

基于光学离焦量的致冷型长波变焦红外成像系统 冷反射效应的分析与控制

刘 洋 安晓强 王 茜 刘鹏鹏

(西南技术物理研究所, 四川 成都 610041)

摘要 衡量镜面冷反射大小的主要指标在于其对后向反射光线的在探测器靶面的聚焦程度, 目前使用一阶参量 yni 进行量化, 不足之处在于没有和具体的透镜参数和系统参数相联系, 对于冷反射优化指导作用不大。定义了新的参量光学离焦量对反射光线的散焦进行量化, 推导给出了其与镜面曲率半径、通光孔径、其后成像面位置、其前透镜组焦距和系统视场角等设计参数的关系式, 分析总结了光学设计中降低冷反射的方法。利用光学离焦量对一个制冷型长波变焦红外光学系统进行了冷反射分析, 并计算了各反射面的冷反射引入等效温差(NITD)。分析了 NITD 主要贡献面的冷反射成因, 并进行了针对性的优化, 优化后系统变焦部分的 NITD 减小了 50%, 而固定透镜组的冷反射下降了 75% 左右, 结果表明光学离焦量对于制冷型红外系统的冷反射优化具有明显的指导作用。

关键词 光学设计; 冷反射; 光学离焦量; 变焦; 红外系统

中图分类号 TN216 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0422003

Analysis and Control of Narcissus Effect of Long-Wavelength Cooling Infrared Imaging System Based on Optical Defocusing

Liu Yang An Xiaoliang Wang Qian Liu Pengpeng

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

Abstract At present the first-order parameter yni is used to quantify the focusing of retro-reflected rays on the detector plane, which causes narcissus effect. The shortage is that yni is not referenced to the lens data and system data so it's not useful to guide narcissus optimization. A new paramter — optical defocusing is defined to quantify the defocusing of retro-reflected rays, the relation between optical focusing and lens surface radius, aperture, position of intermediate image, focal length of lens before the surface and field of view is presented. Optical methods to minimize narcissus effect is summerized. The narcissus of a long-wavelength cooling infrared system is analysed with optical defocusing and the narcissus induced equivalent tempareture difference (NITD) is calculated. The major NITD contributing surfaces is optimised after which the NITD of zooming group drops by 50%, and that of fixed lens by 75%. The results demonstrate that optical defocusing can guide narcissus optimization effectively.

Key words optical design; narcissus; optical defocusing; zooming; infrared system

OCIS codes 220.2740; 220.3620

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(3~5 μm)或长波段(8~12 μm), 系统元件在此波段也有一定辐射, 如果镜筒没有密封, 系统内部还会接收到外部环境的辐射, 这些辐射都属于杂散辐射^[2~4]。

由于冷光阑的限制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^[5]。虽然镜片反射率很低(1%), 到达探测器杂散辐射能量很小, 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, 冷反射引入等效温差(NITD)可能会大于系

收稿日期: 2011-09-13; **收到修改稿日期**: 2011-12-13

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@163.com

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, 严重影响光学系统成像质量。

几何光学的角度分析认为冷反射的成因在于探测器通过镜片反射对自身成像^[6-8], 反射光线在焦平面的聚焦程度决定冷反射的大小。由于普遍采用轴对称结构, 系统的冷反射主要集中在视场中心, 视场中心的 NITD 对于衡量整个系统的冷反射效应有特别重要的意义。在光学设计中减小冷反射也以降低视场中心的 NITD 为主要方法^[7]。文献[8]提出了衡量视场中心反射光线散焦程度的一阶参量 yni , 成为了冷反射分析中普遍使用的指标。其不足之处在于没有直接反映散焦程度与透镜参数和系统参数的关系, 对于冷反射优化作用不大, 文中针对这一情况提出了新的参数光学离焦量, 其与透镜参数和系统参数直接联系, 可以在冷反射优化时指导参数调整。

对于单视场或视场数较少的多视场系统, 校正可以基本消除冷反射的影响, 而对于视场数较多或连续变焦的光学系统, 由于变焦透镜组的冷反射随着变焦而变化, 校正难以实现^[9], 需在光学设计中尽量降低到系统 MRTD 以下。文中利用离焦量对变焦式系统进行分析和优化, 系统冷反射得到了有效的抑制。

