

制冷型红外焦平面系统冷反射效应的分析与控制

刘 洋 安晓强

(西南技术物理研究所, 四川 成都 610041)

摘要 利用光学不变量对焦平面系统进行近轴分析,得到了量化焦平面系统冷反射集中程度和变化率的两个一阶参量。以热辐射理论为基础,推导并总结了冷反射引入温差(NITD)和成像系统参数及环境参数的关系式。以焦距为 90 mm,视场角 4° , F 数 2.75 的中波焦平面成像系统为例,在 CODE V 软件中对其冷反射效应进行了定量分析,并以一阶参量为约束,实光线追迹辅助验证的方式进行了冷反射优化,优化后光学系统的冷反射降低了 70%。在杂光分析软件(ASAP)中根据系统的实际参数对冷反射分布进行了模拟,结果表明对冷反射进行优化控制后,系统的 NITD 减小到了预设值之下,冷反射效应得到了很好的控制。

关键词 光学设计;冷反射;焦平面;光线追迹;红外系统

中图分类号 TN216 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0222007

Analysis and Control of Narcissus Effect of Cooling IR Focal Plane System

Liu Yang An Xiaoqiang

(Southwest Institute of Physics and Technology, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract Cooling IR focal plane system is paraxially analysed with the optical invariant and first order parameters are proposed which quantify the concentration and variation of narcissus on focal plane arrays (FPA). The relation between NITD and parameters of environment and system is summarized based on the theory of thermal-radiation theory. The narcissus of an optical design in $3\sim 5\ \mu\text{m}$ with F -number 2.75, view angle 4° and effective focal length 90 mm is calculated and optimised through controlling its first parameters and using real ray trace as confirmation in CODE V, after which the narcissus effect drops by 70%. The distribution of narcissus is simulated on practical conditions in ASAP and the results are presented, it is shown that the NITD dropped down below the preset value after optimization and the narcissus is controlled effectively.

Key words optical design; narcissus; focal plane arrays (FPA); ray trace; infrared (IR) system

OCIS codes 220.3620; 080.2468; 040.3060

1 引 言

冷反射是致冷型红外系统中一种普遍的杂光效应^[1]。致冷型红外探测器通常工作在中波段($3\sim 5\ \mu\text{m}$)或长波段($8\sim 12\ \mu\text{m}$),系统元件在此波段也有一定辐射,如果没有密封,系统内部还会接收到外部非场景辐射,这些辐射都属于杂散辐射^[2~4]。探测器一般不能直接看到这些杂光,但某些杂光可通过光学镜片的反射到达探测器而形成冷反射。虽然镜片反射率很低(1%),到达探测器的杂散辐射能量很小,但由于冷指工作在低温环境下(77 K),和周

围热环境(300 K 左右)的对比度很高,冷反射引入温差(NITD)可能会大于系统的最小可分辨温差(MRTD),从而影响成像质量,通常表现为在视场中心叠加一块黑斑。

红外系统分为扫描型和焦平面型,一般认为焦平面系统的冷反射可以通过电路校正去除,扫描型系统处于动态,主要通过光学设计抑制冷反射^[5,6]。这种观点有其局限性,因为焦平面系统并不是完全工作在静态,如在成像过程中移动镜片进行调焦,在变焦系统中移动或插入镜片变焦,工作中的机械抖

收稿日期: 2011-07-18; 收到修改稿日期: 2011-09-26

作者简介: 刘 洋(1987—),男,硕士研究生,主要从事光学系统杂光分析方面的研究。E-mail: ariter.liu@gmail.com

导师简介: 安晓强(1971—),男,研究员,主要从事红外光电系统设计方面的研究。E-mail: xqan2145@sina.com

动,环境或背景温度变化等,这些都会造成 NITD 的变化。即使频繁的校正也难以完全消除冷反射的影响,还可能出现欠校正或过校正。在光学设计中将冷反射降到最低,可以减小后期电路校正的难度,提高系统的工作效率。

由文献[7]的推导可知,扫描式系统冷反射的大小取决于反射光斑的集中程度和变化率,由两个一阶参量表征。这个概念同样适用于焦平面系统,只是由于光路的不同一阶参量有所变化。一阶参量的推导采用了近轴近似,且没有考虑光阑对光线的限制,因此只能用于冷反射的初始估算^[8,9]。要得到更准确的结果,需进行实光线追迹,实用的方法是从探测器反向追迹统计冷返量,计算 NITD^[10,11]。相对于近轴分析,实光线追迹计算量大,耗时长,但更可靠。

