

大相对孔径制冷型红外相机镜头的光学设计

张华卫, 张金旺, 刘秀军, 刘 波

(四川长虹电子科技有限公司, 四川 绵阳 621000)

摘要: 介绍了一种大相对孔径红外成像镜头的设计。该镜头针对制冷型红外探测器, 采用二次成像设计, 保证 100%冷光阑效率。在 $8\sim 10\mu\text{m}$ 波段, 实现相对孔径 (F 数) 为 1.5、视场角 2ω 为 18.6° 的设计, 其成像质量优良, 传函接近衍射极限, 在常规加工装调公差下易于保证应用质量。

关键词: 大相对孔径; 光学镜头; 制冷型红外相机; 二次成像

中图分类号: TN21, V445.8

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2015)02-0124-06

Design of Low F-Number Lens for Cooled Infrared Camera

ZHANG Hua-wei, ZHANG Jin-wang, LIU Xiu-jun, LIU Bo

(Sichuan Changhong Electronic Technology Co.ltd, Mianyang 621000, China)

Abstract: A low F number lens for infrared camera is introduced. Re-imaging method is used to ensure 100% cold shield efficiency in this lens for cooled IR camera. The lens is designed with F number 1.5 and full field angle 18.6° in $8\sim 10\mu\text{m}$ waveband. Its imaging quality is nearly up to diffraction limitation and can be guaranteed with general manufacture and assembly technics.

Key words: low F-number, lens, cooled IR camera, re-imaging

0 引言

红外成像探测相比无线电探测的最大优点是不主动发射电磁波, 因此具有极强抗干扰能力和隐蔽性, 在军事领域得到广泛应用。红外成像探测系统的核心部件是红外探测器, 根据其光敏面的工作温度, 分为制冷型和非制冷型两种。通常制冷型红外探测器工作在 77K 的低温环境中^[1], 相比于非制冷型红外探测器, 制冷型探测器的信噪比要比非制冷型探测器高出 $1\sim 2$ 个数量级^[2], 能够分辨更细微的温度差别, 探测距离较远, 主要应用于高端军事用途^[3], 例如机载、舰载红外探测告警设备等。

相对孔径又称为光圈, 是光学系统 (或镜头) 入瞳口径与焦距的比值, 其倒数称为 F 数。对一个光学系统来说, 在焦距一定的条件下口径越大 (即 F 数越小) 则接收的能量越多, 对于弱小目标的探测概率就越高。大相对孔径光学系统的设计一直是光学领域的难题, 随着红外光学的发展, 研究大相对孔径制冷型红外相机镜头的设计成为红外成像探测领域的热点需求之一^[4-5]。

1 结构选型

为了使系统能达到最大灵敏度, 需要对探测器进行低温制冷, 而为了保持这种深冷温度, 探测器都安装在“杜瓦瓶”组件中^[6]。杜瓦瓶中设置有冷光阑, 其作用是限制孔径外的非期望光线对成像画面的干扰, 更进一步保证红外探测器的灵敏度。以探测器冷光阑为光学系统的出瞳, 即可以实现 100% 的冷光阑效率。实现 100%冷光阑效率的光学系统结构形式有 2 种: 二次成像和一次成像, 见图 1。

采用二次成像形式, 便于与制冷型红外焦平面探测器匹配, 确保冷屏效率达到 100%, 并能够有效压缩系统口径^[7], 采用二次成像结构形式, 在一次像面处加入视场光阑, 可以有效地提高光学系统杂散辐射抑制能力^[8], 另外, 在需要扫描镜的成像系统中便于在镜头前端实入瞳处安置扫描镜, 也可以在入瞳处与前置望远镜对接实现带望远镜的光学系统 100%冷光阑效率。一次成像法直接以探测器冷光阑作为系统的孔径光阑, 因此入瞳在探测器光敏面之后, 同时会导致光学系统的尺寸明显加大。本设计选用二次成像结构。

收稿日期: 2014-02-27; 修订日期: 2014-10-14.