2 理论分析

2.1 反射镜面的离焦量

由文献[10~14], 制冷红外光学系统第 j 面对视场中心引入的 NITD 大小为

$$\kappa_j = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [N(\lambda, T_H) - N(\lambda, T_D)] R_d(\lambda) d\lambda t_j^2}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial N(\lambda, T_B)}{\partial T} R_d(\lambda) d\lambda t_0} R_j \sigma_j, \quad (1)$$

式中 κ_j 为第 j 面引入的 NITD, λ_1, λ_2 定义系统工作波段, T_H 为镜筒内温度, T_D 为探测器工作温度, T_B 为背景温度, N 为黑体辐射强度, t_j 为从镜面 j 到探测器的平均透射率, t_0 为整个系统的光谱透射率,

R_d 为探测器光谱响应率, R_j 为镜面 j 的反射率, σ_j 为镜面 j 的冷返量, 定义为

$$\sigma_j = \frac{m}{M}, \quad (2)$$

式中 M 为从探测器中心通过冷光阑反向追迹的光线数量, m 为从镜面 j 反射回到探测器的光线数量。

由(1)式可以看出, 系统镜面 j 的冷反射大小与冷返量 σ_j 密切相关, σ_j 反映后向反射光线在探测器靶面上的聚焦程度, 当后向反射光线完全聚焦时, σ_j 的值最大为 1; 后向反射光散焦越大, σ_j 的值越接近于 0。在光学设计中, 使后向反射光线在探测器靶面上散焦是降低系统冷反射的主要途径。

如图 1 所示, 在光学系统中某个面 j 曲率半径为 R , 面 j 之前的光学系统对场景成像距该面长度 S , 像高为 H 。对中心视场边缘光线作逆光线追迹, 其反射光线与像面有一交点, 高度为 h 。显然, h 越大, 后向反射光线散焦越大。设中心视场光束在面 j 的入射高度为 y , 成像半孔径角为 θ , 反射角为 i 。根据正弦定理有

$$\frac{h}{\sin 2i} = \frac{y/\sin \theta}{\sin(\pi/2 - \theta + 2i)} = \frac{y/\sin \theta}{\cos(-\theta + 2i)}, \quad (3)$$

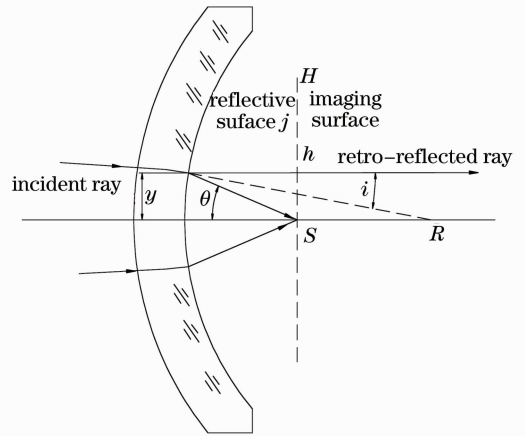


图 1 后向反射光线散焦示意图

Fig. 1 Defocusing of retro-reflected rays

则有

$$h = \frac{y \sin 2i}{\cos(-\theta + 2i) \sin \theta}, \quad (4)$$

由于 $\sin(i - \theta) = y/R, \tan \theta = -y/(S - R + \sqrt{R^2 - y^2})$, 解得

$$h = \left\{ 1 + \frac{(-R + S + \sqrt{R^2 - y^2})[-2R^3 + 2Ry^2 - 2Sy^2 + R^2(2S + \sqrt{R^2 - y^2})]}{-R^4 + R^3 \sqrt{R^2 - y^2} - 2Ry^2 \sqrt{R^2 - y^2} + 2Sy^2 \sqrt{R^2 - y^2} + R^2(y^2 - S \sqrt{R^2 - y^2})} \right\} y, \quad (5)$$

设 $\alpha = y/R, \beta = S/R$, 得到

$$h = y \left\{ 1 + \frac{[\sqrt{1-\alpha^2} - 2(-1+\alpha^2)(-1+\beta)](-1+\sqrt{1-\alpha^2}+\beta)}{-1+\alpha^2+\sqrt{1-\alpha^2}(-1+2\alpha^2)(-1+\beta)} \right\}, \quad (6)$$

