



紧凑中波/可见摆扫成像装置光学设计与分析

刘博 刘爱敏 李巧玲 解来运

Optical design and analysis of compact visible and medium-wave infrared whisking broom imaging system

Liu Bo, Liu Aimin, Li Qiaoling, Xie Laiyun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20200517>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

紧凑型红外成像光谱仪光学设计

Optical design of compact infrared imaging spectrometer

红外与激光工程. 2018, 47(4): 418001–0418001(6) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0418001>

某大视场机载摆扫红外扫描仪几何成像仿真与误差分析

Imaging simulation and error analysis of large field of view airborne infrared scanner

红外与激光工程. 2017, 46(4): 420005–0420005(6) <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0420005>

offner型连续变焦中波红外光谱成像系统设计

Design of continuous zoom medium-wave infrared spectral imaging system based on offner scheme

红外与激光工程. 2019, 48(7): 718003–0718003(9) <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0718003>

紧凑型大变倍比红外光学系统设计

Design of compact high zoom ratio infrared optical system

红外与激光工程. 2017, 46(11): 1104002–1104002(5) <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.1104002>

可见光全天时遥感相机光学系统设计

Optical system design of remote sensing camera with visible light all-day

红外与激光工程. 2020, 49(1): 0114003–0114003(6) <https://doi.org/10.3788/IRLA202049.0114003>

轻小型长波红外光学系统的设计及实现

Design and realization of light and small long-wave infrared optical system

红外与激光工程. 2020, 49(9): 20200031–1–20200031–8 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200031>

紧凑中波/可见摆扫成像装置光学设计与分析

刘 博¹, 刘爱敏^{2*}, 李巧玲², 解来运²

(1. 国防科技大学 空天科学学院, 湖南 长沙 410003;
2. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

摘 要: 为了在空间限制严格的条件下, 实现远距离、双波段、摆扫成像要求, 采用双波段折反缩束镜、双快反镜及紧凑的单波段透镜后组, 并通过优化设计, 建立了一种紧凑型双波段摆扫成像光学系统。其中, 双波段折反缩束镜由 RC 系统、CAF₂ 分色棱镜、及单波段透镜组组成, 分别在 0.6~0.9 μm 及 3.6~4.9 μm 波段取得接近衍射极限的像质, 且摆扫成像像移均控制在半个像元以内。该双波段系统中, 主次镜间无透镜, 可见光系统焦距为 1 752 mm, 光学系统三维尺寸为 380 mm (轴向)×Φ360, 远摄比达到 0.22, 线遮拦比为 0.34。在无遮光罩的前提下, 仿真分析表明, 入射角大于 30°时, 红外 PST 均小于 1×10⁻⁴。且该系统加工及装调工艺成熟可控, 成本较低。

关键词: 摆扫成像; CAF₂ 分色棱镜; 紧凑光学设计; 红外冷反射及杂光分析

中图分类号: O439; TH743 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200517

Optical design and analysis of compact visible and medium-wave infrared whisking broom imaging system

Liu Bo¹, Liu Aimin^{2*}, Li Qiaoling², Xie Laiyun²

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410003, China;
2. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: To accomplish long-range visible and medium-wave infrared whisking broom imaging detection under strict space limitation, dual-band catadioptric shrink-beam system, double fast steering mirrors, and subsequent compact single-wave lenses was used to build a compact dual-band whisking broom imaging system through lens system design optimization. Among them, dual-band catadioptric shrink-beam system was composed of two-mirror Ritchey Chretien system, CaF₂ dichroic prism and subsequent single-wave lenses. The image quality of the shrink-beam system was closed to diffraction limit in the 0.6-0.9 μm and 3.6-4.9 μm wave bands. Image motion of the dual-band shrink-beam system were controlled within halves of the respective pixels during broom imaging process. The effective focal length of the dual-band catadioptric system in the visible band was 1 752 mm, there was no lens in between the RC, the three dimensional size of the optical system was 380 mm (axial)×Φ360, the telephoto ratio was 0.22, the line obscuration ratio was 0.34. Based on simulation and analysis, when the incident angles were larger than 30°, the point source transmittance (PST) of the dual-band system was less than 1×10⁻⁴ without additional front baffles. And this system was designed with mature optical cold working, installation and adjustment process and low cost.