在冷指周围热环境辐射特性已知的情况下,可以设置合适的杂光光源对系统正向追迹,作冷反射分布的实光源模拟^[12]。这种方法计算量虽然比反向追迹大几个数量级,但结果更为精确,文中采用了

这种方法作为一阶参量和反向追迹计算的验证。

2 理论分析

2.1 焦平面系统冷反射的近轴分析

和扫描式系统冷反射分析类似^[7],对焦平面系统采用逆向追迹,在此过程中,对系统采用近轴近似,并忽略冷光阑对反射光线的限制。设系统光轴为 z 轴,如图 1(a)所示,探测器某像元 A 离轴高度为 x ,以 A 为点源对系统反向追迹,通过冷光阑发出一束光线,其中两条为正负边缘光线,与 z 轴夹角分别为 u_u 和 u_d ,另外一条为主光线,与 z 轴夹角为 u_m 。如图 1(b)所示,3 条光线到达反射面 S,与 z 轴夹角分别为 u'_u , u'_d 和 u'_m ,入射角分别为 i_u, i_d 和 i_m ,高度分别为 y'_u, y'_d 和 y'_m 。发生反射后,反射光线与 z 轴夹角分别为 \bar{u}'_u, \bar{u}'_d 和 \bar{u}'_m 。反射光线回到焦平面,高度分别为 y_u, y_d 和 y_m ,与 z 轴夹角分别为 \bar{u}_u, \bar{u}_d 和 \bar{u}_m 。如图 1(b)所示,可以认为反射面 S 对像元 A 的冷反射光斑直径 $D = y_u - y_d$,而冷反射光斑中心在离轴 y_m 处。

