

文章编号 1674-2915(2009)05-0402-06

# 折/衍混合长波红外凝视成像系统的杂散光分析

张红鑫<sup>1</sup>, 卢振武<sup>1</sup>, 孙强<sup>1</sup>, 刘华<sup>1</sup>, 王建<sup>1</sup>, 李萍<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京, 100039)

**摘要:** 对含有一个用金刚石车削技术制作的衍射光学元件(DOE)的折/衍混合长波红外(LWIR)凝视成像系统进行了杂散光分析。利用 LightTools 软件对 DOE 的不同衍射级次、光学表面多次反射、镜筒内壁反射等主要杂散光源进行了模拟和分析, 对 6 种二次反射的模拟结果表明, 对归一化的光源, 理想光路的像面辐照度为  $100 \text{ W/mm}^2$ , 每种二次反射会给像面带来  $0.01 \text{ W/mm}^2$  的辐照度; 反射率为 10% 的镜筒内壁给像面带来的辐照度为  $0.01 \text{ W/mm}^2$ 。利用该 LWIR 凝视成像光学系统进行了相关实验, 实验结果证明了上述分析的正确性, 表明该项分析有利于对 LWIR 凝视成像系统光学性能的进一步理解和杂散光的抑制。

**关键词:** 红外成像系统; 长波红外; 折衍混合光学系统; 衍射光学元件; 杂散光

**中图分类号:** TN215; O436.1 **文献标识码:** A

## Stray light analysis of diffractive/refractive LWIR staring imaging system

ZHANG Hong-xin<sup>1</sup>, LU Zhen-Wu<sup>1</sup>, SUN Qiang<sup>1</sup>, LIU Hua<sup>1</sup>, WANG Jian<sup>1</sup>, LI Ping<sup>1,2</sup>(1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China;*2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)*

**Abstract:** The stray light of a diffractive/refractive Long Wavelength Infrared(LWIR) staring imaging system containing a Diffractive Optical Element(DOE) fabricated by the diamond turning technology was analyzed. Three kinds of sources of the stray light, the unwanted diffractive order light of DOE, the multiple reflected light of optical surface, and the reflected light from the inner side of a barrel, were simulated and analyzed with the help of Light Tools software. From the simulation results of 6 twice-reflections, it is shown that when the source is normalized, the idea path and the twice-reflection offer their irradiances to be  $100 \text{ W/mm}^2$  and  $0.01 \text{ W/nm}^2$  in the image plane, respectively, and the inner side of the barrel with 10% reflection also results in an irradiance of  $0.01 \text{ W/mm}^2$  at the image plane. The analyzed result is approved by the image gotten from the LWIR system, which indicates the analysis is a contribution to understand the optical properties and to re-

收稿日期:2009-04-15; 修订日期:2009-08-13

基金项目:国家自然科学基金(10704072); 中国科学院知识创新工程领域前沿项目资助

strain the stray light of the imaging system.

**Key words:** infrared imaging system; Long Wavelength Infrared (LWIR); Diffractive Optical Element (DOE); stray light

## 1 引言

非制冷型凝视红外探测器的发展推动了红外成像技术的发展<sup>[1-3]</sup>,因此,红外光学系统的研究十分令人关注。与用于可见光光学系统中的多台阶衍射光学元件不同,红外光学系统可以应用利用金刚石车削技术制造的连续位相分布的衍射光学元件。在光学系统,特别是红外光学系统中,系统杂散光会影响成像质量,尤其当光源的辐射强度较大,例如飞机引擎或太阳位于视场内或视场外不远处时,由其引起的杂散光会严重影响红外光学系统的成像质量。因此,有必要在设计光学系统时对系统进行杂散光分析,以便对所得图像进行分析和后期处理<sup>[4-6]</sup>。

本文论及的长波红外(Long Wavelength Infrared, LWIR)凝视成像系统,其波段为 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ ,视场为 $12^\circ$ ,系统焦距为 $90 \text{ mm}$ , $F$ 数为 $1$ 。利用LightTools对衍射光学元件(Diffractive Optical Element, DOE)的不同衍射级次、光学表面的多次反射和镜筒内壁的反射等主要杂散光源分别进行了模拟分析。结果表明,由于衍射面引入的其它级次衍射光可以忽略;光学表面之间的多次反射会在像面上带来强度不等的同心圆环;镜筒内壁的反射会将系统视场外的光线反射到像面上,形成背景噪声。对以上的杂散光分析结果进行了实验验证,实验结果与模拟结果相符,表明以上分析有利于更加高效合理地设计红外光学系统,也有利于对所得的图像进行后期处理,进一步提高系统的性能。

