

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

张建忠^{1,2}, 杨乐^{1,2}, 郭帮辉^{1,2}, 谭向全¹, 王健¹, 孙强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)

摘要: 针对红外中波/长波双波段制导系统性能测试与评估的需求, 设计了一套基于数字微镜器件的红外双波段视景仿真光学系统, 包括投影镜头和照明系统。讨论了大出瞳距、大后工作距情况下红外双波段投影系统的像差特性及设计方法, 采用反望远结构和谐衍射面结合的方案, 解决了由双波段、大出瞳距离和大后工作距带来的系统彗差、像散、畸变以及色差难以平衡的问题。采用柯勒式直接照明的方案, 解决了斜入射情况下均匀照明的问题, 提高了光能利用率并有效地控制了杂光的影响。最终仿真系统全视场角为 5° , $F\#$ 为 2.4, 出瞳距离 190 mm, 出瞳直径 84 mm, 系统畸变小于 0.1%, 中波时系统奈奎斯特频率 36 lp/mm 下各视场调制传递函数大于 0.4, 长波时中间频率 20 lp/mm 处传递函数均大于 0.38; 照明均匀性高于 98.5%。满足红外中波/长波双波段高质量模拟仿真的需求。

关键词: 光学设计; 红外仿真; 景象投影; 数字微镜器件; 谐衍射

中图分类号: O435.1 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)07-1758-07

Optical design of MWIR/LWIR scene projector with harmonic diffraction element

Zhang Jianzhong^{1,2}, Yang Le^{1,2}, Guo Banghui^{1,2}, Tan Xiangquan¹, Wang Jian¹, Sun Qiang¹

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: For the requirements of performance testing and evaluation of IR guidance system which works in dual-bands of MW/LW, a DMD based dual-bands infrared scene simulation system was designed, including a projection lens and illumination optical system. The aberration characteristics and design methods of the IR dual-bands projection system with long exit pupil relief and back focal length were discussed. An inverted-telephoto structure with a harmonic diffraction surface was used to solve the aberrations such as coma, astigmatism, distortion and chromatic aberration which were difficult to balance. In the design of the illumination system, directly irradiation combined with the Köhler illumination principle was adopted to achieve a uniform illumination in the case of oblique incidence, also the improvement of light energy utilization and suppression of the stray light as well. The designed IR MW/LW scene simulator has a full field of view of 5° , $F\#$ of 2.4, and exit pupil relief of 190 mm. The distortion of the lens is less than 0.1%. At the Nyquist frequency of 36 lp/mm, the modulation transfer

收稿日期: 2012-11-05; 修订日期: 2012-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(60977001); 国家 863 计划(2007AA12Z10)

作者简介: 张建忠(1986-), 男, 博士生, 主要从事可见光红外视景仿真方面的研究。Email: zhangjz_ciomp@yahoo.cn

导师简介: 孙强(1973-), 男, 研究员, 主要从事红外光学系统方面的研究。Email: sunq@ciomp.an.cn

function (MTF) is higher than 0.4 in the band of MWIR; at the intermediate frequency of 20 lp/mm, the MTF is higher than 0.38 in the band of LWIR, at every field of view. The relative illumination is higher than 98.5%, which meets the requirement of the scene simulation.

Key words: optical design; IR simulation; scene projector; digital micromirror device; harmonic diffraction

0 引言

为适应军事上全天候的探测要求和提高对伪装目标的识别能力,越来越多的红外中波/长波双波段制导系统被开发出来。如何有效地评估此类系统变得愈发重要。动态红外视景仿真系统能够克服外场试验中存在的测试条件不全面,重复性差的缺陷,为待测系统的研制提供可控可重复的目标背景信息,已经成为红外系统有效检测和性能评估的主要手段^[1-2]。2001年美国光科学公司(OSC)将DMD(Digital Micromirror Device)用于红外目标模拟器的研制,DMD以其响应波段宽,分辨率高、帧频快以及使用寿命长等特点备受青睐,其产品已被应用于美国陆军高级仿真中心(ASC)和波音公司建立的硬件闭环仿真系统(HWIL)中^[3-5]。OPTRA公司的David J. Mansur^[6]等2009年首先研制了中波双通道的红外目标模拟器。国内哈尔滨工业大学的常虹^[7],通过4片透镜采用不同材料组合的方法设计了双波段系统,视场角仅为 $2.2^{\circ} \times 1.5^{\circ}$,难以满足导引头越来越大的视场测试需要,而照明系统的设计只是假设了黑体腔口的均匀性,DMD面上的照明均匀性难以保证;贾辛^[8]和钟都都^[9]也设计过类似的系统,分辨率只能达到0.25 mrad,对比度只有0.2,照明均匀性也难以保证,而且角落偏暗的状况很明显,以上系统都是采用半透半反镜分光,虽然缩小了系统体积,但杂光导致对比度偏低,而能量利用率的降低也限制了系统模拟温度的范围。