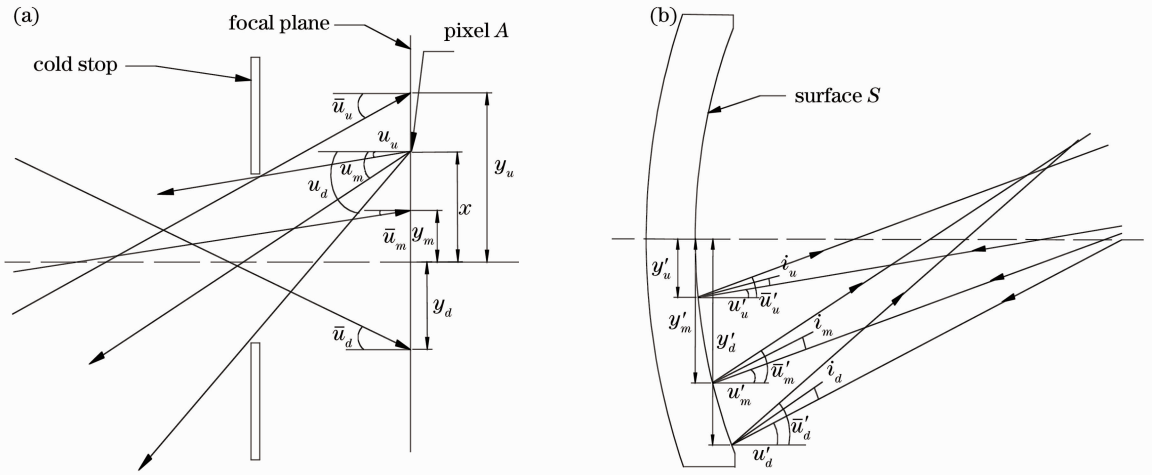


图 1 冷反射近轴分析示意图。(a)冷光阑;(b)反射面

Fig. 1 Paraxial analysis of narcissus. (a) Cold shield; (b) reflecting surface

设反射面处折射率为 n ,在反射面和焦平面处求光线的拉格朗日不变量得到

$$u'_u n \bar{u}'_d - y'_d n u'_u = x \bar{u}_d - y_d u_u, \quad (1)$$

$$y'_u n \bar{u}'_u - y'_u n u'_u = x \bar{u}_u - y_u u_u, \quad (2)$$

$$y'_d n \bar{u}'_u - y'_d n u'_d = x \bar{u}_u - y_u u_d, \quad (3)$$

$$y'_d n \bar{u}'_d - y'_d n u'_d = x \bar{u}_d - y_d u_d, \quad (4)$$

$$y'_u n u'_m - y'_m n u'_u = x u_m - x u_u, \quad (5)$$

$$y'_d n u'_m - y'_m n u'_d = x u_m - x u_d, \quad (6)$$

$$y'_u n \bar{u}'_m - y'_m n u'_u = x \bar{u}_m - y_m u_u, \quad (7)$$

$$u'_d n \bar{u}'_m - y'_m n u'_d = x \bar{u}_m - y_m u_d. \quad (8)$$

合并(1)~(4)式及(5)~(8)式得到

$$-(y_u - y_d)(u_u - u_d) = (y'_u - y'_d)n(\bar{u}'_d - \bar{u}'_u + u'_u - u'_d), \quad (9)$$

$$-y_m(u_u - u_d) = (y'_u - y'_d)n(u'_m - \bar{u}'_m) - x(u_u - u_d). \quad (10)$$

注意到 $y_u - y_d$ 是面 S 对像元 A 的冷反射光斑直径 D , $u_u - u_d$ 是冷光阑开口对 A 点的张角,设为 θ 。又有 $u'_u = \bar{u}'_u - 2i_u, u'_m = \bar{u}'_m - 2i_m, u'_d = \bar{u}'_d - 2i_d$ 。则(9)式和(10)式可以化简为

$$-D\theta = 2(y'_u - y'_d)n(i_u - i_d), \quad (11)$$

$$-2(y'_u - y'_d)ni_m = (x - y_m)\theta. \quad (12)$$

由(11)式化简得到反射面 S 对像元 A 的冷反射光斑直径为

$$D = -2(y'_u - y'_d)n(i_u - i_d)/\theta. \quad (13)$$

注意到 $x - y_m$ 是冷反射光斑中心离像元 A 的距离, 设为 H , 由(12)式得到

$$H = -2(y'_u - y'_d)ni_m/\theta. \quad (14)$$

当 A 在探测器中心时有 $y'_u = -y'_d, i_u = -i_d$, 设视场中心 $D = D_0, y'_u = y_0, i_u = i_0$, 则有 $D_0 = -4y_0ni_0/\theta \approx -4y_0ni_0F$, 其中 F 为系统 F 数。 D_0 的幅度越大, 则探测器中心的冷反射幅度越小, 与扫描式系统一样, 取 y_0ni_0 作为衡量视场中心冷反射幅度的量。

随着视场增大, 定义像元 A 被冷反射光斑的覆盖率为

$$P = D/(2H) = (i_u - i_d)/(2i_m). \quad (15)$$

由图 1(a)可知 P 的幅度越大, 冷反射随视场的变化率越小, 整个焦平面冷反射分布越均匀。设在边缘视场有 $i_u = i_{au}, i_d = i_{ad}, i_m = i_{om}$, 取 $(i_{au} - i_{ad})/(2i_{om})$ 作为衡量整个视场冷反射分布均匀度的参量, 与扫描式系统相比产生了变化。

2.2 实光线追迹及 NITD 的计算

近轴分析只能用于冷反射大小的初始估算, 而逆向实光线追迹可以比较准确地计算系统 NITD 的实质。以像元 i 为点光源通过冷光阑反向发出一束足够密集的光线, 设为 m 条, 经过镜面 j 的反射, 返回冷指的光线数目为 n 条, 则冷返量 $\sigma_{i,j} = n/m$ 。设冷光阑对 i 所张成的立体角为 Ω_i , 则像元 i 接收到来自冷指和系统热环境杂散辐射立体角分别为 $\sigma_{i,j}\Omega_i$ 和 $(1 - \sigma_{i,j})\Omega_i$ 。由于冷指温度远小于热环境, 其本身辐射可以忽略。设热环境为朗伯体, 且忽略二次以上反射的贡献, 则 i 点接收到杂散反射辐照度为^[13,14]

$$E_{i,j} \approx \xi_h \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N_{T_h} (1 - \sigma_{i,j}) \Omega_i r p_{i,j} \alpha d\lambda, \quad (16)$$

