD 的靶面几何中心法线与主光轴重合,中波 DMD 的靶面几何中心法线与主光轴子午角为 60° .主光轴、双色合束镜的光轴、长波 DMD 的靶面几何中心法线、中波 DMD 的靶面几何中心法线四者共面. DMD 的微镜绕对角线翻转,为保证 $+12^\circ$ 翻转时的能量沿靶面几何中心法线出射,照明光学系统的光轴与 DMD 的靶面几何中心法线子午角度为 24° 且弧矢角度为 45° ,两照明光学系统分别位于主光轴的两侧.这种布局方式实现了微镜各状态下光路的空间分隔,避免了分光元件的影响,有效提升了光学引擎的能量利用率.但投影光学系统和照明光学系统必须拥有长后工作距离才能避免三套子系统间的光机结构发生干涉,长后工作距离也为微镜开态与平态(非稳态)光路提供了足够的分隔空间,从而避免了平态下能量进入投影光学系统,有益于提升图像对比度.

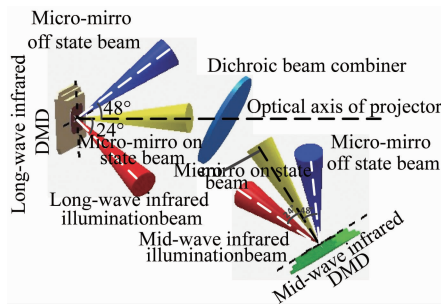


图 4 双 DMD 光学引擎的空间布局
Fig.4 Spatial layout of dual-DMD optical engine

双 DMD 光学引擎的总体架构如图 5 所示,沿两红外波段光束出射方向依次排列有黑体光源 1、长波照明光学系统、长波 DMD7、黑体光源 8、中波照明光学系统、中波 DMD14、双色合束镜 15、投影光学系统.两照明光学系统被设计为长波和中波均可透,通过长波滤光片 6 和中波滤光片 13 限制工作波段.双色合束镜是一面镀有增透膜,另一面镀有增反膜的薄平行平板,用于透射长波红外光和反射中波红外光.投影光学系统的后工作距离为 170 mm,照明光学系统的后工作距离为 165 mm,平面反射镜 3、4 及平面反光镜 10、11 分别用于压缩长波照明光学系统和长波照明光学系统总长,以便于光机结构设计.由于待检红外双波段成像制导系统对无穷远场景成像,大视场用于搜索目标,小视场用于锁定目标,为提供相同的远场辐射等级,投影光学系统必须做前无焦设计,还应实现两档变焦,表 1 为双 DMD 光学

引擎的总体设计指标.

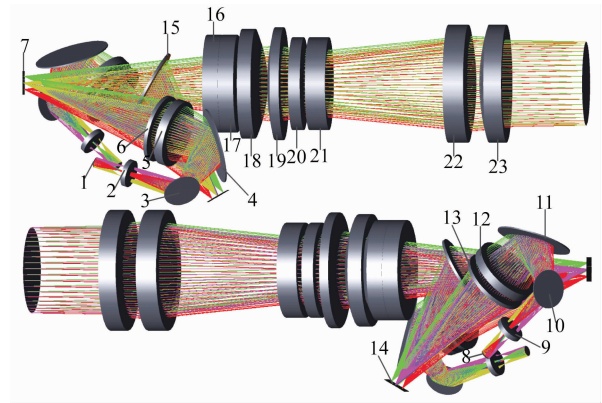


图 5 双 DMD 光学引擎的总体架构
Fig.5 Overall architecture of the dual-DMD optical engine

表 1 双 DMD 光学引擎的设计参数
Table 1 Design parameters of the dual-DMD optical engine

Parameter	Value
Working wave-bands	$3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}; 8 \sim 12 \mu\text{m}$
Zoom ratio	$2\times$
Field of view	$\pm 3.75^\circ$
F#	4
Focal length	133.6 mm
Illumination way	Kohler
Sensor area of DMD	$14.1 \text{ mm} \times 10.5 \text{ mm}$
Pixel pitch of DMD	$13.68 \mu\text{m}$

2 照明光学系统设计

照明光学系统的主要作用是保证照明均匀性,在设计时,应满足与投影光学系统的光瞳衔接原则及保证光学扩展量守恒.利用光学设计软件进行迭代优化,设计结果如图 6 所示.透镜 2(9)起到聚光作用,将黑体光源 1(8)的像成在透镜 5(12)的焦面处,再由透镜 5(12)成像到无穷远处,构成柯勒远心光路条件,匹配投影光学系统入瞳.平面反射镜 3(10)与平面反射镜 4(11)的光轴夹角为 90° ,仅用于压缩光路总长,在分析照明均匀性时将其忽略.照明光学系统的透镜材料均为锗,优化过程中着重考虑消除光阑像差影响,减少能量损失.滤光片 6(13)为 3 mm 厚的平行平板,设置在透镜 5(12)前方 5 mm 处,长波滤光片基底材料为锗,中波滤光片基底材料为硅.