作者简介: 张华卫 (1981-), 男, 工程师, 主要从事红外光电系统光学设计和装调工作。

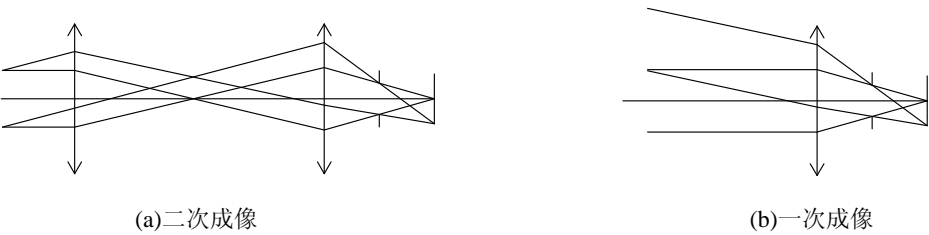


图 1 二次成像与一次成像 Fig.1 Re-imaging and once-imaging

2 设计过程

本文设计的是单位自研长波红外相机的光学镜头，该相机选用一款制冷型面阵探测器，对镜头的要求和探测器的性能参数分别见表 1 和表 2。

根据分辨率和像元间距计算出光学镜头焦距为 60 mm，在制冷型红外相机中 F 数为 1.5 的镜头属于大相对孔径光学镜头；特征频率为 20.8 lp/mm，为计算及表述方便取 20 lp/mm。

因选用二次成像结构，光学镜头分为前组和后组，前组进行一次成像，后组将前组所成的像再次成像在探测器光敏面上。根据像差与放大倍率的关系，倍率越小则像差越小，同时要控制镜头长度（即前组焦距不能太大），根据经验初步将倍率取为 0.6，即前组焦距为 100 mm，后组对其进行 0.6 倍的缩放。

为校正色差，采用高折射率低色散的 Ge 和中折射率高色散的 ZnSe 两种材料组合，Ge 的主要功能是产生光焦度，ZnSe 负责校正 Ge 产生的单色像差和色差。将系统参数、材料参数以及初始结构参数代入下列初级像差公式，根据像差要求进行求解，并反复迭代直到求得最佳解^[9]：

$$S_1 = \sum hP \tag{1}$$

$$S_2 = \sum h_z P - J \sum W \tag{2}$$

$$S_3 = \sum \frac{h_z^2}{h} P - 2J \sum \frac{h_z}{h} W + J^2 \sum \varphi \tag{3}$$

$$S_4 = J^2 \sum \mu \varphi \tag{4}$$

$$S_5 = \sum \frac{h_z^3}{h^2} P - 3J \sum \frac{h_z^2}{h^2} W + J^2 \sum \frac{h_z}{h} \varphi (3 + \mu) \tag{5}$$

式中： S_1 为球差； S_2 为彗差； S_3 为像散； S_4 为场曲； S_5 为畸变； h 和 h_z 为边缘光线和主光线在镜面上的入射高度； P 和 W 为镜面的单色像差参数； J 为拉格朗日不变量； φ 为光焦度； μ 为折射率的倒数。

根据上述过程求得的最佳解仍不够理想，因孔径较大所以 S_1 值较大。将计算出的结构参数代入 Zemax 软件中进行优化，优化结束后在分析菜单中查看赛德尔系数，见表 3，发现 S_1 （初级球差）总值达 0.46 mm，其中透镜 4 的前表面贡献最大， S_1 达到 0.87 mm，其次为透镜 1 的后表面， S_1 为 -0.37 mm。若以球差为重点进行优化，则彗差和像散又会增大。由此可见，较少的球面镜难以完全校正球差等像差，如果增加镜片数量，又会降低系统透过率，影响红外相机的探测灵敏度，因此需引入非球面对大相对孔径光学系统进一步像差校正。

随着金刚石单点车床的普及，非球面的加工价格下降，同时非球面可变参数多，自由灵活的组合对于校正大孔径大视场的高级像差较为有利，因而其在光学设计中应用越来越广泛。一般采用偶次非球面，其在 Zemax 中表达式如下：

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{(1 + k)c^2 r^2}} + \alpha_1 r^2 + \alpha_2 r^4 + \dots + \alpha_8 r^{16} \tag{6}$$