文中从DMD工作原理出发,探讨了双波段、大出瞳距离、大后工作距下远心投影光学系统的结构设计和像差平衡方法;通过引入谐衍射面,克服了彗差、像散、畸变以及色差难以校正的问题;照明采用了直射的方式,按照柯勒照明的原理设计,在实现均匀照明的前提下,既提高了光能利用率也控制了杂光源头。最终,投影系统视场为 5° ,F/#为2.4,角分

辨率在中波波段为0.12 mrad、长波为0.29 mrad,调制传递函数接近衍射极限,照明均匀性高于98.5%,满足了高精度仿真测试的需求。

1 DMD型仿真器工作原理

DMD作为数字反射式空间光调制器件,利用静电原理和脉冲幅度调制(PWM)技术,通过控制DMD上每个像元的偏转方向及保持时间,选通光束进入系统入瞳,形成不同亮度和对比度的图像。目标模拟器由DMD、DMD驱动电路、投影和照明光学系统、照明源和照明源控制器等部分组成。光学系统示意图如图1所示。

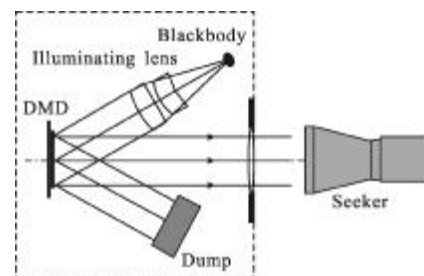


图1 视景仿真系统示意图

Fig.1 Schematic of optical system structure

黑体辐射通过照明中继镜头均匀照射DMD表面,由计算机图像生成器产生的红外图像数据通过驱动电路输入DMD芯片。利用DMD反射调制入射光束,将图像数据信号转换为红外辐射分布,经由光学系统出瞳投射到无穷远处,使红外景象与真实目标和背景在辐射能量空间分布上达到一致,实现对真实战场环境中的目标和背景红外场景的模拟,达到评估被测系统性能的目的。

2 系统设计

2.1 光学参数确定

根据系统的工作原理,将DMD芯片置于投影系统的物方焦平面上,系统出瞳处为平行光出射。投

影系统出瞳与被测系统入瞳衔接,以有效利用辐射能量和减少杂散光进入被测系统视场。投影系统焦距由 DMD 的尺寸和投影系统视场确定。DMD 工作方式决定了照明和投影的光路位于芯片的同侧,为了避免两个光路的镜片元件发生干涉,可以采用棱镜分光、半透半反镜分光或直接照明的方式^[7-9],相较于前两种照明方式,直接照明的方式具有更高的系统光能利用率,避免了分光元件上杂光的产生,易于实现高对比度。然而采用直接照明时必须保证投影系统的后工作距离 $L \geq 245 \text{ mm}$ 的要求。

根据测试要求,采用 TI 公司 XGA0.7" 型号的 DMD 芯片,确定指标如表 1 所示。

表 1 光学设计参数

Tab.1 Optical design parameters

Parameter	Value
Waveband/ μm	3.7-4.8; 8-12
Effective focal length/mm	203.5
F/#	F/2.4
Field of view	5°
Back focal length/mm	≥ 245
Entrance pupil distance/mm	190
Entrance pupil diameter/mm	84
Resolution	0.12 mrad@MWIR; 0.29 mrad@LWIR

2.2 设计思想

根据系统的工作原理,数字微镜作为光调制器位于投影镜头的后焦面对黑体发出的红外光束进行调制,经过调制的光束通过投影系统被投射到无穷远处,由待测系统接收。考虑到投影系统较大后工作距 $L \geq 245 \text{ mm}$ 的设计要求,采用反摄远结构,为了确保在图像源上具有一致的光强分布,系统采用远心结构,使光阑位于系统前焦面。