在充分考虑发光位置、方向、DMD 倾斜角度的情况下,利用仿真软件追迹全视场范围内的 10 万条

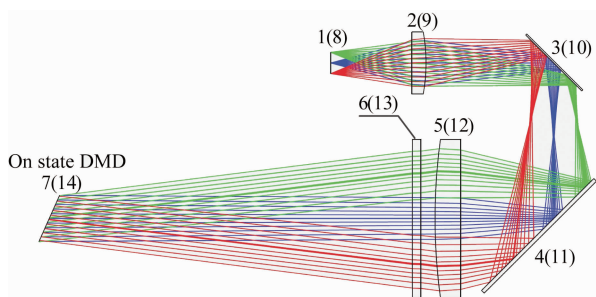


图6 照明光学系统光路
Fig. 6 Light path of illumination optical system

光线,仿真结果如图7所示.从图中可以看出,DMD靶面的照度均匀性优于94%,子午与弧矢方向无明显差别,图中的高频区域为追迹有限光线数所造成的误差,实际应用中不会出现类似现象.分析结果表明,照明均匀性满足使用要求,设计合理.

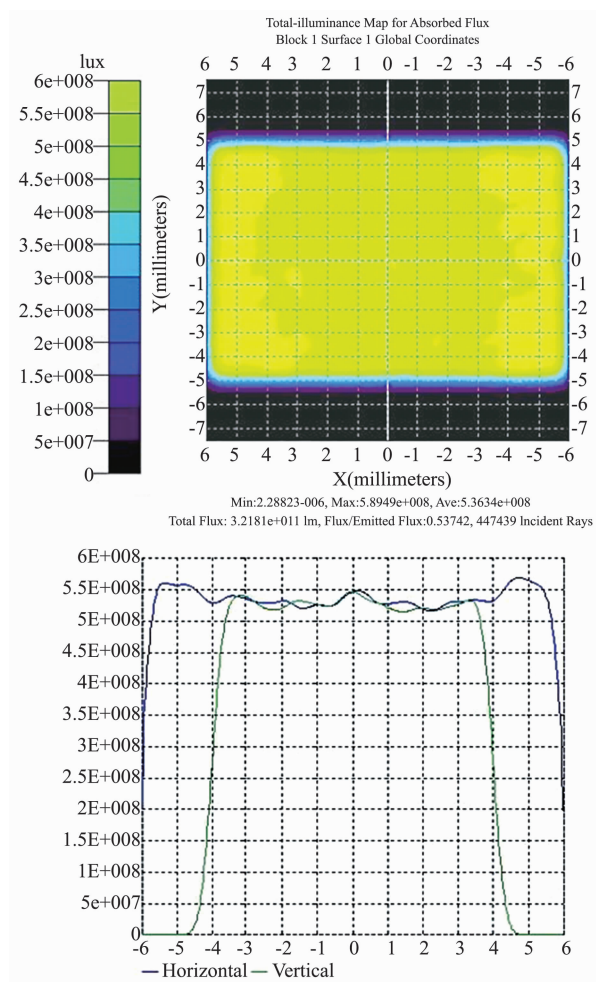


图7 照度均匀性评价结果
Fig. 7 Evaluation results of the illuminance uniformity

3 投影光学系统设计

3.1 设计思想

投影光学系统要实现两档变焦,通过一个变倍组的轴向移动实现物像交换,保证共轭距不变^[8],即在两个共轭位置分别形成 $1/\sqrt{2}$ 放大倍率和 $\sqrt{2}$ 放大倍率,从而实现2倍变焦比.由于采用无补偿组变焦,系统只包含前固定组、变倍组、后固定组三个部分,在获得各镜组的光焦度分配后,先对各镜组分别进行红外中波和长波双波段色差校正,再组合进行消色差,各透镜的光焦度分配应满足总光焦度方程及消色差方程^[9-10],为

$$\sum h_i \Phi_i / h_1 = \Phi \quad (1)$$

$$\begin{cases} (1/h_1 \Phi)^2 \sum (h_i^2 w_{1i} \Phi_i) = 0 \\ (1/h_1 \Phi)^2 \sum (h_i^2 w_{2i} \Phi_i) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} (1/h_1 \Phi)^2 \sum (h_i^2 P_i \Phi_i) &= L_p \\ |L_p| &\leq 2\lambda_1 (f/\#)^2 + 2\lambda_2 (f/\#)^2 \end{aligned} \quad (3)$$