式中 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 为系统的波段范围, ξ_h 为热环境平均发射率, r 为镜片平均反射率, $p_{i,j}$ 为反射面 j 到像元 i 的平均透过率, N 为黑体辐射亮度, T_h 为热环境温度, α 为探测器平均吸收率。以 $\sigma_{i,j} = 0$ 的点作为参考点, 则反射面 j 对像元 i 引入的 NITD 为

$$\kappa_{i,j} = \frac{\xi_h \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N_{T_h} \Omega_0 r p_{0,j} \alpha d\lambda - \xi_h \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N_{T_h} (1 - \sigma_{i,j}) \Omega_i r p_{i,j} \alpha d\lambda}{\partial \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \xi_b N_{T_b} \Omega_i p_g p_s \alpha d\lambda / \partial T_b}, \quad (17)$$

式中 Ω_0 为冷光阑对零参考点张成的立体角, $p_{0,j}$ 为反射面 j 到零参考点的平均透过率, ξ_b 为场景平均发射率, p_g 为平均大气透过率, p_s 为光学系统平均透过率, T_b 为背景温度。

由于 $p_{0,j} \approx p_{i,j}, \Omega_0 \approx \Omega_i$, 则(17)式可以化简为

$$\kappa_{i,j} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N_{T_h} d\lambda}{\partial \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N_{T_b} d\lambda / \partial T_b} \frac{\xi_h r p_{i,j} \sigma_{i,j}}{\xi_b p_g p_s}, \quad (18)$$

像元 i 总的冷反射温差 κ_i 为各反射面贡献之和, 即

$$\kappa_i = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N_{T_h} d\lambda}{\partial \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N_{T_b} d\lambda / \partial T_b} \frac{\xi_h r}{\xi_b p_g p_s} \sum_j p_{i,j} \sigma_{i,j}. \quad (19)$$

设 $C(T_h, T_b, \xi_b) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N_{T_h} d\lambda}{\partial \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N_{T_b} d\lambda / \partial T_b} \frac{1}{\xi_b p_g p_s}$, 定义像元 i

总的冷返量为 $\sigma_i = \sum_j p_{i,j} \sigma_{i,j}$, 由(19)式可得

$$\kappa_i = C(T_h, T_b, \xi_b) \xi_h r \sigma_i. \quad (20)$$

由(19)式和(20)式可知 κ_i 大小正比于冷返量 σ_i , 镜片反射率 r 和热环境发射率 ξ_h , 还与热环境温度和背景温度及场景发射率等因素有关。在工程中应用合适的材料和工艺, 降低热环境发射率和镜片反射率可以减小冷反射, 但成本较高。常用的方法为降低冷返量 σ_i , 可通过优化透镜的曲率、位置、厚度等参数达到。

3 系统分析和优化

3.1 实例分析

图 2 为一中波致冷型红外焦平面(FPA)系统, 其

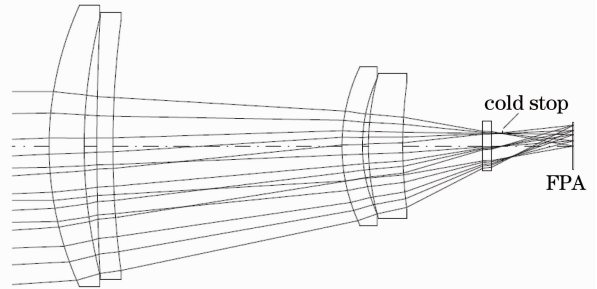


图 2 某制冷型红外焦平面光学系统示意图

Fig. 2 Schematic optics of a cooling staring IR system

系统参数如表 1 所示,透镜参数如表 2 所示。在 CODE V 光学设计软件中对其近轴分析,得到冷指前各反射面的 $y_0 ni_0$ 和 $(i_{en} - i_{ed}) / (2i_{em})$, 如表 3 所示。结果显示冷反射最集中的几个反射面分别为 S2, S4, S7 和 S8, 随视场变化率最大的面分别为 S2, S3, S4 和 S8。

表 1 实例系统参数

Table 1 Parameters of the system

$F_\#$	2.75
Full angular field / (°)	4
System focal length / mm	90
Detector size / mm	7.84×9.6
Wavelength / μm	3~5
System length / mm	150
System MRTD / mK	100
System transmittance	0.89