定义面 j 的光学离焦量为

$$l = \frac{h}{H} = \frac{C(\alpha, \beta)y}{f \tan \gamma}, \quad (7)$$

式中

$$C(\alpha, \beta) = 1 + \frac{[\sqrt{1-\alpha^2} - 2(-1+\alpha^2)(-1+\beta)](-1+\sqrt{1-\alpha^2}+\beta)}{-1+\alpha^2+\sqrt{1-\alpha^2}(-1+2\alpha^2)(-1+\beta)}, \quad (8)$$

f 为面 j 之前透镜组的焦距, γ 为系统的半视场角。由几何限制有 $\alpha \in (0, 1), \beta \in [-\infty, \infty], l \in [-\infty, +\infty]$ 。 l 反映了经面 j 反射后光线在探测器靶面上的离焦程度, l 的幅度越大, 则后向反射光线离焦程度越大, 冷反射越小; l 越接近于 0, 则说明反射光线聚焦越强, 冷反射越大。

2.2 光学离焦量与 yni 的关系

传统衡量冷反射大小的一阶参量为 yni , 其中 n 为反射面处的折射率, y 为逆向追迹中心视场边缘光线在反射面的入射高度, i 为反射角。对系统采取傍轴近似, 由(4)式得到

$$h = \frac{y \sin 2i}{\cos(-\theta + 2i) \sin \theta} \approx 2yi/\theta. \quad (9)$$

设后向反射光斑在探测器靶面的高度为 h' , 中心视场边缘光线在焦平面入射角为 θ' , 在面 j 后的像面和探测器靶面求光学不变量得到 $hn\theta = h'\theta'$, 则有

$$l = \frac{h}{H} = \frac{h'}{H'} = \frac{2yni/\theta'}{H'} \approx \frac{4Fyni}{H'}, \quad (10)$$

式中 F 为光学系统的 F 数, H' 是探测靶面高度。(10)式说明 yni 是离焦量 l 的傍轴近似。 l 更直观地反映了光学设计几何参数与系统冷反射的关系。

2.3 增大离焦量的方法

由 2.1 节的推导有, $l = C(\alpha, \beta)y/H$, 图 2 为 C 的分布图。注意到当 β 一定时, C 幅度随着 α 增大而迅速增大, 这说明增大镜片的通光孔径与曲率半径之比可以增加后向反射光的散焦程度。当 α 一定时, β 与 1 相差越大, C 的幅度越大, 当 β 值为 1 时, C 和 l 恒为 0, 这说明当镜面的曲率中心与其后的轴上像点重合时, 中心视场后向反射光线完全聚焦, 此时视场中心冷反射最强, 而像面离反射面曲率中心越远, 则后向反射光线散焦越大。由(7)式和图 2 总结出增大离焦量的方法有:

- 1) 增大透镜的通光孔径;
- 2) 减小镜片的曲率半径;

3) 增大镜面之后的像面与镜面的曲率中心的距离;

4) 降低系统中间像面的高度 H , 一般系统的视场角 γ 为固定的设计参数, 这意味着减小反射面之前透镜组焦距 f 。

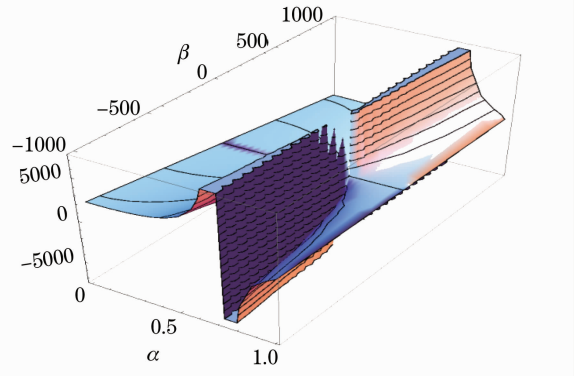


图 2 $C(\alpha, \beta)$ 的三维曲线图

Fig. 2 3-Dimension distribution of $C(\alpha, \beta)$

3 系统分析和优化

3.1 实例分析

图 3 为一个制冷型长波变焦式红外系统, 工作波段为 $7 \sim 11 \mu\text{m}$, 前端为一个前置望远系统, 后端为一个再成像系统, 系统变焦在前置望远系统物镜中实现。前置望远物镜中镜片 1~3 的冷反射大小随着变焦而变化, 镜片 4~11 为固定透镜组, 其冷反射不随变焦而变化。望远系统和再成像系统的具体参数如表 1 所示。