式(1)为总光焦度方程,其中 Φ_i 为各透镜的光焦度, Φ 为投影光学系统的总光焦度, h_i 为各透镜光线的入射高度;式(2)为消波段内色差方程,其中 Φ_{1i} 和 Φ_{2i} 为各透镜在两个不同波段的光焦度, w_{1i} 和 w_{2i} 为各透镜在两个不同波段的归一化色差系数;式(3)为消波段间色差条件,其中 P_i 为各透镜的波段间色差系数, λ_1 和 λ_2 为两个不同波段的中心波长, L_p 为波段间位置色差.

双色合束镜是平行平板,透射部分引入的像差会使原光线交点发生横向和纵向偏移,沿轴横向位移相当于引入了球差,为

$$\Delta_{sa} = \left[1 - \sqrt{\frac{1 - \sin^2 u}{n^2 - \sin^2 u}} \right] t \quad (4)$$

其中 t 为双色合束镜厚度, u 为投影光学系统共口径部分的物方孔径角,则有

$$\tan u = 1/2(F/\#) \approx \sin u \quad (5)$$

将式(5)代入式(4),得:

$$\Delta_{sa} \approx \left[1 - \sqrt{\frac{4(F/\#)^2 - 1}{4n^2(F/\#)^2 - 1}} \right] t \quad (6)$$

当共口径部分为 $F/4$ 时,式(6)的误差小于1%.垂轴纵向位移相当于引入彗差,为:

$$\Delta_{ca} = \left[1 - \sqrt{\frac{1 - \sin^2 u_t}{n^2 - \sin^2 u_t}} \right] t \sin u_t \quad (7)$$

其中 u_t 为双色合束镜的光轴与主光轴夹角,由式

(6)和式(7)可知,平行平板的厚度 t 越小, Δ_{sa} 越小,当 t 一定时,平行平板的倾斜角度 u_i 越小, Δ_{ca} 越小,因此应使用薄平行平板以小角度插入光路中。

3.2 设计结果

根据上述设计思想,综合考虑材料的各项性质,选取 ZnS、AMTIR1、ZnSe、Ge 进行投影光学系统的初始结构优化,设计结果如图 8 所示,表 2 为四种红外材料在中波 4 μm 和长波 10 μm 下的主要光学性质. 透镜 23、透镜 22 为前固定组,具有正光焦度,透镜 21、透镜 20 为变倍组,具有负光焦度,透镜 19、透镜 18、透镜 17、透镜 16 为后固定组,具有负光焦度,双色合束镜的厚度为 3 mm,其光轴与主光轴夹角为 30°,膜系设计时重点考虑了消除偏振影响,图 9 为光谱透过率曲线。

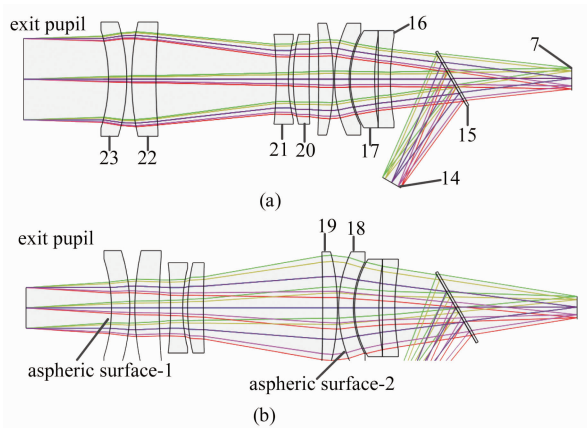


图 8 投影光学系统的光路(a)长焦距,b)短焦距
Fig. 8 Light path of the projection optical system (a) Long focus, b) short focus

3.3 结果分析

图 10 为长波投影光学系统各视场的点列图,图 11 为中波投影光学系统各视场的点列图. 从图中可知,中波和长波各视场的弥散斑 RMS 半径均小于艾里斑半径,说明大部分能量集中在艾里斑内,像差得到较好校正,成像质量较好。

半实物仿真测试中,投影光学系统出瞳与待检

表 2 投影光学系统所选红外材料的光学特性

Table 2 Optical properties of the selected infrared materials for the projection optical system