表 2 实例系统透镜参数

Table 2 Parameters of the system lens

Surface	Radius / mm	Thickness / mm	Material
1	104.53	9.83	Si
2	163.53	3.57	
3	796.00	4.50	Ge
4	300.30	64.24	
5	56.50	5.73	Ge
6	50.09	1.71	
7	82.95	9.60	Si
8	153.01	22.43	
Window	Infinity	2.50	Ge
10	Infinity	3.00	
Stop	Infinity	19.78	
Filter	Infinity	0.30	Ge
13	Infinity	0.10	
Image	Infinity	0.00	

表 3 近轴冷反射分析结果

Table 3 Results of paraxial analysis of narsissus

Surface	$y_0 ni_0$	$(i_{en} - i_{ed}) / (2i_{em})$
1	2.4411	-0.97
2	-0.8694	-0.37
3	-1.8893	-0.49
4	-0.2057	-0.05
5	1.2085	-1.82
6	1.3244	-1.56
7	0.6236	0.73
8	-1.0637	-0.51

假设热环境和场景都为 300 K 的黑体辐射,大气透过率 0.9,镜面反射率 0.01,对系统进行逆光线追迹,根据(18)~(20)式求出各反射面和系统总的 NITD 沿探测器对角线分布,如图 3 所示。对比表 3 可知,实光线追迹和近轴分析结果吻合。计算得到

系统视场中心的 NITD 约为 580 mK,随着视场增加,降低到边缘的 240 mK,在整个焦平面上约有 340 mK 的起伏,超过了系统的 MRTD,而 S4 是系统冷反射的主要贡献者,其次是 S7,而 S7 的 NITD 变化率远小于 S4。

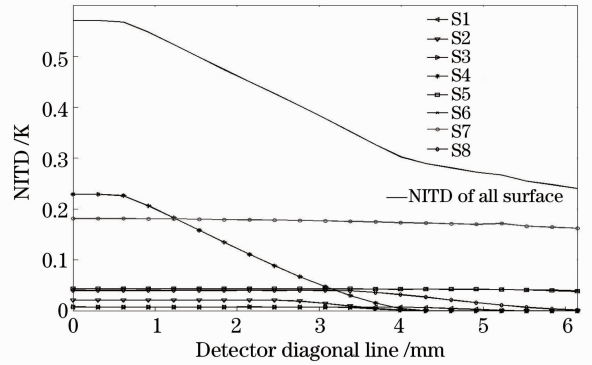


图 3 各反射面的 NITD 和系统总的 NITD 沿探测器对角线的分布图

Fig. 3 Distribution of NITD of every surface and the whole system on the diagonal line of detector

根据(19)式,计算了中心和边缘视场 NITD 之差随环境温度和背景温度的变化情况。如图 4 所示, NITD 随环境温度的升高和背景温度的降低迅速增大,在背景为 250 K,系统热环境为 320 K 的极端情况下甚至会达到 4 K。这种变化是非线性的,给后期校正增加了难度。

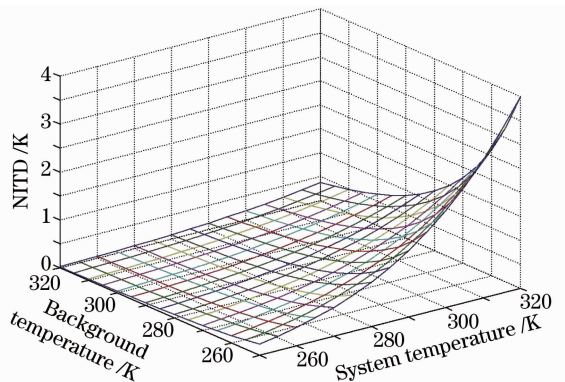


图 4 NITD 随热环境和背景温度的变化关系图

Fig. 4 Relation between NITD and temperatures of the system and background

3.2 系统优化

实光线追迹计算的 NITD 远大于系统的 MRTD,系统需要冷反射优化。优化采用了以一阶参量为控制约束,实光线追迹辅助验证的方式。在优化中保持系统参数不变,只调整透镜参数,先控制一阶参量到某预设值,再进行实光线追迹计算,观察 NITD 是否达标,如不满足则调整一阶参量预设值