在反向设计时,将出瞳设置为孔径光阑,即光阑位于系统外 190 mm 处,前组使用弯月形单负透镜,光阑位于系统外部。为了减小主光线的入射偏角,抑制高级像差的产生,表面弯曲朝向光阑方向。由于较大出瞳距离与前组负透镜的共同作用,使后组正透镜的主光线的入射高度 h_p 明显增大。由参考文献[10]可知:系统的球差 S_I 和场曲 S_W 保持不变,而彗差

S_{II} 、像散 S_{III} 和畸变 S_V 都因为入射高度 h_p 的改变而显著增大,畸变更是与入射高度成三次方关系,使校正变得困难。同时入射高的增大引起与孔径有关的高级像差的增加。

平行光束经负光焦度的前组发散后,后组需要较大的光焦度使光束实现聚焦,因此必定产生较大的负球差,最后仍需要一片负透镜进行平衡。然而仅采用三片透镜在彗差、像散、畸变以及垂轴色差较大的情况下对于矫正 7 种像差显然难以实现。

系统工作在 3.7~4.8 μm 和 8~12 μm 两个波段内,色差的影响显而易见,通过后组两片镜子材料的选取与光焦度的分配必须同时满足总光焦度和消轴向色差方程,即:

$$\sum_1^i h_i \Phi_i = \Phi \quad (1)$$

$$\left(\frac{1}{h_1 \Phi}\right)^2 \sum_1^i (h_i^2 w_i \Phi_i) \quad (2)$$

式中: Φ_i 为第 i 个透镜的光焦度; h_i 为近轴光线在第 i 面上的入射高度; Φ 为系统的总光焦度; w_i 为第 i 个透镜的色散因子,即为色散引起的光焦度的相对变化,数值上等于材料的阿贝常量的倒数。公式(2)为消色差方程,应使光学元件的色散所引起的离焦,即轴向色差为零。

仅通过两种材料组合搭配仍难以同时完成两个红外波段内的消色差和平衡其他初级高级像差的要求。如果通过特殊材料的使用和结构复杂化来达到目的,特殊材料物理特性的不足会降低系统的稳定性;复杂的系统结构会带来公差严格、装调困难等诸多弊端。为此,向系统中引入谐衍射面,利用谐衍射透镜独特的谐振特性和像差特性,增加设计的自由度^[11]。

旋转对称衍射面的相位分布函数表示为:

$$\phi(\lambda) = (2\pi/\lambda) \sum A_i r^{2i} \quad (3)$$

式中: A_i 为衍射位相系数、相位分布函数与空间位置间存在的对应关系,通过采用足够数目的阶梯状相位补偿结构就能在空间不同位置对波前进行调制。

假设谐衍射面为一个薄透镜,DOE 的初级像差系数^[12]为:

$$S_I = \frac{y^4 \Phi_D^3}{4} (1 + T^2 + 4TC + 3C^2) - 8mA_2 y^4$$

$$S_{II} = \frac{-y^2 \phi_D^2 J}{2} (T+2C)$$

$$S_{III} = J^2 \phi_D \quad S_{IV} = 0 \quad S_V = 0 \quad (4)$$

式中: T 为 DOE 面的弯曲系数; C 为共轭参数; m 为衍射级次; A_2 为衍射面系数。通过对公式(4)的分析可知, 谐衍射面的引入会对球差、彗差和像散这三种单色像差的平衡起到作用, 但并不引入额外的场曲。当衍射面远离光阑时, 对于畸变的校正也会起到一定作用。

系统工作中波和长波两个波段范围内, 谐衍射面环带间的光程差为 $p\lambda_0$, 相当于设计波长为 $p\lambda_0$, 焦距为 f_0 的普通衍射透镜。若对波长为 λ 的 m 级次成像, 则其焦距为:

$$f = \frac{p\lambda_0}{m\lambda} f_0 \quad (5)$$

当 λ 为 λ_0 的 p/m 倍时, λ 与 λ_0 在同一位置产生焦点, p 代表最大位相调制 (2π) 的整数倍, m 取一系列整数, 将对应一组分立的波长。谐衍射元件的这一特性可用以将中波/长波宽波段内的消色差转化为在两个谐振波长为中心的窄波段内消色差。其色散特性用等效阿贝数表示为:

$$V_0 = \frac{\lambda_0}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \quad (6)$$