Material	Index of refraction		Chromatic dispersive power		Thermal dispersive power	Between-band chromatic dispersive power
	$n_{4\mu\text{m}}$	$n_{10\mu\text{m}}$	$C_{3-5\mu\text{m}}/(\%)$	$C_{8-12\mu\text{m}}/(\%)$	$T/(10^{-5}/\text{K})$	$P_{3-12\mu\text{m}}/(\%)$
ZnS	2.2501	2.1983	0.91	4.36	3.02	4.32
AMTIR1	2.5146	2.4981	0.50	0.91	3.61	1.09
ZnSe	2.4331	2.4067	0.50	1.71	3.77	1.88
Ge	4.0224	4.0036	0.99	0.10	12.61	0.63

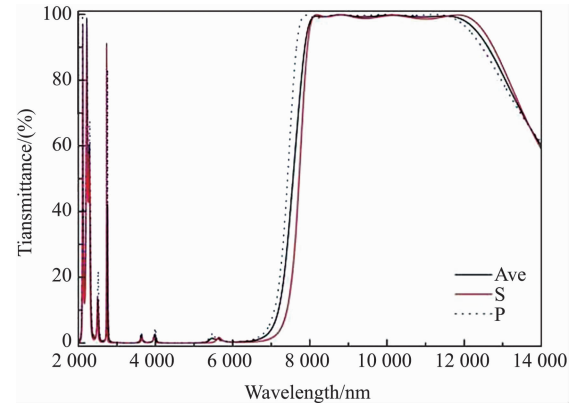


图 9 双色合束镜光谱透过率曲线
Fig. 9 Spectral transmittance curve of the dichroic beam combiner

成像制导光学系统入瞳重合,两者满足光瞳衔接原则,待检成像制导系统的红外探测器像元数为 384 \times 288,像元尺寸为 35 μm ,对应考察奈奎斯特频率 14 lp/mm 处的 MTF 值. 但是,由于相同视场下投影光学系统焦距为待检成像制导光学系统焦距的两倍,因此应考察投影光学系统大于 7 lp/mm 处的传递函数,图 12 和图 13 分别为长波和中波投影光学系统在 10 lp/mm 处的 MTF 曲线. 由图可知,长波投影光学系统长焦距和短焦距在 10 lp/mm 处的 MTF 值优于 0.4,中波投影光学系统长焦距和短焦距在 10 lp/mm 处的 MTF 值优于 0.7,两种情况下各视场 MTF 均接近衍射极限,成像质量较好,满足使用要求。

投影光学系统应考虑畸变影响,图 14 为长波投影光学系统畸变曲线,图 15 为中波投影光学系统畸变曲线. 从图中可知,各波段长焦距的畸变均在 0.1% 以内,各波段短焦距的畸变均在 0.5% 以内,投影光学系统的畸变得到了很好的校正。

4 光学效率分析

传递过程中的能量损耗主要发生在四个部分: DMD、双色合束镜、透镜及平面反射镜,各元件的光学效率如表 3 所示. DMD 的窗口为镀有增透膜的平

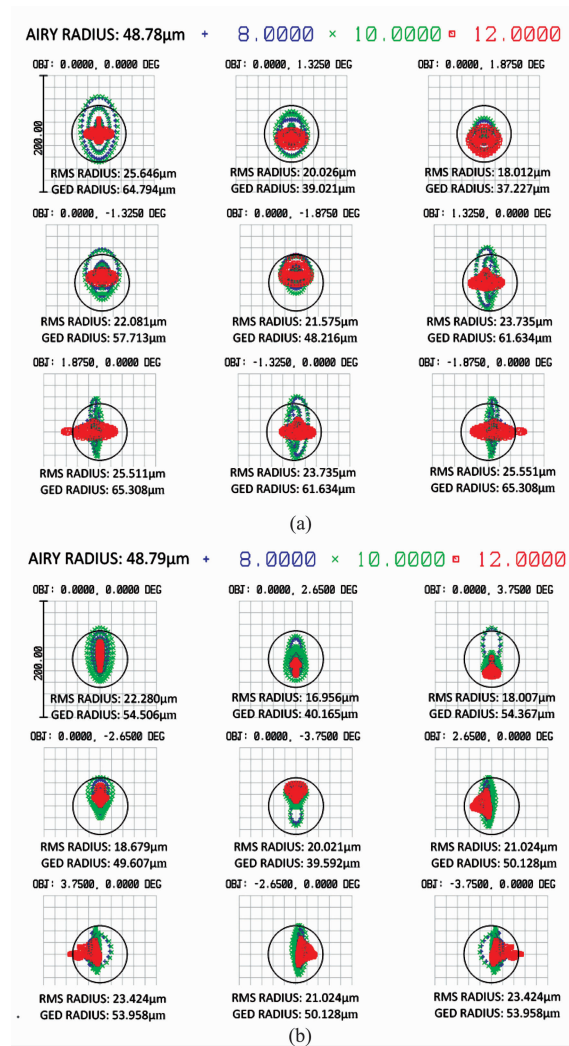


图 10 长波投影光学系统点列图 (a) 长焦距, (b) 短焦距
Fig. 10 Spot diagram of the LWIR projection optical system (a) long focus, (b) short focus