## 2 光学系统<sup>[7,8]</sup>

图1为折/衍混合凝视成像光学系统示意图,系统由两片正透镜组成,透镜材料均为锗。系统参数:波段为 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ ,视场角为 $12^\circ$ ,系统焦距

为 $90 \text{ mm}$ ,系统 $F$ 数为 $1$ 。第二透镜的后表面为衍射面,其位相和周期分布如图2所示。

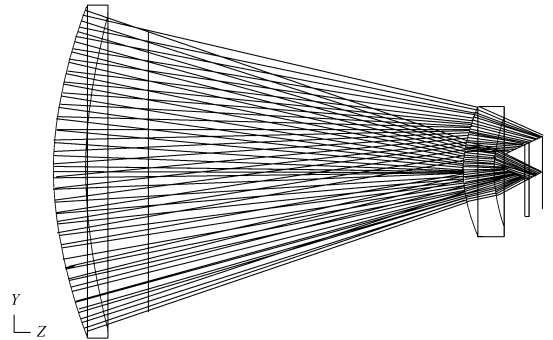


图1 折/衍混合凝视成像光学系统示意图

Fig. 1 Diffractive/refractive LWIR staring imaging system

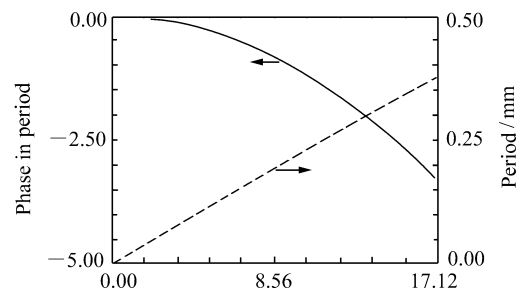


图2 衍射面的位相和周期分布

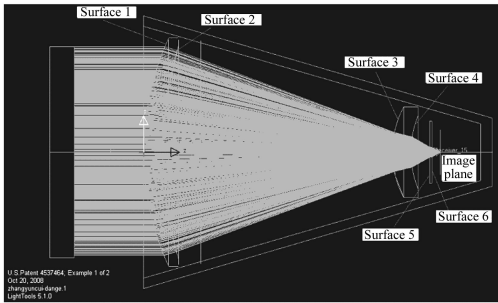
Fig. 2 Phase and phase frequency versus aperture of DOE

## 3 杂散光分析

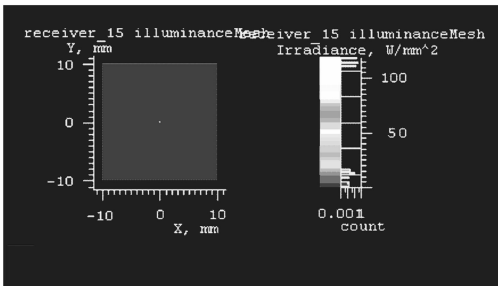
### 3.1 DOE元件的其它衍射级次

设计DOE元件时,利用的是 $-1$ 级衍射。由衍射理论可知,除了占大部分能量比例的衍射 $1$ 级外,在其它级次也存在能量分布,并沿轴向前后分布。在本系统中,DOE元件的周期数比较小,环带间隔比较大,所以其它衍射级次并不明

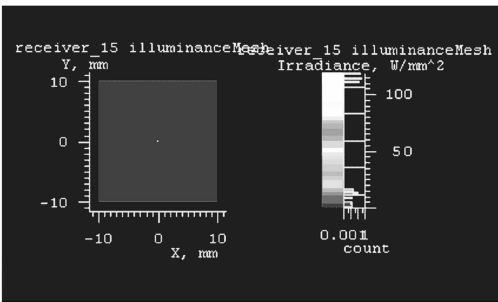
显,如图2所示。本文利用 LightTools 软件,对1级衍射、2级衍射进行了模拟。