继续优化,直到 NITD 满足要求为止。优化目标为在背景和热环境都为 300 K 的条件下,焦平面上 NITD 起伏小于 150 mK。为了补偿优化所引入的新的像差,将 S2 换成了非球面。优化后的系统透镜参数如表 4 所示,近轴分析结果如表 5 所示,可以看到冷反射最大的几个镜面一阶参量幅值得到了不同程度的提高,而其它镜面的值变化不大。实光线追迹 NITD 如图 5 所示,在环境和背景温度都为 300 K 时中心视场 NITD 降低到了 105 mK,在焦平面上的起伏约为 100 mK,满足优化目标。图 6 为优化后系统 NITD 随环境温度和背景温度的变化,温差起伏是优化前的 1/4。图 7 为原系统和优化后系统的衍射调制传递函数(MTF)曲线对比,结果表明冷反射优化后系统的成像质量没有降低。

表 4 优化后系统透镜参数

Table 4 Parameters of lens after optimization

Surface	Radius /mm	Thickness /mm	Material
1	141.03	5.61	Si
2	276.92	13.41	
CC: $-9.09 A$; $-6.76 \times 10^{-8} B$; -3.24×10^{-11}			
C: $-2.34 \times 10^{-15} D$; -1.29×10^{-18}			
3	-102.45	7.81	Ge
4	-157.34	20.30	
5	55.50	8.41	Ge
6	46.52	20.34	
7	92.52	6.07	Si
8	243.42	47.53	
Window	Infinity	2.50	Ge
10	Infinity	3.00	
Stop	Infinity	19.78	
Filter	Infinity	0.30	Ge
13	Infinity	0.10	
Image	Infinity	0.00	

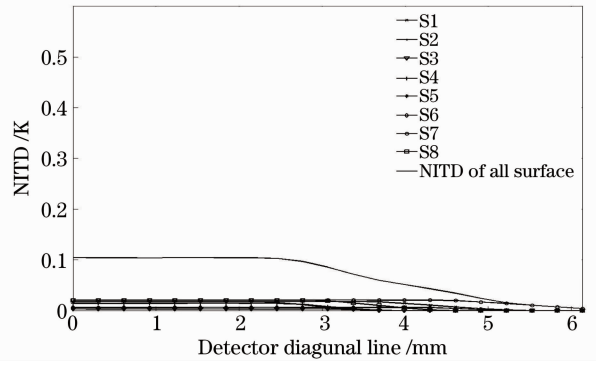


图 5 优化后各反射面的 NITD 和系统总的 NITD 在探测器对角线的分布

Fig. 5 Distribution of NITD of the every surface and the whole system after optimization on the diagonal line of detector

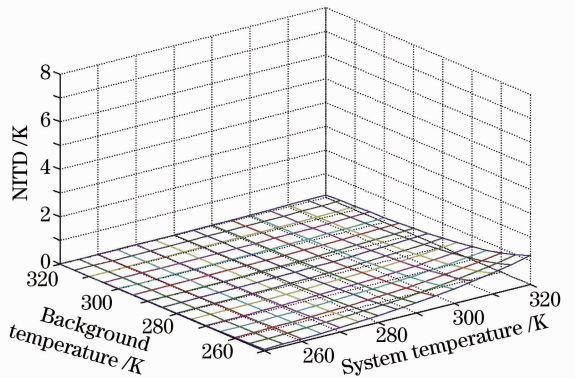


图 6 优化后 NITD 随热环境和背景温度的变化

Fig. 6 Relation between NITD and temperatures of the system and background after optimization