表 3 各元件的光学效率

Table 3 Optical efficiency of each component

Parameter	Value/(%)
Window transmission(once) η_1	97
Micro-mirror reflectivity η_2	88
Array fill factor η_3	92
Array diffraction efficiency of MWIR η_4	78
Array diffraction efficiency of LWIR η_5	58
Dichroic beam combiner transmission η_6	98
Dichroic beam combiner reflectivity η_7	99
lens and filter transmission η_8	98
Mirror reflectivity η_9	99

行平板, 单次透过率为 97%, 微镜表面的反射效率为 88%, 阵列的填充因子为 92%, 阵列的中波衍射效率为 78%, 阵列的长波衍射效率为 58%。合束镜为两侧分别镀有增反膜和增透膜的平行平板, 长波透过率为 98%, 中波反射率为 99%。投影镜头共有

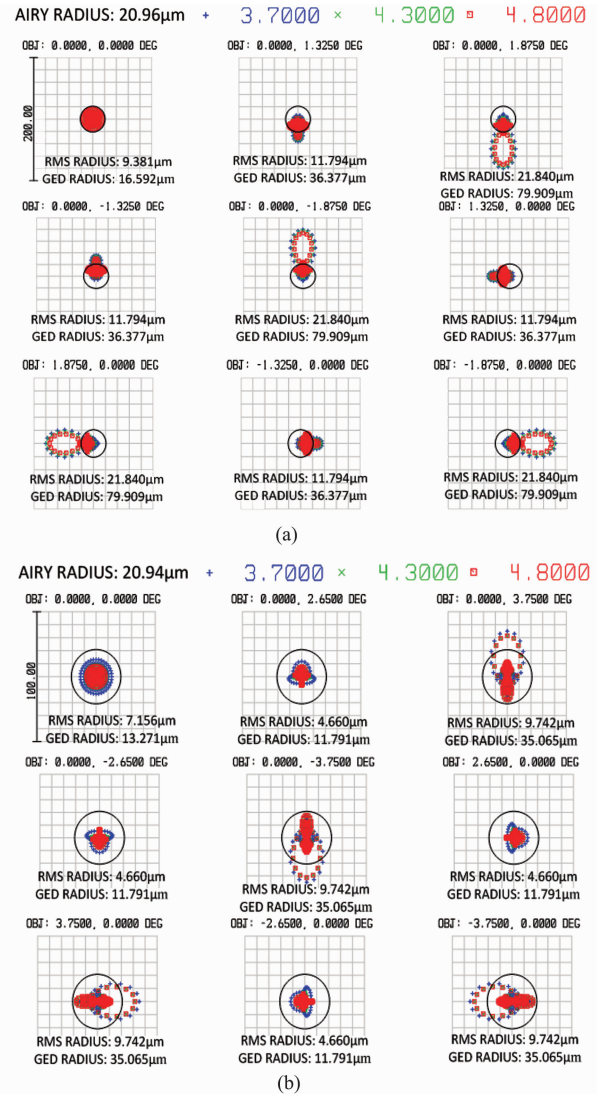


图 11 中波投影光学系统点列图 (a) 长焦距, (b) 短焦距
Fig. 11 Spot diagram of the MWIR projection optical system (a) long focus, (b) short focus

8 片透镜, 单透镜镀膜后的透过率为 98%。两个照明光学系统共有 4 片透镜、4 片反射镜和 2 片滤光片, 单透镜及滤光片镀增透膜后的透过率同样为 98%, 反射镜表面镀金膜, 反射率为 99%。

DMD 的中波和长波光效率分别为

$$\eta_{DMD_MW} = \eta_1^2 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 = 0.5987 \quad (8)$$

$$\eta_{DMD_LW} = \eta_1^2 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_5 = 0.4571 \quad (9)$$