(a) 系统光线追迹结果  
(a) Ray trace of system



(b) DOE元件1级衍射的像面辐照度分布  
(b) Irradiance on image plane when  
1 order diffraction of DOE are considered



(c) DOE元件的1级、2级衍射的像面辐照度分布  
(c) Irradiance on image plane when  
1 and 2 order diffractions of DOE are considered

图3 对 DOE 的光学追迹结果

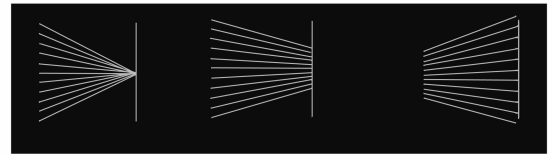
Fig. 3 Ray trace results of order 1 and order 2 diffractions of DOE

在图3中,(a)是系统的光线追迹模型,(b)是仅考虑 DOE 元件1级衍射的光线追迹结果,(c)是同时考虑 DOE 元件的1级、2级衍射的光线追迹结果,2级衍射光能量取1级的1%。通过比较显示,1级衍射与2级衍射几乎位于同一位置,而且(b)、(c)中,辐照度均为  $100 \text{ W/mm}^2$ ,或

者说1级衍射并未被2级衍射所模糊。而且1级衍射仍然具有绝大多数的能量分布,而-2级、-1级、0级衍射光与此2级衍射光情况相似。因此 DOE 元件不同级次的杂散光对系统的影响较小。

### 3.2 光学表面间的多次反射

在多数折射光学系统中,即使各表面都镀了增透膜,光学表面的多次反射也是主要的杂光光源。若光学系统有  $n$  个光学表面,则二次反射光路的组合数目为  $C_n^2$ ;4次反射光路的组合数目为  $C_n^4$ ,经过4次反射后,光线的能量已经降到非常低,可以忽略其在像面上的影响。在所有的二次反射光路中,杂光可以分为3类。



(a) Ill型 (b) General型 (c) Well型  
(a) Ill-glass (b) General-glass (c) Well-glass

图4 二次反射引入的杂光的3种分类

Fig. 4 Three catalogues of the stray light

如图4所示,(a)为光线经光学表面二次反射后在像面上会聚的情况,这里将其定义为 Ill 型二次反射杂光;(c)为光经光学表面二次反射后在像面上发散的情况,将其定义为 Well 型二次反射杂光;(b)为光线经光学表面二次反射后在像面上会聚的趋势,但会聚程度不高的情况,或者说介于(a)和(c)之间的情况,将其定义为 General 型二次反射杂光。很显然,在光学系统中,可以忽略 Well 型二次反射杂光的影响,但必须消除 Ill 型二次反射杂光,General 型二次反射杂光无法避免,但应尽量减少其会聚程度。在本系统设计阶段除了探测器前面的两个窗口表面形成的二次反射光外,其它 Ill 型杂光已被最大程度地消除了,如图3(a)中的第5、第6表面,因为此处为探测器的窗口,使用了比较薄的平板玻璃。利用 LightTools 软件,进行分析模拟,单面反射率为1%,发现系统存在5种 General 型二次反射杂光和1种 Ill 型二次反射杂光。如图5所示,图中左边是光线追迹模型,右边是像面上的光线分布。