设场景温度和系统温度为 300 K, 镜面反射率为 1%, 探测器平均响应率 90%, 根据(1)式和(7)式计算出系统变焦部分和固定透镜组各反射面在视场中心的离焦量 l 和 NITD 如表 2 和表 3 所示。计算结果表明系统变焦部分 NITD 从大视场到小视场为 $0.683 \sim 0.057$ K, 固定透镜组为 3.313 K, 系统的冷反射主要集中在镜面 2、3 及 13、14、16~18 处。

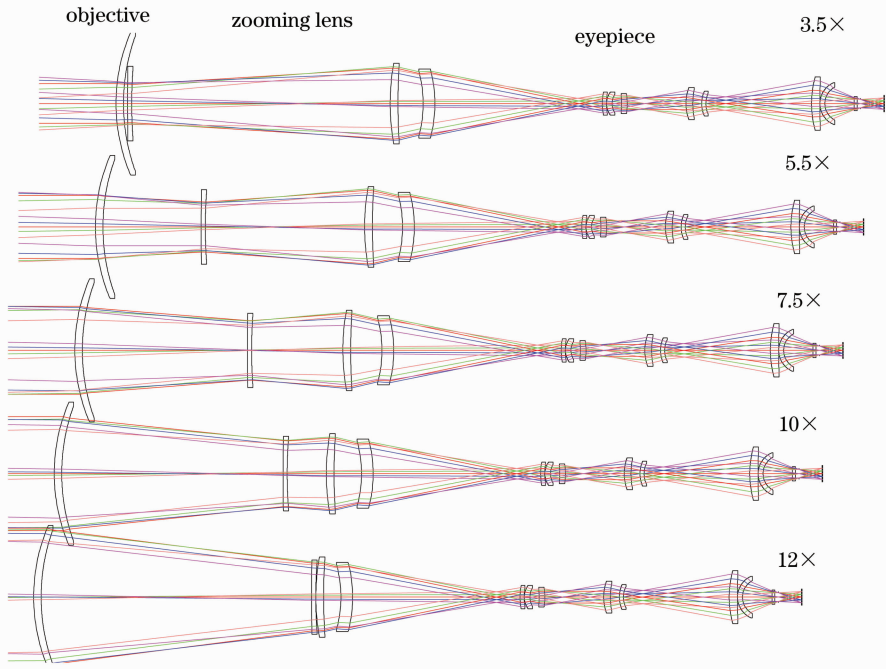


图 3 变焦式制冷型长波红外光学系统

Fig. 3 Long-wavelength cooling infrared zooming optical system

表 1 系统参数

Table 1 First-order parameters of system

Afocal telescope	Maximum entrance pupil diameter	130 mm
	Minimum entrance pupil diameter	37 mm
	Exit pupil diameter	10.8 mm
	Maximum field of view (FOV)	$4.3^\circ \times 5.4^\circ$
	Minimum FOV	$1.25^\circ \times 1.56^\circ$
	Length	435 mm
Reimaging system	Entrance pupil diameter	10.8 mm
	F	2.75
	FOV	$14.9^\circ \times 18.7^\circ$
	Detector size	7.68 mm \times 9.6 mm
	Length	200 mm

表 2 变焦部分各镜面的 l 和 κ_j

Table 2 l and κ_j of zooming lens surfaces

	l					κ_j / K				
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
S1	-7.92	-19.94	-39.67	-67.70	-99.38	0.058	0.009	0.002	0.001	0
S2	-2.26	-5.73	-11.55	-20.10	-30.22	0.194	0.031	0.008	0.003	0.002
S3	0.03	0.12	0.44	0.92	1.45	0.347	0.198	0.068	0.031	0.021
S4	1.99	3.25	4.39	5.02	4.70	0.071	0.028	0.016	0.014	0.018
S5	-21.71	-23.43	-23.61	-22.14	-19.22	0.005	0.004	0.004	0.005	0.007
S6	2.82	2.82	2.80	2.79	2.83	0.008	0.008	0.008	0.008	0.009
						0.683	0.278	0.106	0.062	0.057