投影镜头的光学效率为

$$\eta_{proj} = \eta_8^8 = 0.851 \quad (10)$$

两照明光学系统的光学效率为

$$\eta_{ill_MW} = \eta_{ill_LW} = \eta_8^3 \cdot \eta_9^2 = 0.922 \quad (11)$$

双 DMD 光学引擎的长波光效率为

$$\xi_{LW} = \eta_{DMD_LW} \cdot \eta_{proj} \cdot \eta_{ill_LW} \cdot \eta_6 = 0.3515 \quad (12)$$

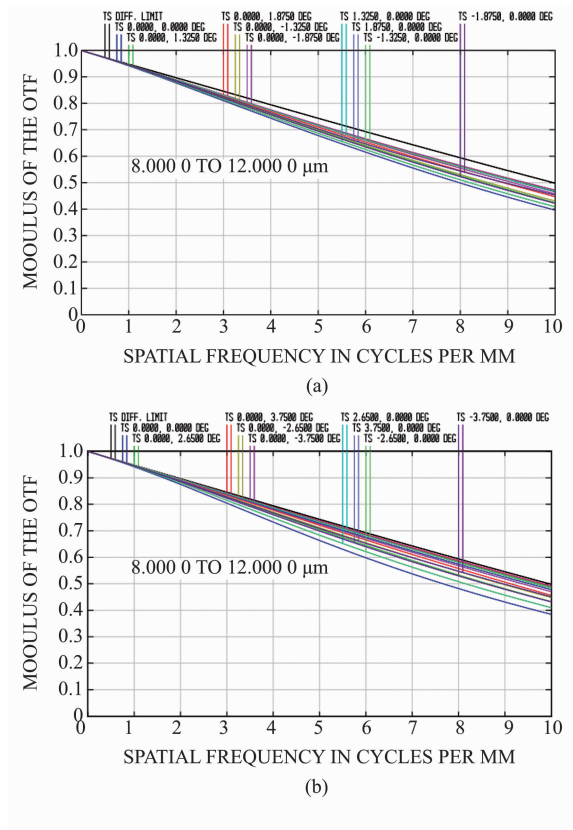


图 12 长波投影光学系统的 MTF 曲线 (a)长焦距, (b)短焦距
 Fig. 12 MTF curves of the LWIR projection optical system (a) long focus, (b) short focus

双 DMD 光学引擎的中波光学效率为

$$\xi_{MW} = \eta_{DMD_MW} \cdot \eta_{proj} \cdot \eta_{ill_LW} \cdot \eta_7 = 0.4646 \quad (13)$$

红外场景模拟器的表观温度依赖于黑体光源的工作温度,光学效率的计算结果可用于对所需的工作温度进行预估,从而保证所选黑体提供的能量满足使用要求.

5 结论

针对单景象生成器件光学引擎无法用于仿真现实场景中目标和干扰光谱分布差异的问题,为红外双波段场景模拟器设计了基于双 DMD 的光学引擎.光学引擎的双照明光学系统以柯勒远心光路直接照明 DMD 靶面,采用空间立体式布局来避免不同光路间干扰,避免了分光元件的影响,有效提升了双 DMD 光学引擎的集成度及能量利用率.照明光学系统的照度均匀性优于 94%,保证了照明均匀性.投影光学系统完成了红外中波和长波双波段色差校正,并实现了前无焦设计及两档变焦功能,仿真

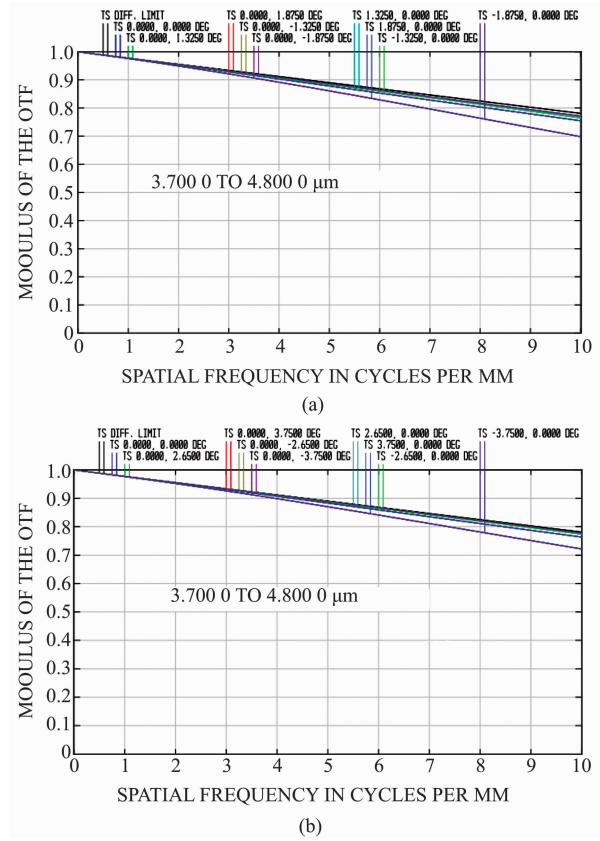


图 13 中波投影光学系统的 MTF 曲线 (a)长焦距, (b)短焦距
 Fig. 13 MTF curves of the MWIR projection optical system (a) long focus, (b) short focus