Key words: whisking broom imaging; CaF₂ dichroic prism; compact optical design; naxis and stray light analysis of the infrared

收稿日期: 2020-12-05; 修订日期: 2021-02-15

基金项目: 国家自然科学基金 (11404387)

作者简介: 刘博, 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为系统工程管理及制导控制。

通讯作者: 刘爱敏, 女, 副研究员, 博士, 主要研究方向为光学系统设计及合成孔径成像技术。

0 引言

天基成像探测系统以空间飞行器为搭载平台,是应用于空间环境的光学精密仪器,它以获取海洋、地面以及空间运动物体的影像为主要功能^[1-2]。天基红外成像在夜视、透烟、透雾等方面有独特的应用价值,而可见光成像探测则以其高分辨而著称,天基红外/可见成像探测系统^[1]在天基侦测中发挥了不可替代的实用价值。

由于作用距离较远,天基红外/可见成像探测系统必须通过相应的参数计算才能保证光学系统的基本参数可以同时满足探测和分辨的具体要求^[3-6]。

由于天基系统对空间尺寸要求严格^[7],天基红外/可见成像探测系统既要兼顾双波段的同时成像,又必须通过摆扫来实现大的幅宽,因此须对光学系统的结构型式、布局方式及摆扫参数控制等方面进行研究,以建立紧凑型系统满足摆扫和尺寸的双重限制^[1]。

此外,该系统由于空间尺寸限制不能在主镜外加装遮光罩,系统的杂光抑制问题需要提前考虑^[8]。而且为保证远距离探测时的高分辨率探测,红外系统的冷反射及杂光问题也是需要关注的要点^[9-10]。

陈晓阳等^[11]提出的一种新型的双波段共口径光学系统拓展了应用波段,但未考虑天基系统的紧凑性要求;邓键等^[12]给出的两种多波段紧凑型折反光学系统明确了折反系统在紧凑型方面的应用优势,在主次镜之间放置了透镜系统,需要镀制减反效率较低的多波段减反膜,其杂光及冷反射情况未明确;为了尽量缩短系统光学长度,并满足空间尺寸及摆扫的要求,结合现有的中波红外成像探测光学系统^[7],提出了一种紧凑型中波红外/可见摆扫成像探测光学系统,该系统置于二维框架结构之上,以完成全幅宽内的摆扫。该系统共用主次镜(主次镜间无透镜)及分光棱镜,前组采用折反式缩束系统,能够实现较大视场和缩束比^[13],以减轻后组的口径和尺寸压力。缩束系统之后采用二维快反镜以补偿二维框架结构指向不确定性^[14],然后为单波段光学系统。由于红外制冷探测器的尺寸比可见光探测器所占用空间尺寸要大得多,且要完成冷屏 100% 匹配,采用了一种紧凑型二次成像结构^[15]。此外,该系统通过调焦的方式可以满足一定范围的温度适应性;对冷反射和杂光进行了有效控制,分析结果表明可以满足系统的使用要求,且加工、装调成本较低。

1 光学参数计算

根据红外探测器的响应波段,选择中波红外的系统的光谱范围为 3.6~4.9 μm ;根据大气层对太阳光谱的消光模型^[16],可见光设计波段选为 0.6~0.9 μm 。

光学系统的极限空间角分辨率与口径密切相关,其与口径的关系如下:

$$\theta = \frac{1.22\lambda}{D} \quad (1)$$

根据光学系统对极限分辨率要求并根据公式(1),取中心波长分别为 4 μm 及 0.75 μm ,又结合光学系统共口径的基本思路,取两路口径一致为 $\Phi 360 \text{ mm}$ 。