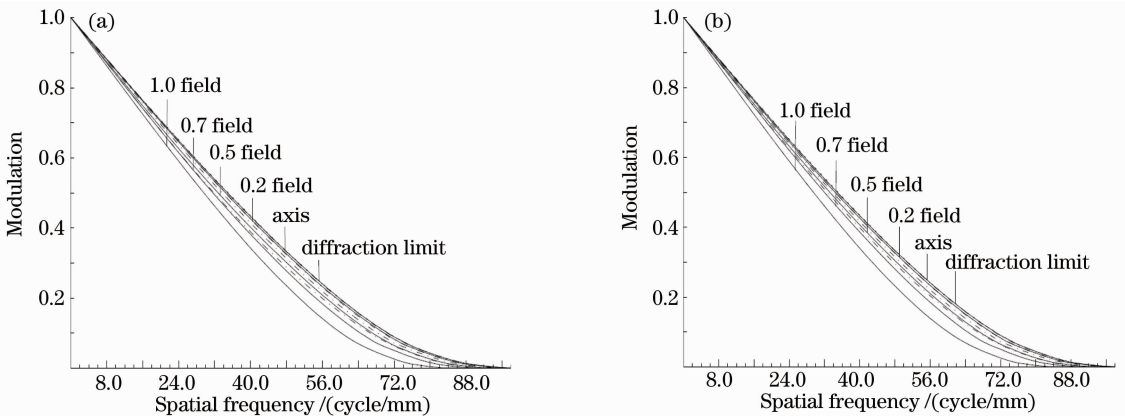


图 7 系统的 MTF 曲线。(a)优化前;(b)优化后

Fig. 7 MTF curves of the system. (a) Before optimization; (b) after optimization

表 5 优化后近轴冷反射分析结果

Table 5 Results of paraxial analysis of narcissus after optimization

Surface	$y_0 n i_0$	$(i_{eu} - i_{ed}) / (2i_{em})$
1	1.77	-0.92
2	-1.19	-0.61
3	-3.67	-0.60
4	-1.32	-0.41
5	3.63	-0.93
6	3.96	-0.89
7	2.54	-1.02
8	-1.66	-0.47

4 实光源模拟验证

在杂光分析软件 ASAP 中对实例系统冷反射进行了实光源模拟。由于系统是密封的,所以热环境中的杂光光源主要是镜筒壁和镜片,如图 8 所示。在模拟中将镜筒面和镜面设置为朗伯体,筒壁的

发射率为 1,镜片发射率为 0.01,反射率为 0.01,追迹光线 10^8 条。模拟得到了冷反射在焦平面上的辐照度分布,图 9(a)为优化前的冷反射分布,显示视场中心和边缘存在 60% 的能量起伏,与图 3 中 NITD 的计算结果吻合。图 9(b)为优化后焦平面冷反射分布,冷反射能量在焦平面起伏降到了 5% 以下。

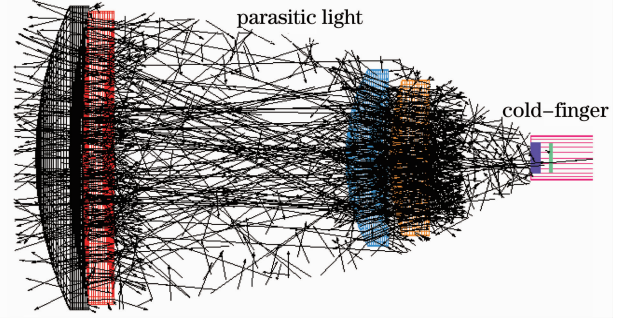


图 8 冷反射的实光源正向追迹

Fig. 8 Ray trace of narcissus of a real light source in the forward direction

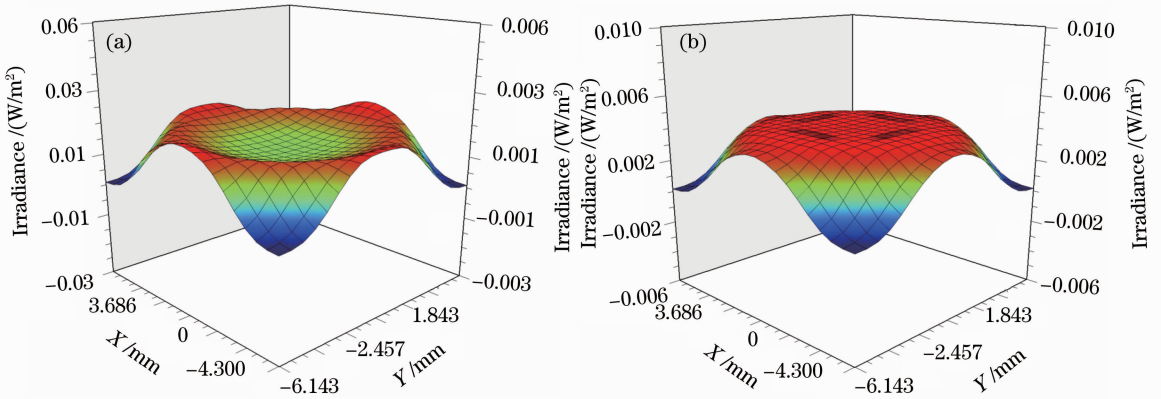


图 9 冷反射分布。(a)优化前;(b)优化后

Fig. 9 Distribution of narcissus. (a) Before optimization; (b) after optimization