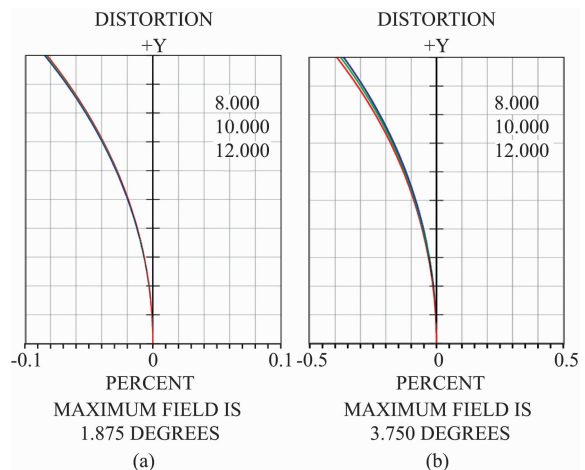


图 14 长波投影光学系统的畸变曲线 (a)长焦距, (b)短焦距
 Fig. 14 Distortion curves of the LWIR projection optical system (a) long focus, (b) short focus

结果表明:弥散斑 RMS 半径均小于艾里斑半径,像差得到良好校正;长波内 10 lp/mm 处的 MTF 值优于 0.4,中波内 10 lp/mm 处的 MTF 值优于 0.7,两

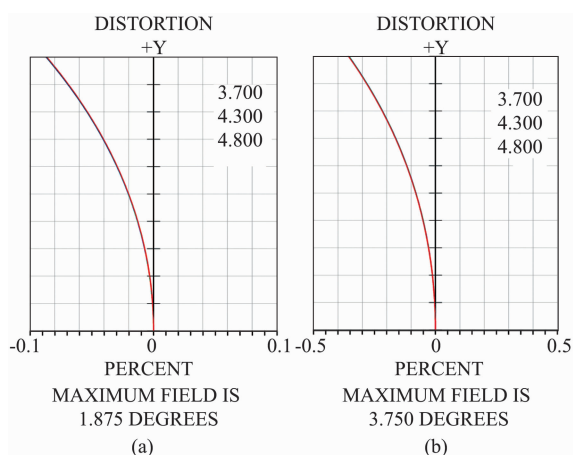


图 15 中波投影光学系统的畸变曲线 (a) 长焦距, (b) 短焦距

Fig. 15 Distortion curves of the MWIR projection optical system (a) long focus, (b) short focus