式中： z 和 r 分别为镜面轴向坐标和径向坐标； k 为二次曲面系数； c 为镜面顶点的曲率； α_i 为高次非球面系数。当 α_i 均为 0 时，是二次曲面；当 α_i 不为 0 时，为偶次非球面。

在软件中将透镜 1 后表面和透镜 4 前表面的类型更改为偶次非球面，并将 k 设为 0，将 $\alpha_1 \sim \alpha_4$ 设为变量进行优化。经多次优化及调整，仅在

表 1 对光学镜头的要求 Table 1 Requirement for lens

波长	口径	分辨率	视场角	MTF	入瞳距	总长
8~10 μm	40 mm	0.4 mrad	2ω≥18.6°	≥0.45（特征频率处）	≥60 mm	≤400 mm

表 2 探测器性能参数 Table 2 Parameters of detector

响应波长	像元间距	阵列规模	像面尺寸	F/#	NETD	像面工作温度
8~10 μm	24 μm	640×512	15.36 mm×12.29 mm	1.5	17 mK	90 K 以下

表 3 各表面赛德尔系数 Table 3 Seidel coefficients of surfaces

序号	SPHA S_1	COMA S_2	ASTI S_3	FCUR S_4	DIST S_5	CLA(CL)	CTR(CT)
1	0.017813	-0.024238	0.032981	0.051085	-0.114389	-0.002439	0.003318
2	-0.372927	0.141930	0.024108	-0.031099	-0.004020	-0.001832	-0.001053
3	-0.085092	0.117573	-0.162453	-0.214776	0.521223	0.006097	-0.008424
4	0.029436	-0.156262	0.107533	0.159307	-0.510010	-0.003990	0.007627
5	0.116213	0.471815	0.272735	0.045313	0.183849	-0.058392	-0.033754
6	-0.135359	-0.026994	-0.02148	-0.055617	-0.086681	0.070820	0.042605
7	0.874673	0.324417	0.034046	0.066648	-0.069937	-0.008830	-0.005203
8	0.308417	0.429899	0.599231	-0.031449	0.491426	-0.003508	-0.004890
9	-0.282950	-0.337305	-0.402102	0.000000	-0.479346	0.002122	0.002530
10	0.278783	0.332338	0.396180	0.000000	0.472287	-0.002091	-0.002493
11	-0.253053	-0.301665	-0.359616	0.000000	-0.428698	0.000781	0.000930
12	0.251952	0.300353	0.358051	0.000000	0.426833	-0.000777	-0.000926
STO	-0.219662	-0.261859	-0.312163	0.000000	-0.372130	0.013970	0.016654
14	0.219662	0.261859	0.312163	0.000000	0.372130	-0.013970	-0.016654
15	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
IMA	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
TOT	0.464760	0.322860	0.313548	-0.010588	0.402538	-0.002040	0.000267

注：序号 1~8 是透镜 1~透镜 4 的 8 个表面，序号 9~IMA 是探测器的窗口、冷光阑、焦平面等的表面。

透镜 4 的前表面应用偶次非球面，实现本文设计的镜头，其球差、彗差、像散、场曲、畸变等均得到较好控制。

3 设计结果及分析

3.1 设计结果

最终使用 4 块透镜，设计出焦距为 60.0 mm、视场角 $14.6^{\circ} \times 11.7^{\circ}$ (2ω 为 18.6°)、入瞳距 72 mm、总长 372.7 mm 的红外相机光学镜头，二维图见图 2。

由图 3~图 7 可以看出该镜头各项指标均较为优良：光学系统传函接近衍射极限，在 20 lp/mm 处各视场传函值大于 0.49 (中心视场为 0.58)；弥散斑

尺寸均小于艾利斑直径，rms 半径最大仅 12 μm ；场曲小于 0.2 mm，畸变小于 2%；在 24 μm 半径范围内能量集中度达到 84% 以上。

3.2 公差分析

以加工误差、装配误差和校准误差为表现形式的制造误差极其重要，是光学系统总性能水平的主要影响因素，尽管理论设计结果很好，制造误差也是决定系统总性能水平的关键^[7]，因此必须对设计结果进行公差分析，以确保其可加工性和经济性。