表 3 固定部分各镜面的 l 和 κ_j
Table 3 l and κ_j of fixed lens surfaces

	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16
l	-26.13	17.29	2.62	-1.33	6.19	-2.35	0.22	1.75	3.01	-0.18
κ_j/K	0.002	0.002	0.137	0.138	0.047	0.107	0.62	0.274	0.073	0.588
	S17	S18	S19	S20	S21	S22				
l	1.05	0.22	-8.54	1.33	-25.89	-10.51				
κ_j/K	0.619	0.619	0.019	0.038	0.012	0.018	3.313			

3.2 系统优化

结合 3.1 节的分析,对冷反射贡献大的面进行参数调整,以镜面 S3 为例进行说明。表 4 为 S3 的参数,其冷反射较大的原因为:曲率半径很大,造成 α 偏小;曲率中心和像面距离较近使 β 值接近于 1;中间像面较高。针对以上因素对 S3 及其之前的透镜组参数进行了调整,调整之后的参数如表 5 所示,计算结果表明镜面 S3 的 NITD 降低了 60% 左右。

表 4 调整之前镜面 S3 的参数

Table 4 Parameters of S3 before optimization

	S3(Z1~Z5)
R/mm	2145.34
α	0.0076~0.014
β	0.52~0.32
$C(\alpha,\beta)$	0.037~0.36
y/mm	16.34~28.89
H/mm	20.07~7.06
l	0.033~1.45
κ_j/K	0.35~0.021

表 5 调整之后镜面 S3 的参数

Table 5 Parameters of S3 after optimization

	S3(Z1~Z5)
R/mm	-462.19
α	0.038~0.097
β	1.90~2.32
$C(\alpha,\beta)$	2.79~3.67
y/mm	17.56~44.81
H/mm	8.78~4.34
l	5.59~37.88
κ_j/K	0.14~0.0030

对系统中冷反射较大的镜面进行类似的优化,优化后系统如图 4 所示,各反射面在视场中心离焦量 l 和 NITD 如表 6 和表 7 所示。计算结果表明系统变焦部分 NITD 从大视场到小视场为 0.300~0.008 K,下降了 56%,固定透镜组为 1.164 K,下降了 75%。优化前后系统的调制传递函数(MTF)曲线如图 5 和图 6 所示,系统成像质量在大视场稍有下降,而在小视场有所提高。

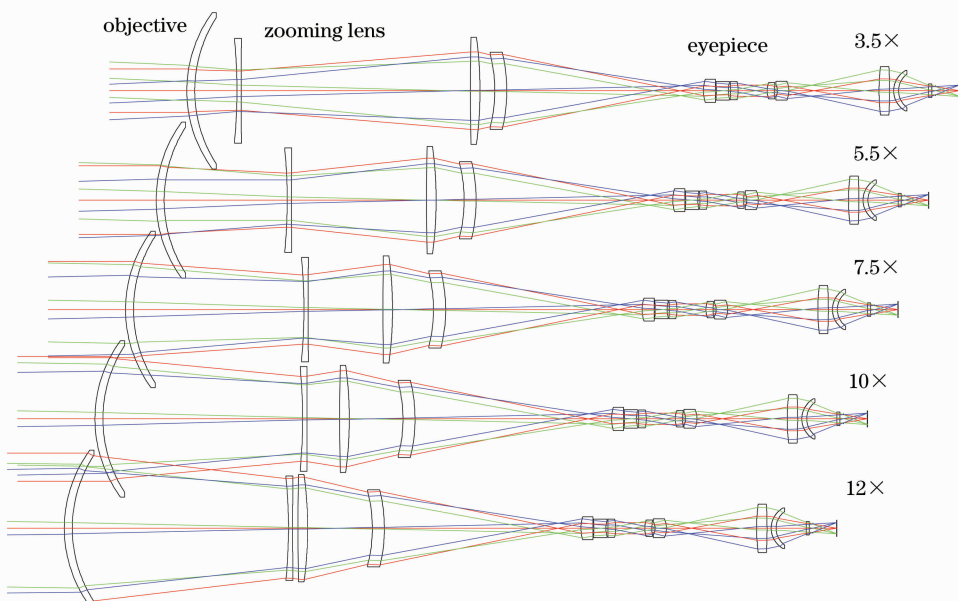


图 4 冷反射优化后的变焦式制冷型长波红外光学系统

Fig. 4 Long-wavelength cooling IR zooming optical system after narcissus optimization