式中: λ_{\max} 为波长下限; λ_{\min} 为波长上限; λ_0 为中心波长, 可见, 衍射元件具有负色散特性, 且阿贝数与材料折射率无关。对于中心波长以及相位匹配因子 p 值的选定需要考虑衍射效率的影响, 其衍射效率为:

$$\eta_m = \text{sinc}^2 \left\{ \frac{\lambda_0}{\lambda} \left[\frac{n(\lambda) - 1}{n(\lambda_0) - 1} \right] p - m \right\} \quad (7)$$

在折射式系统中引入谐衍射元件, 不仅增大设计的自由度, 同时谐衍射元件独特的谐振特性和色散特性, 即阿贝数恒为负值, 有利于实现系统的消色差设计。

综合考虑材料特性和设计要求, 准直投影系统选用 Ge 和 ZnSe 和 ZnS 等普通红外材料, 并引入谐衍射元件, 使用三片透镜, 通过消轴向色差 (1~2) 确定密接薄透镜组的光焦度。前组采用弯月形负透镜, 后组采用正负组合与谐衍射面相结合的结构, 以利于同时校正球差、彗差和轴向色差。而场曲和轴向色差则需要综合考虑材料组合、光焦度以及正负透镜的间距, 根据公式(8)、(9)来求解。

$$\frac{\phi_1}{n_1} + \frac{\phi_2}{n_2} = \sum S_{IV} \quad (8)$$

$$\frac{h_1^2 \phi_1}{v_1} + \frac{h_2^2 \phi_2}{v_2} = \sum C_1 \quad (9)$$

孔径光阑远离系统偏离了经典的反远系统结构, 通过合理调整光焦度校正了垂轴色差, 通过正负透镜的间隔平衡了高级球差, 通过谐衍射面的引入, 平衡了系统残余的彗差、像散和畸变, 而场曲依靠前组与后组之间的距离调整来校正, 这样, 系统的全部初级像差都得到校正, 据此建立系统的初始结构。在像差校正阶段, 根据像差特点调整初始结构, 并结合照明光学系统对系统总体进行优化设计。

3 设计结果

3.1 投影光学系统的设计

投影光学系统由三片透镜组成, 前组负透镜使用锗, 后组为 ZnSe、ZnS 的正负透镜组合, ZnS 的后表面附加了谐衍射结构, 结构如图 2 所示。

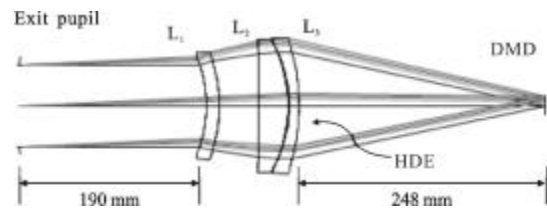


图 2 光学系统示意图

Fig.2 Schematic of optical system structure

图 2 中, L_1 为负透镜, 可以是系统的像方主面向后移动, 以增加后工作距离, 其前表面引入一个偶次非球面, 减小球差的引出; L_2 采用正负透镜与谐衍射相结合的方法完成消色差, 谐衍射面加载到其最后一面上, 远离光阑, 用来平衡系统残余的彗差、像散和畸变, 同时也起到平衡色差的作用。

谐衍射面的设计中从衍射效率的角度出发, 对中心波长分别为 $20 \mu\text{m}$ 和 $4.25 \mu\text{m}$ 情况下, 平均衍射效率进行了比较。如图 3 所示。

通过计算, 采用参考波长 λ_0 为 $4.25 \mu\text{m}$, 相位匹配因子为 $p=2$ 。对于中波红外中心波长 ($4.25 \mu\text{m}$) 和长波红外中心波长 ($10 \mu\text{m}$) 对应的衍射级次分别为 2 和 1, 衍射能量平均效率分别为 71.9% 和 91%。而以 $20 \mu\text{m}$ 为参考波长时, 衍射级次分别为 5 和 2, 衍射效率分别为 37.1% 和 83.9%, 因而选择前者为谐衍