设计完成后在软件中采用 Sensitivity 方式，对中心视场 20 lp/mm 的衍射传函 (MTF) 平均值按表 4 所给的约束条件进行公差分析。

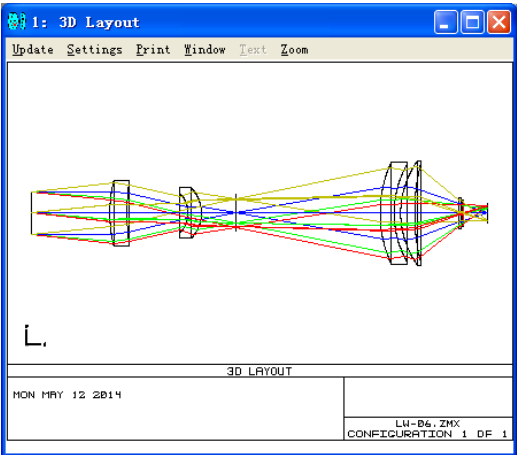


图 2 光学系统二维图
Fig.2 2D layout

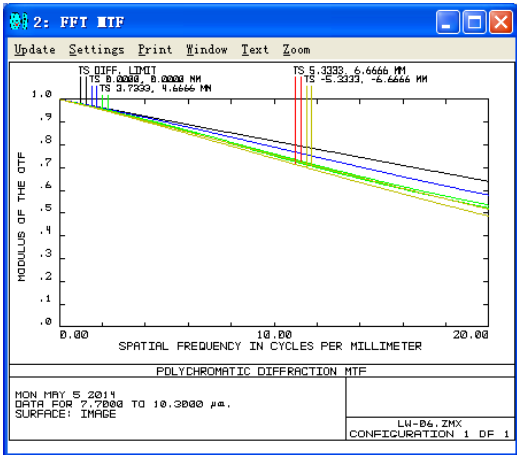


图 3 光学系统传函
Fig.3 FFT MTF

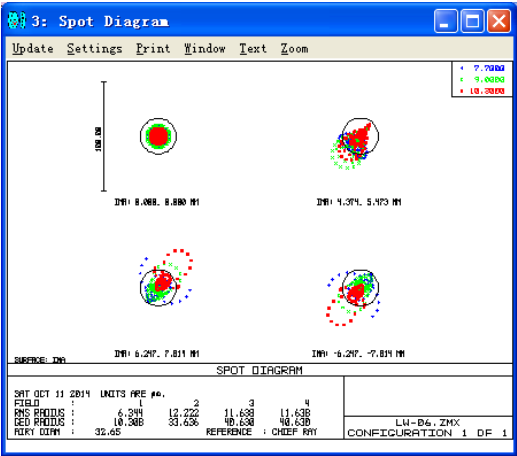


图4 光学系统点列图
Fig.4 Spot diagram

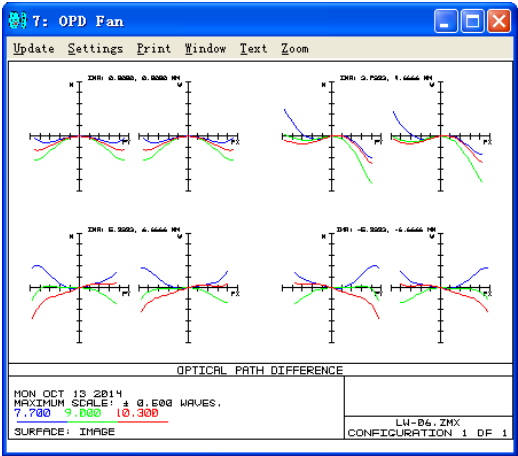


图5 光程差曲线
Fig.5 OPD fan

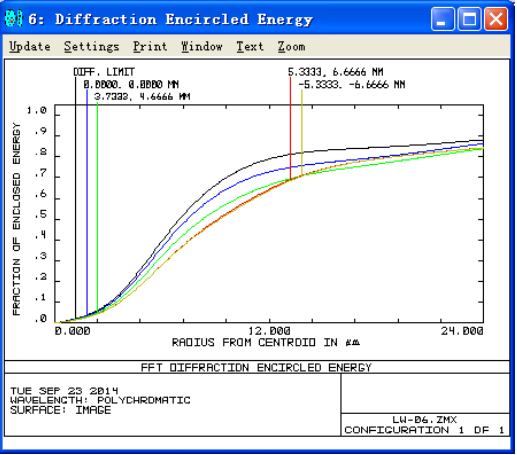


图6 光学系统能量包围图
Fig.6 Diffraction encircled energy

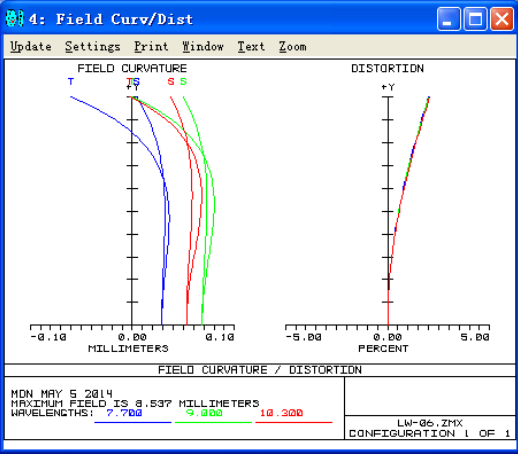


图7 光学系统场曲与畸变
Fig.7 Field curve/Dist

表4 公差约束条件

Table 4 Tolerance data

光圈	局部光圈	折射率	阿贝数	厚度/距离	面偏心	零件偏心	面倾斜	零件倾斜
3	1	0.001	1%	0.03 mm	0.02 mm	0.03 mm	2'	3'

第一次分析结束后,评估传函值下降到0.37,对传函下降贡献最大的分别是TETX 9和TSTX 10,即透镜4的装调倾斜和透镜4前表面的加工倾斜。询问加工厂家并结合本单位装调经验,将上述值分别收紧为2'、1'。进行第二次公差分析,评估传函值为0.44,蒙特卡洛分析90%以上概率的传函值是0.45,满足系统对像质的要求。

3.3 冷反射分析