实光源模拟证实了近轴分析和逆向追迹 NITD 的计算结果,表明一阶参量约束结合实光线追迹的优化方式能使系统的冷反射得到了很好的抑制。

5 结 论

利用光学不变量对焦平面系统进行了近轴分析,提出了反映冷反射集中度和变化率的两个一阶参量,并与扫描式系统进行了对比和修正。根据辐射理论,分析总结了 NITD 与系统参数、环境参数的关系。对实例系统近轴分析得到了冷反射一阶参量,又采用实光线追迹得到了系统的冷返量,计算了 NITD 的分布,结果表明一阶参量和冷返量对冷反射的描述互相吻合。分析了 NITD 随系统热环境温

度和背景温度的变化,发现冷反射随温度场变化剧烈起伏。在光学设计时将冷反射降到最低,可以减小后期校正的难度,提高系统的工作效率。

利用一阶参量为控制约束,实光线追迹为辅助验证的方式,对系统进行了冷反射优化,将 NITD 降到了实际应用可接受范围之内。在杂光分析软件中对系统冷反射进行了实光源模拟,结果表明一阶参量和冷返量客观地描述了系统的冷反射效应,而近轴控制结合实光线追迹验证的优化方式使系统的冷反射得到了很好的抑制,达到了预期值。

参 考 文 献

1 J. M. Lloyd. Thermal Imaging Systems [M]. New York: Plenum Press, 1975

- 2 Niu Jinxing, Zhou Renkui, Liu Chaohui *et al.*. Analysis of stray light caused by thermal radiation of infrared detection system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2267~2271
牛金星, 周仁魁, 刘朝晖等. 红外探测系统自身热辐射杂散光的分析[J]. 光学学报, 2010, **30**(8): 2267~2271
- 3 Niu Jinxing, Zhou Renkui, Liu Chaohui *et al.*. Analysis and calculation of space-based infrared detecting system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 768~771
牛金星, 周仁魁, 刘朝晖等. 天基红外探测系统的杂散光分析与计算[J]. 光学学报, 2010, **30**(3): 768~771
- 4 Wu Zhensen, Dou Yuhong. Visible light scattering and infrared radiation of spatial object[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1250~1254
吴振森, 窦玉红. 空间目标的可见光散射与红外辐射[J]. 光学学报, 2003, **23**(10): 1250~1254
- 5 Zhang Liang. Narcissus in staring infrared optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(z1): 8~11
张 良. 凝视型红外光学系统中的冷反射现象[J]. 红外与激光工程, 2006, **35**(z1): 8~11
- 6 Optical Research Associates. Code V User Manual [M]. USA: 3280 East Foothill Boulevard, 2004. 39~49
- 7 Abel James, W. Howard, R. Irving. Narcissus: reflections on retroreflections in thermal imaging systems [J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(8): 3393~3397
- 8 Akram Muhammad Nadeem. Design of a multiple-field-of-view optical system for 3~5 μm infrared focal plane arrays [J]. *Opt. Engng.*, 2003, **42**(6): 1704~1714
- 9 Akram M. Nadeem. Simulation and control of narcissus phenomenon using nonsequential ray tracing: staring camera in 3~5 μm waveband [J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(6): 965~975
- 10 K. Lu, S. J. Dobson. Accurate calculation of narcissus signatures by using finite ray tracing [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(25): 6393~6398
- 11 J. L. Rayces, L. Lebich. Exact ray-tracing computation of narcissus equivalent temperature difference in scanning thermal imagers [C]. *SPIE*, 1992, **1752**: 325~332
- 12 Yang Kaiyu, Wang Feiyu, Jin Ning *et al.*. Analysis of interior stray light for infrared thermal imager by OptisWorks [J]. *Infrared Techelony*, 2010, **32**(8): 443~448
杨开宇, 王飞宇, 金 宁等. 利用 OptisWorks 对红外热像仪进行内部杂散光分析[J]. 红外技术, 2010, **32**(8): 443~448
- 13 Robert Siegel, John R. Howell. Thermal Radiation Heat Transfer [M]. USA: Hemisphere Publishing Corporation, 1969. 412~484
- 14 Warren J. Smith. Modern Optical Engineering [M]. USA: MacGraw-Hill Companies, 2000. 219~234

栏目编辑: 何卓铭