表 6 优化后变焦部分各镜面的 l 和 κ_j

Table 6 l and κ_j of zooming lens surfaces after optimization

	l					κ_j / K				
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
S1	-23.92	-60.12	-120.93	-210.73	-128.04	0.002	0.003	0.001	0	0
S2	-7.84	-20.38	-43.60	-84.52	-125.40	0.039	0.006	0.001	0.001	0
S3	5.59	10.83	18.11	27.49	21.63	0.139	0.03	0.01	0.004	0.003
S4	-2.40	-4.28	-6.75	-9.71	-354.17	0.083	0.023	0.01	0.005	0.002
S5	-7.53	-9.79	-12.30	-14.96	-54.63	0.017	0.008	0.005	0.003	0.003
S6	22.37	25.07	28.11	31.51	102.05	0.002	0.001	0.001	0.001	0
						0.3	0.071	0.028	0.014	0.008

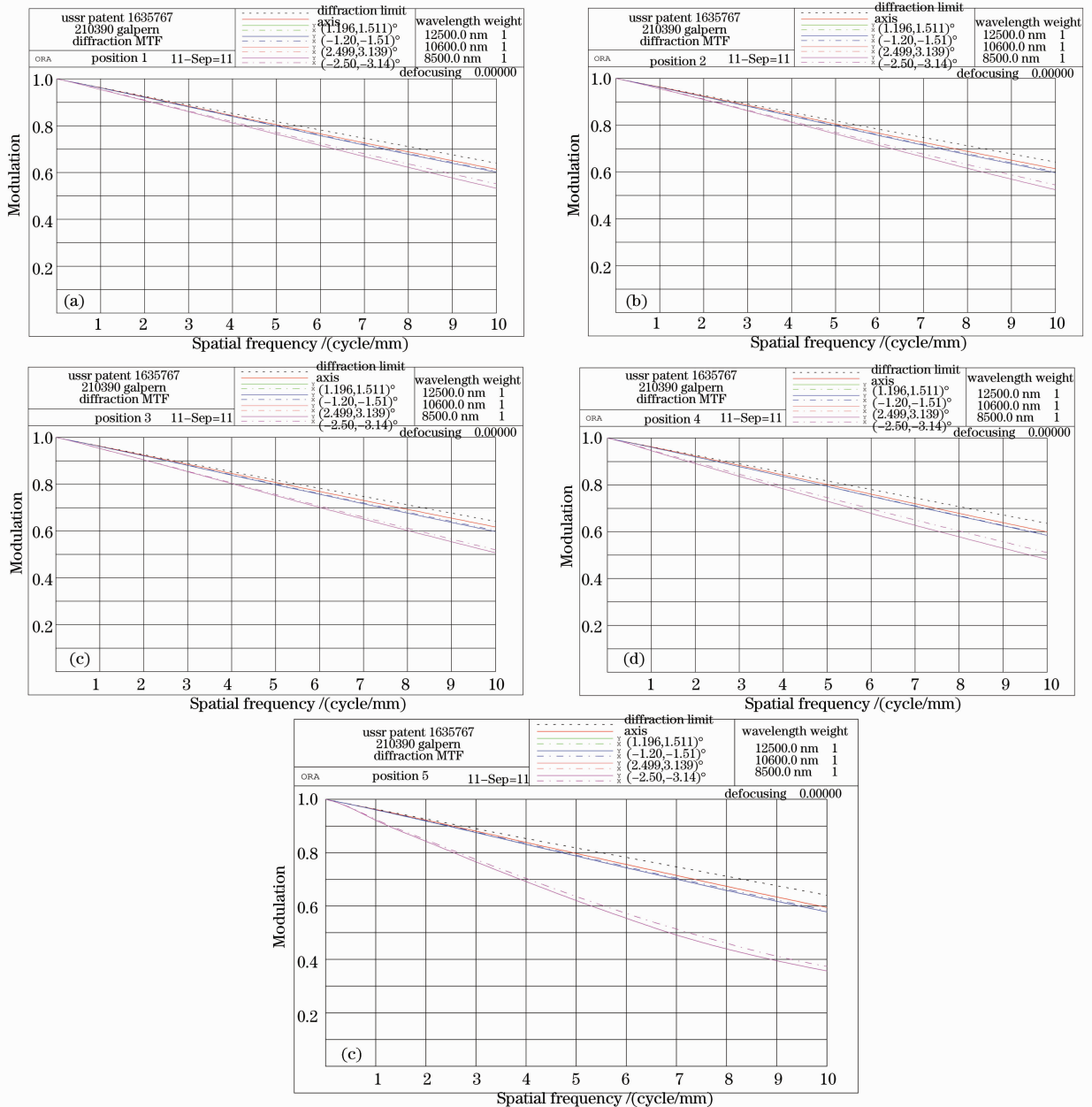


图 5 冷反射优化前系统的 MTF 曲线

Fig. 5 MTF curves of the system before narcissus optimization

表 7 优化后固定部分各镜面的 l 和 κ_j

Table 7 l and κ_j of fixed lens surfaces after optimization

	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16
l	54.68	36.72	-5.83	1.01	2.81	-3.95	-1.52	2.81	-8.74	1.34
κ_j/K	0.001	0.001	0.089	0.158	0.125	0.06	0.089	0.176	0.093	0.122
	S17	S18	S19	S20	S21	S22				
l	8.06	4.26	-14.09	2.19	-40.02	-12.87				
κ_j/K	0.046	0.08	0.026	0.059	0.01	0.029	1.164			