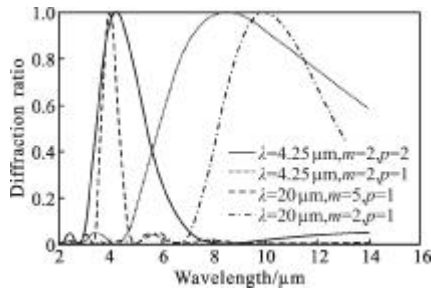


图 3 衍射效率

Fig.3 Diffraction ratio

射面的设计参考波长。最终根据衍射面的相位表达式(4)确定系数: $A_1 = -0.013814$, $A_2 = 1.759092 \times 10^{-6}$, $A_3 = -1.255313 \times 10^{-10}$ 。图 4 给出了谐衍射面的位相及周期随半径的变化曲线,可以看出,该衍射元件包含六个环带,最小宽度为 8.4892 mm ,保证了该器件可以采用金刚石车削技术进行加工。

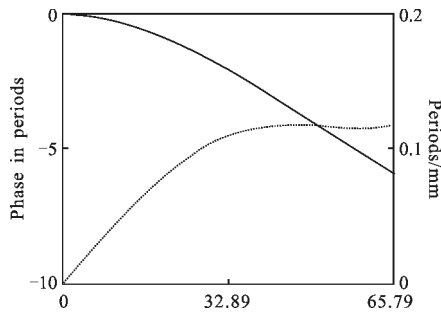


图 4 谐衍射面的位相及周期随半径的变化曲线

Fig.4 Binary 2 phase and line frequency vs aperture

使用调制传递函数曲线、点列图对系统的性能进行评价。图 5 和图 6 分别为该系统在 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ 波段和 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段点列图,全视场时 RMS 半径分别

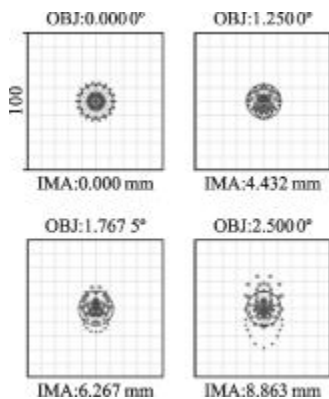


图 5 中波红外点列图

Fig 5 Spot diagram at MWIR

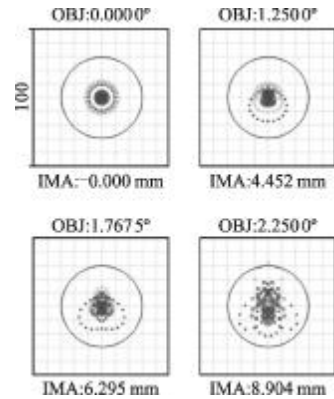


图 6 长波红外点列图

Fig.6 Spot diagram at LWIR

为 $9.157 \mu\text{m}$ 和 $10.741 \mu\text{m}$,均小于爱里斑半径;图 7 和图 8 分别为中波和长波时各视场的调制传递函数曲线,中波下系统为探测器受限系统,在奈奎斯特频率 36 lp/mm 处各视场的 MTF 均大于 0.4 ,长波时为衍射受限系统,中间频率 20 lp/mm 处各视场 MTF 均大于 0.38 ;接近衍射极限。图 9 为中波/长波时系统的畸变曲线,在两个波段内,畸变均小于 0.1% ,保证了系统仿真时具有良好的线性特性。