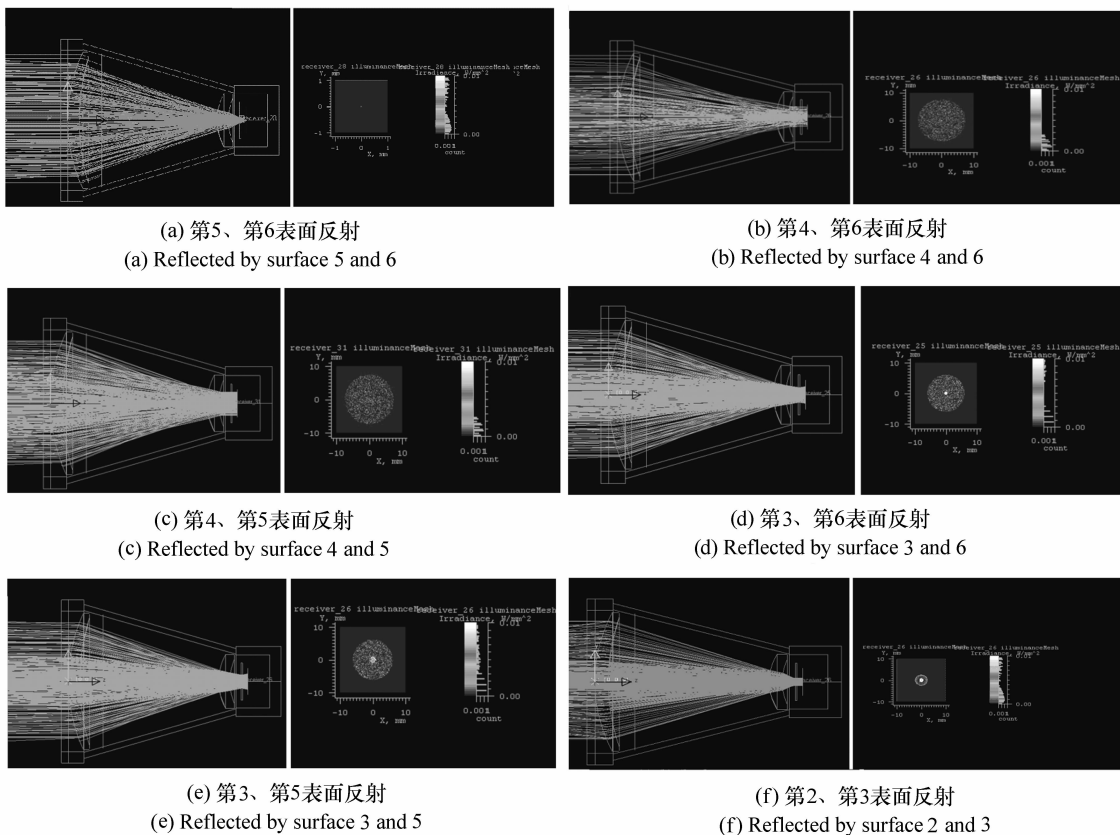


图 5 General 型杂光、I11 型射杂光光线追迹结果

Fig. 5 Ray traces of 5 General-class and I11-class stray light

对于归一化的外界光源,以上 6 种二次反射的模拟结果如表 1 所示。

表 1 二次反射模拟结果

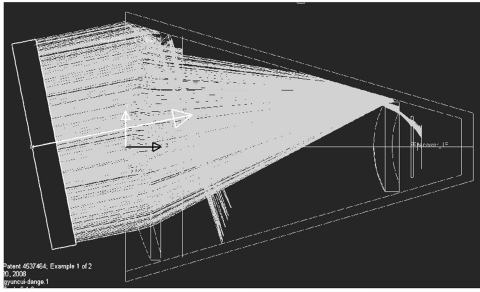
Tab. 1 Simulated results of twice-reflection

序号	反射表面	杂光类型	像面辐照度 ( $W/mm^2$ )
(a)	5,6	I11	0.01
(b)	4,6	General	0.01
(c)	4,5	General	0.01
(d)	3,6	General	0.01
(e)	3,5	General	0.01
(f)	2,3	General	0.01

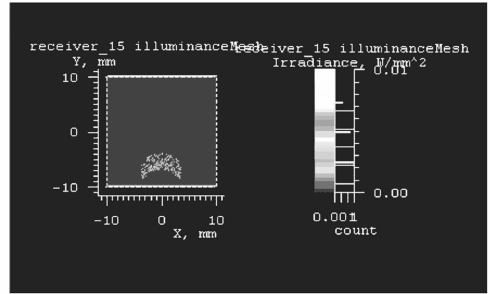
显然,当系统视场内强烈的红外辐射源时,这些二次反射杂光的积分效应会使系统在像面上出现一组亮度不等的同心圆环的噪声背景。

### 3.3 机械结构镜筒内壁的反射

镜筒的内表面通常用车削光螺纹、喷砂、发黑等处理来减小表面反射的影响,但是采取这些处理方式也无法保证到达镜筒内壁的光线能被完全吸收。或者说,当系统视场外附近有一较强的红外辐射源时,其能量还是会有一部分被镜筒内壁反射到像面上。在本文论及的系统中,镜筒内壁为一圆锥旋转面,利用 LightTools 软件对其进行模拟分析,结果如图 6 所示。在图 6 中,系统视场外的一束平行光被镜筒内壁反射后到达像面,成为像面的背景噪声。可以看出,当系统视场外附近有一较强的红外辐射源时,像面上的背景光会达到一定的亮度。对于归一化的外界光源,镜筒内壁经过消杂光处理后,反射率为 10%,像面辐照度为  $0.01 W/mm^2$ 。