红外摄像机的探测器焦平面被镜头的某一表面反射,且反射光线成像在探测器焦平面附近,此时焦平面会探测到相对环境温度低许多的自身冷信号,也就是说,探测器除了接收到正常成像的景物辐射外,还通过红外光学系统中折射面的微弱反射,接收到本身及周围低温腔冷环境的影像,形成冷像(Narcissus)。冷像的辐射强度随视场大小变化,成为不可滤掉的交流噪声信号叠加在景物信号上,在

热图像的视场中心形成黑斑^[10]。当目标信号落在黑斑区域时,能量会被黑斑淹没。这种由于重复反射而引起的成像缺陷,称之为冷反射。

当光线在某个面按原路返回,由光路可逆原理,必会聚在焦平面。因此,该面所产生的冷反射最大。2种典型的情况是:中间像面聚焦在某表面的顶点和中间像面聚焦在某表面的球心处(或者平行光线垂直于该表面)。本文设计的镜头是二次成像镜头,存在中间像面,因此为减小冷反射采取的措施之一就是控制中间像面附近的表面与其保持一定的轴向距离,其二是控制中间像面的位置远离其附近的表面的曲率中心。

通常用YNI值综合反映冷像的大小,从而在软件里通过控制它来控制冷像的大小:

$$YNI_j = y_j n_j i_j \tag{7}$$

式中:YNI_j是第j面的YNI值;y_j是近轴光线在第

j 面的入射高度; n_j 为第 j 面折射率; i_j 为边缘入射光线在第 j 面的入射角度。它主要反映的是中心视场的冷像的强度,一般要求 YNI 值大于或接近 1^[10]。从上面的定义可以得知,上述两种典型的情况的 YNI 值为 0,即冷反射最强。

在红外扫描系统中,还用 I/I bar 值来表示冷反射。本文设计的是面视场凝视型红外相机,因此仅在 Zemax 软件中进行 YNI 值分析,结果见表 5。

表 5 中表面 1 为入瞳,表面 6 为中间像面处设置的虚面,不会对光线有实际反射。表面 5 即透镜 2 的后表面的 YNI 值最小,但也远大于 1,这是因为在设计过程中控制此面与中间像面保持足够的距离,达 32 mm,从而提高 YNI 值,减小冷反射。