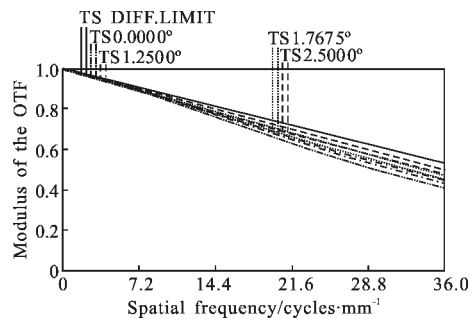


图 7 中波调制传递函数曲线

Fig.7 MTF vs spatial frequency at image plane at MWIR

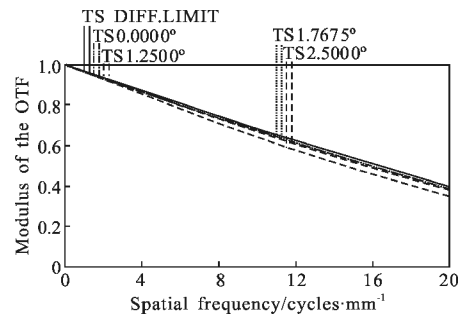


图 8 长波调制传递函数曲线

Fig.8 MTF vs spatial frequency at image plane at LWIR

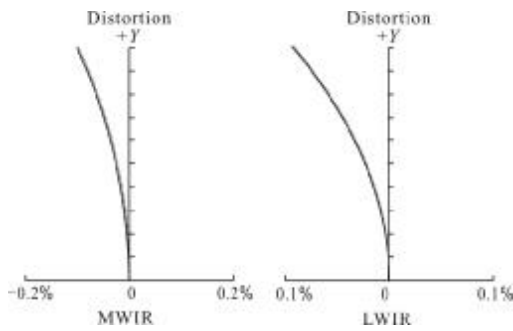


图 9 中波/长波的畸变曲线

Fig.9 Distortion at MWIR/LWIR

3.2 照明光学系统的设计

照明系统的作用是将腔式黑体辐射出的红外光束进行重新配置约束来满足投影系统对 DMD 面的光强分布需求。在设计时需要既能够保证被照明面上照度分布均匀,同时尽可能提高光能利用率,抑制杂光的产生。

投影系统采用了远心光路的设计,设计时将腔式黑体的出射面置于照明系统的后焦面上,红外光束经过照明系统在出瞳处平行出射,光瞳面与被照面重合,形成柯勒照明。

系统结构如图 10 所示。照明系统采用了三片镜子构成, L₁ 为聚光镜, L₂ 和 L₃ 为中继镜。

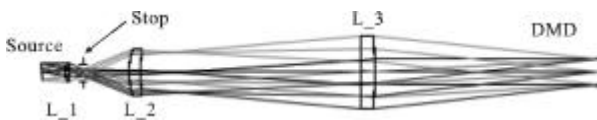


图 10 照明系统光路图

Fig.10 Schematic of illumination optical system

为了避免照明和投影系统镜片之间发生干涉, L₃ 与被照面之间需要有足够的长度 l。设计时将 L₃ 的焦距设置为 l, 即 L₃ 的焦面与 DMD 面重合, L₂ 和聚光镜 L₁ 将光源成像到 L₃ 的物方焦面上, 同时在聚光镜后设置光阑, 通过后两片中继镜头成像到 DMD 面上, 而黑体则成像到无穷远, 与投影系统的入瞳重合, 形成了柯勒照明。在优化中消除光阑像差, 使出瞳与被照面重合, 避免光能损失。采用直接照明的方式, 其能量的利用率理论上是半透半反镜的分光照明方法的 4 倍, 也避免了由于分光导致的大量杂光的产生。而空间占用较大的问题, 通过合理使用反射镜、转折光路来解决。

应用光学分析软件 TracePro 进行照明仿真, 通过大量光束的追迹, 得到 DMD 面的能量分布。通过对 DMD 进行辐射照度分析来评价照明均匀性。定义 DMD 接收照明均匀性指标^[13]:

$$\varepsilon = \left[1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2}{N \bar{E}^2}} \right] \times 100\% \quad (11)$$

其中, DMD 像元辐射照度为 E_i , 各点辐射照度平均值为 \bar{E} 。在照明仿真中, 追迹 10^6 条光线, 在全视场范围内采样数为 10×10 的情况下进行考察, 仿真结果如图 11 所示, 照明非均匀性 $\varepsilon \geq 98.5\%$, 可见, 照明系统实现了均匀照明。

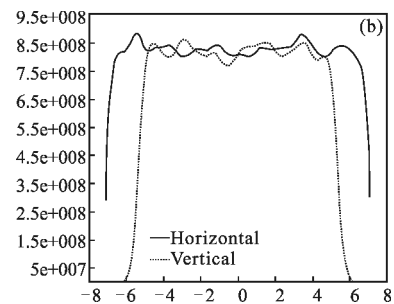
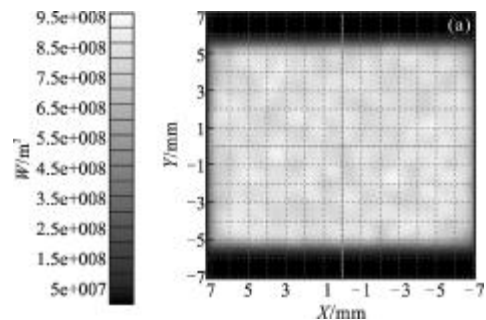