种情况下各视场 MTF 均接近衍射极限, 成像质量较好; 长焦距畸变在 0.1% 以内, 短焦距畸变在 0.5% 以内, 满足使用要求。

References

- [1] LI Li-Juan, BAI Xiao-Dong, LIU Ke. Analysis of the key technologies for dual color IR imaging guidance of air-to-air missile [J]. *Laser & Infrared* (李丽娟, 白晓东, 刘珂. 空空导弹双色红外成像制导关键技术分析. *激光与红外*). 2013, **43**(9): 1037 - 1039.
- [2] WANG Hong-Jie, QIAN Li-Xun, LI Zhuo, et al. An infrared image projector covering 8-12 μm radiation range [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (王宏杰, 钱丽勋, 李卓, 等. 8 ~ 12 μm 红外图像生成装置. *红外与毫米波学报*). 2017, **36**(4): 467 - 470.
- [3] Wang J, Guo B H, Sun Q, et al. Third-order aberration fields of pupil decentered optical systems [J]. *Optics Express*. 2012, **20**(11): 11652 - 11658.
- [4] ZHANG Jian-Zhong, YANG Le, GUO Bang-Hui, et al. Optical design of MWIR/LWIR scene projector with hamonic diffraction element [J]. *Infrared and Laser Engineering* (张建忠, 杨乐, 郭帮辉, 等. 基于谐衍射的红外中波/长波双波段视景仿真光学系统设计. *红外与激光工程*). 2013, **42**(7): 1759 - 1763.
- [5] Qiao Y, Xu X P, Pan Y, et al. Research on DMD infrared scene projector with a high contrast ratio infrared prism design [J]. *Optik*, 2014, **125**: 6854 - 6859.
- [6] JIAN Yi, PAN Zhao-Xin, YU Yang, et al. Design of optical engine for infrared scene simulation system based on DMD [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (蹇毅, 潘兆鑫, 于洋. 基于 DMD 的红外场景仿真系统引擎设计. *红外与毫米波学报*). 2014, **33**(4): 376 - 379.
- [7] PAN Yue, XU Xi-Ping, QIAO Yang. Opto-mechanical structural design for 8-12 μm infrared dynamic thermal image simulator [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument* (潘越, 徐熙平, 乔杨. 8 ~ 12 μm 红外动态热像模拟器光机结构设计. *仪器仪表学报*). 2015, **36**(8): 1854 - 1859.
- [8] XUE Hui, LI Chang-Wei. Optical design of infrared continuous-zoom lenses [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (薛慧, 李常伟. 红外中波连续变焦光学系统的设计. *红外与毫米波学报*). 2012, **31**(5): 422 - 424.
- [9] ZHANG Liang, MAO Xin, WANG He-Long. The design of MWIR / LWIR multiple FOV optical system [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张良, 毛鑫, 王合龙. 中波/长波双色多视场光学系统设计. *红外与毫米波学报*). 2013, **32**(3): 255 - 258.
- [10] HE Hong-Xing, ZHAO Jing-Song. An axis-zoom four fields of view MWIR optical system [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (何红星, 赵劲松. 一种轴向变倍四视场中波红外光学系统. *红外与毫米波学报*). 2017, **36**(3): 255 - 258.
- [1] LI Li-Juan, BAI Xiao-Dong, LIU Ke. Analysis of the key technologies for dual color IR imaging guidance of air-to-air missile [J]. *Laser & Infrared* (李丽娟, 白晓东, 刘珂. 空空导弹双色红外成像制导关键技术分析. *激光与红外*). 2013, **43**(9): 1037 - 1039.
- [2] LIN Jun-Yang, SHU Rong, HUANG Geng-Hua, et al. Study on threshold of laser damage CCD and CMOS image sensors [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (林均仰, 舒嵘, 黄庚华, 等. 激光对 CCD 及 CMOS 图像传感器的损伤阈值研究. *红外与毫米波学报*). 2008, **27**(6): 475 - 478.
- [3] JIANG Ji-Jun, LUO Fu, CHEN Jian-Guo. Research on femtosecond laser induced damage to CCD [J]. *High Power Laser and Particle Beams* (江继军, 罗福, 陈建国. CCD 在 fs 激光辐照下的损伤研究. *强激光与粒子束*), 2005, **17**(4): 515 - 517.
- [4] Findeisen J, Eichler H J, Kaminskii A A. Efficient picosecond PbWO₄ and two-wavelength KGd(WO₄)₂ Raman lasers in the IR and visible [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1999, **35**: 173 - 178.
- [5] Warrior A M, Lin J, Pask H M, et al. Highly efficient picosecond diamond Raman laser at 1240 and 1485 nm. [J]. *Optics Express*, 2014, **22**(3): 3325 - 3333.
- [6] WANG Zheng-Ping, HU Da-Wei, ZHANG Huai-Jin, et al. External resonator SrWO₄ Raman laser excited by 1064 nm pico-second pulses [J]. *Chinese Journal of Lasers* (王正平, 胡大伟, 张怀金, 等. 1064 nm 皮秒脉冲激发的外腔式 SrWO₄ 拉曼激光器. *中国激光*), 2010, **2**: 335 - 338.
- [7] XUYang. The research of multi-wavelength picoseconds stimulated raman laser [D] Beijing industry university (徐洋. 多波长皮秒受激拉曼激光的研究. 北京工业大学), 2014.
- [8] SHEN De-Yuan, FAN Dian-Yua. *Mid-infrared lasers* [M]. Beijing: National defense industry press (沈德元, 范滇元. *中红外激光器*. 北京: 国防工业出版社), 2015: 208 - 227.
- [9] Mochalov I V. Laser and nonlinear properties of the potassium gadolinium tungstate laser crystal KGd(WO₄)₂:Nd³⁺-(KGW:Nd) [J]. *Optical Engineering*, 1997, **36**(6): 1660 - 1669.

(上接第 436 页)

Beijing: Science Press (李港. 激光频率的变换与扩展 [M]. 北京: 科学出版社), 2005: 349 - 372.