红外系统选择以色列大力神公司生产的 D13U0001 红外图像探测器^[17],像元尺寸 15 $\mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$,制冷型探测器, $F\# = 3.97$ (标称值),光学系统孔径角必须与探测器相匹配,焦距取值 $f = 1430 \text{ mm}$ 。可见光选择英迪格成像技术有限公司生产的 SR-5100 (5103)MG 图像传感器^[18],像元尺寸 4.6 $\mu\text{m} \times 4.6 \mu\text{m}$;可见光焦距取值时,考虑与红外系统焦距差异不能太大,同时,可见光与红外系统视场保持一致,可见光焦距取值 $f = 1752 \text{ mm}$ 。

红外和可见光系统视场角:方位向 0.77°;高低向 0.615°;红外图像规格 1280×1024;可见光图像规格 5120×4096。红外/可见光探测装置光学系统参数见表 1。

表 1 红外/可见光成像探测装置光学系统设计参数
Tab.1 Optical system parameters of visible and medium-wave infrared imaging detector

	Visible optical detector	Medium-wave infrared optical detector
Waveband/ μm	0.6-0.9	3.6-4.9
Pupil aperture/mm	360	360
Full field of view angle/(°)	0.77×0.615	0.77×0.615
Focal length/mm	1752±2	1430±1
Pixel size/mm	0.0046	0.015
Image resolution	≥(5120×4096)	≥(1280×1024)

2 系统设计结果

红外/可见光探测系统为了满足天基环境下空间尺寸的严苛要求,必须对光学系统的选型进行研究。

以使系统在严苛的空间尺寸要求下还能够兼顾双波段实时探测以及摆扫成像的要求。

用于天基的光学系统主要有折反系统、同轴三反(三镜偏视场使用)系统及离轴三反系统三类^[19-21]。其中同轴三反及离轴三反系统由于轴向尺寸一般较大,远摄比 0.3 以下较为困难,紧凑性较差且装调较为困难,不适用该系统。而折反系统通过与光路折叠相结合则可达到较低远摄比,且加工、装调较为容易。因此,选择折反系统结合光路折叠的方式来实现紧凑型空间布局。

为了实现摆扫像期间伺服稳定平台利用陀螺信息通过电机实现对平台扰动的一次隔离,保证二维指向精度误差为 mrad 量级,还须在光学系统合理的位置上插入尺寸较小的二维快反镜,对二维指向精度进行残余扰动及其他像移进行二次补偿,保证成像的清晰稳定^[22]。二维快反镜的尺寸不宜过大,因此折反镜前组需采用缩束镜,对进入二维快反镜的光束口径进行压缩。

综上所述,折反系统由前组缩束镜、后组成像镜组及光路折叠镜组共同组成。折反系统中,两反的残余像差需要后组的透镜组进行补偿,才能满足系统对口径和视场的要求。由于能同时透过可见光及中波红外的玻璃材料只有 CaF₂、ZnS_BROAD、ZnSe、蓝宝石等几种^[23],为了保证系统能在双波段、-30~65℃ 范围内均有良好的像质,且能增加较多的调整环节,最终选择前组缩束镜为双波段,结合分色镜组,后组成像镜组为单波段。

2.1 折反缩束镜的选型与参数优化

红外/可见光折反缩束镜的选型及参数优化是该系统设计的关键问题^[24, 1-2]。为了兼顾光双波段同时成像,主要有两种设计思路:(1)折反缩束镜可以设计成完全双波共用的系统,然后采用分色镜处于后组平行光路中进行分色;(2)折反缩束镜仅共用主次镜,然后采用分色棱镜在非平行光路中进行分光,然后进入单波段缩束后组。第(1)设计思路由于双波段共用,所需透镜片数量较多,而玻璃种类选择余地较小,随着温度变化,双波段的焦面会出现不一致性,无法同时保证像质。显然,第(2)设计思路才是工程化更优的一种设计思路。

在已有天基系统中,缩束镜的缩束比一般采用 5~10,为尽量压缩系统整体尺寸,选择缩束比为 10。

折反系统均存在中心遮拦,设其线遮拦比 ε 为主次镜的直径之比。随着折反镜线遮拦比 ε 的增大,会影响光斑的能量集中度,如图 1 所示,当系统工作的空间频率选择在归一化空间频率值 0.4~0.6 范围内,此时 MTF 的衍射极限值会降低^[25]。因此,系统的线遮拦比越小越好。经过综合考虑及参数控制及优化,选择系统线遮拦比 $\varepsilon=0.34$ 。