(a) 光线追迹结果  
(a) Ray trace result of system



(b) 像面辐照度分布  
(b) Irradiance of image

图6 镜筒内表面反射光线的光线追迹图

Fig. 6 Ray trace of stray light reflected from inner surface of a barrel

## 4 实验

本部分对上述提到的由系统光学表面二次反射在像面上形成的同心圆环背景和由镜筒内壁反射形成的背景噪声进行了实验验证。

### 4.1 光学表面二次反射形成的杂散光

如图7所示,物体为一建筑物,背景为天空,在这里天空被视为位于视场内无限远的强红外辐射源。图像中的同心圆环背景即是由镜片表面二次反射带来的杂散光引起的,与3.2中的分析结果一致。

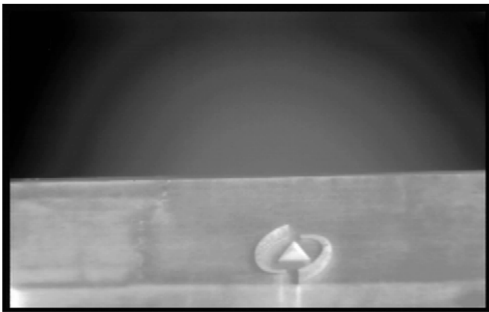


图7 对建筑物成像  
Fig. 7 Image of a building

### 4.2 镜筒内表面反射

图8(a)为系统对一张开手掌的成像。将一设置为 $90^{\circ}\text{C}$ 的黑体置于目标附近,这里黑体被认为是一个较强的红外辐射源,其辐射的红外光线到达镜筒内壁后被反射到像面上,成像结果如

图8(b)所示。相比于图8(a),图8(b)视场的左边缘背景噪声明显增加,与3.3中的分析结果一致。



(a) 目标附近无黑体  
(a) No black body near the hand



(b) 目标附近件有黑体  
(b) Black body near the hand

图8 对手掌成像  
Fig. 8 Images of a hand

## 5 结论

本文对含有一个DOE的LWIR凝视成像系统进行了分析。利用LightTools软件对DOE的不

同衍射级次、光学表面的多次反射、镜筒内壁的反射等主要杂散光源进行了模拟,并通过实验对模拟结果进行了验证。实验结果证明了上述分析的

正确性,表明该项分析有利于对 LWIR 凝视成像系统光学性能的进一步理解和杂散光的抑制。

### 参考文献:

- [1] STONE T, GEORGE N. Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats[J]. *Appl. Opt.*, 1988, 27(14):2960-2971.
- [2] DAVIDSON N, FRIESEM A A, HASMAN E. Analytic design of hybrid diffractive-refractive achromats[J]. *Appl. Opt.*, 1993, 32(25):4770-4774.
- [3] ZAJAC M. Hybrid achromatic spectacle lens[J]. *SPIE*, 2004, 5259:132-18.
- [4] FRITZ T A, COX J A. Diffractive optics for broadband infrared imagers: design examples[J]. *SPIE*, 1990, 1052:25-31.
- [5] BIGWOOD C. New infrared optical systems using diffractive optics[J]. *SPIE*, 2003, 4767:1-11.
- [6] MA T, YANG G G, BAI J, *et al.*. Theory and method of microstructure DOE as substitution for aspheric surface[J]. *SPIE*, 2005, 5636:86-92.
- [7] ZHANG Y C, SUN Q, LU ZH W. The design of diffractive/refractive LWIR staring imaging system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36:1257-1259.
- [8] ZHANG Y C, SUN Q, LU ZH W. Manufacture and analyse of petzval objective lens of uncooled infrared imaging system[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2007, 18:270-272.

作者简介:张红鑫(1978—),男,河北邯郸人,博士研究生,助理研究员,主要从事光学系统设计、光学加工的研究工作。

E-mail: firsthongxin@163.com