通常可以采用经验公式粗略估算某个特定表面的冷反射贡献,即^[11]:

$$\Delta T_N = (\Delta T_{SD} \cdot R) / (S_N / S_I)^2 \tag{8}$$

式中: ΔT_N 为由冷反射引起的图像中的表观温度变化; ΔT_{SD} 为景像与探测器之间的温差; R 为该表面的反射率; S_N / S_I 为冷反射像点直径 S_N 与正常像点直径 S_I 的比值。

经过分析,表面 5 的中心视场冷反射像斑直径为 1.61 mm,镜头艾利斑直径为 32.9 μm (几何像斑直径约 20 μm , 小于艾利斑直径),则 $S_N / S_I = 48.8$; 假定目标温度 300 K,探测器靶面温度为 90 K,则 $\Delta T_{SD} = 210 \text{ K}$; $R = 0.015$,计算可得 $\Delta T_N = 0.001 \text{ K}$,远小于探测器的 NETD (0.017 K),因此该镜头不会引起明显的冷反射。

3.4 热分析

无热化方法分为主动式和被动式^[12],本文采用主动式消热差,即移动某块或某组镜片来补偿像面离焦。

该红外相机要求的工作温度为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +60\text{ }^{\circ}\text{C}$,在此温度范围内对该镜头进行了热分析。

在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时和 $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时若不进行调焦,则像面离焦量分别达 1.41 mm 和 0.79 mm,MTF 均下降严重,见图 8 和图 9。因此必须进行主动调焦。

经分析,将第一块透镜作为调焦镜片比较合理,调焦行程为 5.74 mm。 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时调焦行程为 -3.32 mm , $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时为 $+2.42 \text{ mm}$ (负号表示调焦镜片向前移动,正号表示向后)。调焦后的传函见图 10 和图 11,边缘视场的传函有所下降。

4 结论

采用二次成像设计有利于实现 100% 冷光阑效率并减小透镜口径,Ge 和 ZnSe 的材料组合可以较好的消除长波段色差,按经验分配各部分光焦度并利用 P-W 法进行求解,能够得出基本满足要求的初始结构。为均衡校正初级像差及高级像差在 Zemax 软件中引入 1 面偶次非球面,最终设计出满足制冷型红外相机使用的大相对孔径光学镜头。冷反射分析表明该镜头不会产生较强的冷反射;对镜头进行了热分析,计算了其工作温度范围内的调焦行程;公差分析结果表明,在常规加工和装调工艺下,能够实现并保证该红外相机光学镜头的工作性能。

表 5 冷反射分析各表面 YNI 值 Table 5 YNI of surfaces

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.000	3.292	-2.464	-2.234	-1.875	-0.007	8.893	11.06	12.29	-4.713	-2.708	-2.668

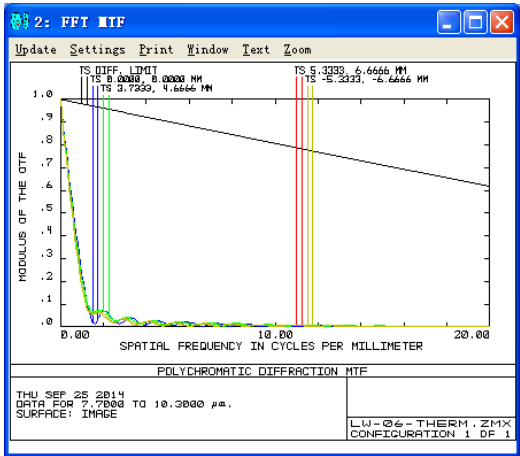


图 8 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 未调焦传函
Fig.8 MTF at $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