图 11 DMD 照度分布图

Fig.11 Illuminance mesh on the DMD's plane

5 结论

文中采用反摄远结构, 在光阑位于系统外部, 远离透镜的情况下, 采用弯月形负透镜为前组, 正负透镜与衍射面相结合的方法, 使用三片透镜, 解决了大出瞳距, 大后工作情形下, 双波段彗差、像散以及色差难以矫正的问题, 给出了设计思想、设计指标以及系统像质评价。结果表明, DMD 型红外双波段目标模拟器在出瞳直径为 84 mm, 出瞳距离 190 mm 下, 视场为 5° 时, 在系统奈奎斯特频率处, 中波各个视场的调制传递函数均大于 0.4, 长波大于 0.38, 均

接近衍射极限;中波和长波下点斑 RMS 半径均小于爱里斑半径,系统畸变小于 0.1%。照明系统采用了柯勒式远心光路直接照明的方法,照明的均匀性大于 98.5%,满足红外中波/长波双波段下高质量模拟仿真的需求。

参考文献:

- [1] Toole B E O. Real-time infrared scene simulator(RISS)[C]// SPIE, 1996, 2741: 209-218.
- [2] Folks W R, Alonso J M, Monacelli B, et al. Characterization of digital-micromirror device-based infrared scene projector [J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(8): 1-7.
- [3] D Brett Beasley, Matt Bender, Jay Crosby, et al. Dynamic infrared scene projectors based upon the DMD [C]//SPIE, 2009, 7210(01): 1-12.
- [4] Beasley D B, Bender M, Crosby J, et al. Dynamic infrared scene projectors based upon the digital micromirror device [C]//SPIE, 2001, 4366: 96-102.
- [5] Saylor D A, Beasley D B, Braselton B, et al. Overview of dynamic scene projectors at the U.S. army aviation and missile command[C]//SPIE, 2002, 4717: 136-147.
- [6] Julia Rentz Dupuis, David J Mansur, Robert Vaillancourt, et al. Two-band DMD-based infrared scene simulator[C]//SPIE, 2010, 7663(02): 1-10.
- [7] Chang Hong, Fan Zhigang. Optical system design of DMD-based dual-band infrared scene projection[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2007, 39(5): 838-840. (in Chinese)
常虹, 范志刚. 基于 DMD 的红外双波段景象投影光学系统设计[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2007, 39(5): 838-840.
- [8] Jia Xin, Liao Zhijie, Xing Tingwen, et al. Optical system design of dynamic infrared scene projector based on digital-micro-mirror device [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(4): 692-696. (in Chinese)
贾辛, 廖志杰, 邢廷文, 等. 基于 DMD 的动态红外场景投影光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(4): 692-696.
- [9] Zhong Dudu, Yu Weiwei, Zhang Kai, et al. Design and test of DMD dynamic IR scene simulator [J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(19): 5214-5218. (in Chinese)
钟都都, 于薇薇, 张凯, 等. 基于 DMD 的动态红外场景仿真器设计与测试 [J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(19): 5214-5218.
- [10] Wang Zhijiang. *Handbook of Practical Optical Techniques* [M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 389-406. (in Chinese)
王之江. *实用光学技术手册* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 389-406.
- [11] Sun Qiang, Lu Zhenwu, Wang Zhaoqi. The dual band design of harmonic diffractive-refractive optics system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(6): 830-833. (in Chinese)
孙强, 卢振武, 王肇圻. 谐衍射/折射双波段系统设计[J]. *光学学报*, 2004, 24(6): 830-833.
- [12] Zhai Xuhua, Liu Ying, Zhang Hongtao, et al. Design of hybrid refractive and diffractive collimator with high accuracy [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(5): 744-746. (in Chinese)
翟旭华, 刘英, 张洪涛, 等. 折射-衍射混合高精度平行光管的设计[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(5): 744-746.
- [13] Zhang Wei, Gong Yan. Design of diffractive optical elements for off-axis illumination in projection lithography [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(11): 2081-2086. (in Chinese)
张巍, 巩岩. 投影光刻离轴照明用衍射光学元件设计[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(11): 2081-2086.