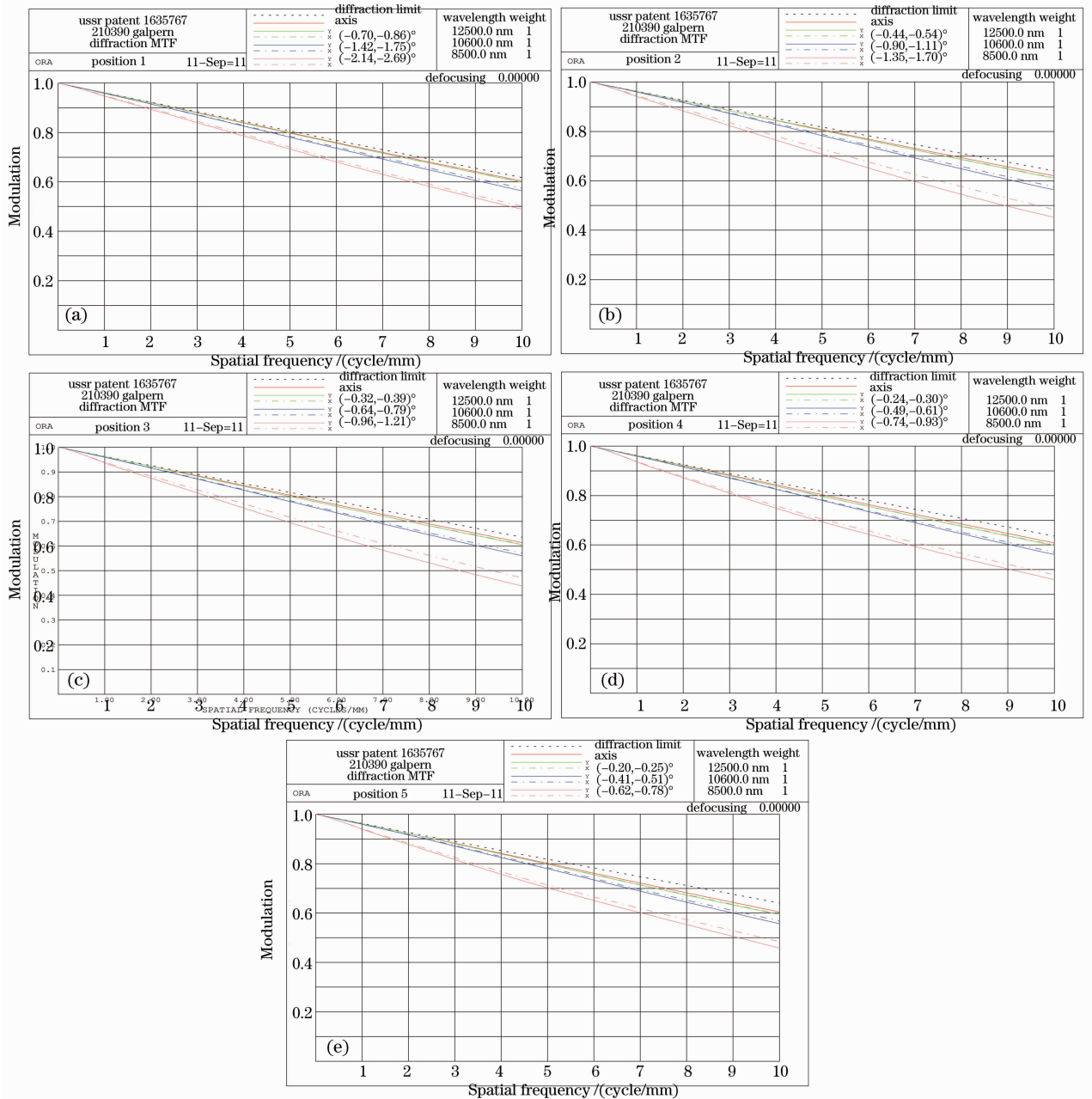


图 6 冷反射优化后系统的 MTF 曲线

Fig. 6 MTF curves of the system after narcissus optimization

4 结 论

减小制冷型红外光学系统冷反射的主要方法在

于使后向反射光线在探测器靶面散焦,文中定义了镜面的光学离焦量 l 对散焦程度进行量化,通过理

论分析得出了 l 与镜面曲率半径、通光孔径、其后成像面位置、其前透镜组焦距和系统视场角等设计参数的关系式。对比分析发现离焦量 l 为传统一阶参量 yni 的非近轴表示,更直观地反映了冷反射与透镜参数及系统参数的关系。

利用离焦量 l 对一个制冷型长波变焦式红外光学系统进行了冷反射分析,并计算了各反射面的 NITD,在此基础上对系统冷反射进行了针对性的优化。优化后系统变焦透镜组的冷反射减小了 50%,而固定透镜组的冷反射下降了 75%左右,结果表明离焦量对于系统冷反射的优化具有明显的指导作用。

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 Liu 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 He Fengyun, Cui Jicheng, Feng Shulong *et al.*. Narcissus analysis for cooled staring IR system [C]. *SPIE*, 2007, **6722**: 67224N
- 6 Zhang Liang. Narcissus in staring infrared optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(s2): 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**(s2): 8~11
- 7 Optical Research Associates. Code V User Manual [M]. Pasadena: Optical Research Associates, 2004
- 8 James W. Howard, Irving R. Abel. Narcissus: reflections on retroreflections in thermal imaging systems [J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(18): 3393~3397
- 9 Akram Muhammad Nadeem. Design of a multiple-field-of-view optical system for 3 to 5-mm infrared focal-plane arrays [J]. *Opt. Engng.*, 2003, **42**(6): 1704~1714
- 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 Lawrence M. Scherr, Harold J. Orlando, James T. Hall *et al.*. Narcissus considerations in optical designs for infrared staring arrays [C]. *SPIE*, **2846**: 442~452
- 12 J. L. Rayces, L. Lebach. Exact ray-tracing computation of narcissus equivalent temperature difference in scanning thermal imagers [C]. *SPIE*, 1992, **1752**: 325~332
- 13 Robert. Siegel, John. R. Howell. Thermal Radiation Heat transfer [M]. Washington D. C.: Hemisphere Publishing Corporation, 1969. 412~484
- 14 Warren. J. Smith. Modern Optical Engineering [M]. New York: MacGraw-Hill Companies, 2000. 219~234

栏目编辑: 谢 婧