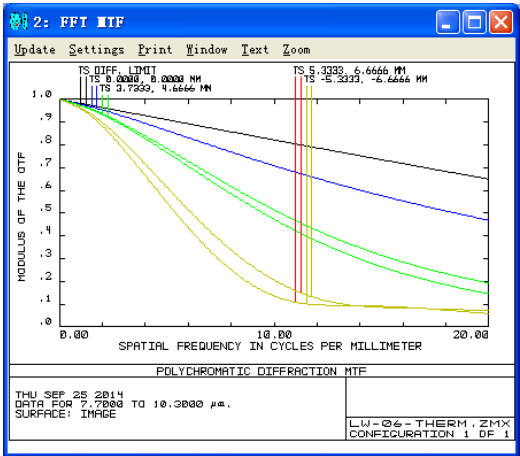


图 9 $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 未调焦传函
Fig.9 MTF at $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$

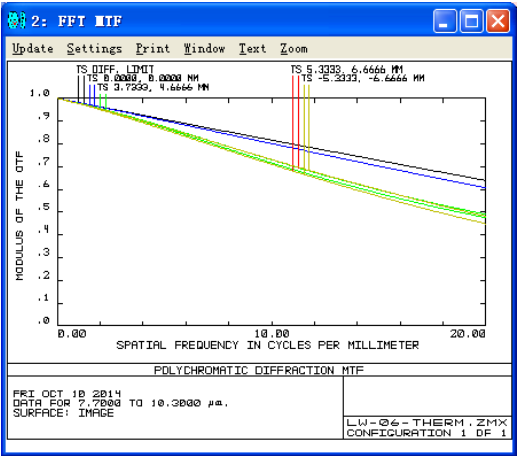


图 10 -40℃调焦后传函

Fig.10 MTF re-focused at -40℃

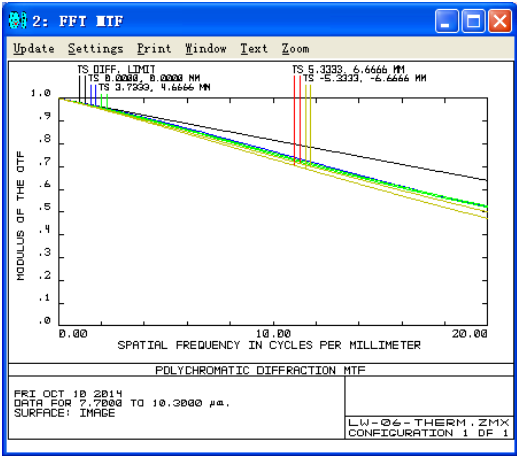


图 11 +60℃调焦后传函

Fig.11 MTF re-focused at +60℃

参考文献:

[1] 张鹏, 罗长江, 熊钟秀, 等. 制冷型红外光学系统冷反射的逆光路分析[J]. 电光与控制, 2013, 20(6): 66-69.

[2] 王海涛, 耿安兵. 一体化红外双波段成像光学系统[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(3): 489-492.

[3] 唐树岚. 非制冷红外探测器产业现状及发展策略分析[J]. 现代商业, 2011, 30: 164-166.

[4] 范哲源, 杨洪涛, 屈恩世, 等. 大视场大相对孔径长波红外扫描光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10): 2740-2744.

[5] 项建胜, 潘国庆. 一种紧凑型大相对孔径红外光学系统的设计[J]. 红外技术, 2008, 30(4): 208-209, 224.

[6] Fisher R E. 红外系统的光学设计. 汪世祯译. 云光技术[J]. 2000, 32(6): 6-25.

[7] 贾星蕊, 李训牛, 曹易辉, 等. 红外双色三视场光学系统设计. 红外技术, 2014, 36(7): 549-555.

[8] 曲贺盟, 张新. 高速切换紧凑型双视场无热化红外光学系统设计[J]. 中国光学, 2014, 7(4): 622-630.

[9] 袁旭仓. 光学设计[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 113.

[10] 金宁. 对红外热成像系统中冷反射现象的分析[J]. 红外技术, 1998, 20(3): 10-14.

[11] 杨正, 屈恩世, 曹剑中, 等. 对凝视红外热成像冷反射现象的研究[J]. 激光与红外, 2008, 38(1): 35-38.

[12] 张鑫, 贾宏光. 大相对孔径红外消热差物镜设计[J]. 中国光学, 2011, 4(4): 374-379.