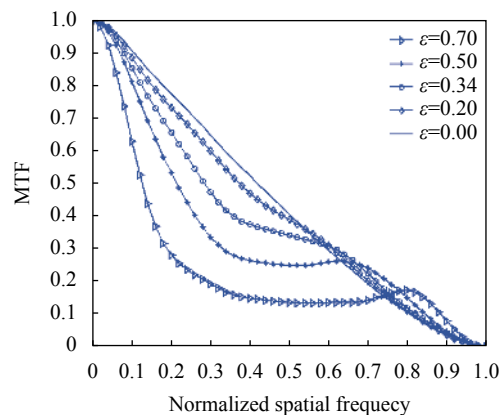


图 1 折反镜衍射极限 MTF 随着线遮拦比 ε 变化曲线

Fig.1 Diffraction-limited MTFs of catadioptric lens under different line obscuration ratio ε

红外/可见光探测装置在扫描搜索工作模式时,框架以 12.32 (°)/s 的扫描速度沿方位视场方向扫描,考虑图像重叠率 0.8,成像积分时间 0.01 s,则扫描过程中,设备曝光时间内光学载荷光轴相对于凝视目标移动了 0.123°,同时引起红外及可见像面分别有 817 个及 204 个像元的像移,必须采用像移补偿措施。

因此,相对于整体系统的半视场 $\omega=0.493^\circ=\sqrt{(0.385)^2+(0.3075)^2}$,缩束镜系统视场需要增大 0.123°,设置其视场为 0.62°。

系统在缩束光路中加入快速反射镜,补偿曝光时间内的像移。对于快速反射镜运动过程中,缩束系统与成像系统不同视场的光束在同一瞬间参与成像的工况,在光学系统中采用设置不同视场点的方法进行像质分析。缩束系统缩束比 10,快速反射镜补偿角度 0.615°,使得缩束系统中产生相对运动的光束位置在成像系统中回归到凝视成像的位置,实现扫描过程中的凝视成像。要实现凝视成像,快反镜补偿前后的主光线位置变化必须控制在半个像元以内才不会引起像质的下降。

因此,各视场的主光线在经过缩束镜后,放大倍

率必须保持基本一致,其基本参数优化要求为:

$$\omega \left| \frac{\gamma_\omega}{\gamma_0} - 1 \right| \leq \frac{0.5P_{di}}{f_i} \begin{cases} i=1 & \text{可见光} \\ i=2 & \text{中波红外} \end{cases} \quad (2)$$

式中: ω 为系统视场; γ_ω 为缩束镜在边缘视场的放大率; γ_0 为缩束镜在中心视场的放大率; P_{di} 为像元尺寸; f_i 为系统焦距。

折反系统的前组为两反,后组为折射镜组。系统的两反采用应用最广泛的 RC 系统。该 RC 系统的特殊性在保证主次镜可加工性的前提下,需要尽量压缩主镜间隔来满足系统布局要求。

球差和彗差相关的赛德尔系数 S_I 、 S_{II} 满足条件 $S_I = 0$; $S_{II} = 0$ 。RC 系统的主要参数计算如下^[26]:

$$\begin{cases} l_2 = \frac{-f'_1 + \Delta}{\beta - 1} & \alpha = \frac{l_2}{f'_1} \\ R_1 = 2f'_1 & R_2 = \frac{\alpha\beta}{\beta + 1} R_1 \\ d = f'_1(1 - \alpha) & K_1 = -\left(1 + \frac{2\alpha}{(1 - \alpha)\beta^2}\right) \\ K_2 = -\left(\frac{2\beta}{1 - \alpha} + \frac{(1 + \beta)(1 - \beta)^2}{(1 + \beta)^3}\right) \end{cases} \quad (3)$$

主镜口径 $D=360$ mm, 采用遗传算法^[27], 以球差敏感度为适应度函数, 种群 20, 代数 10, 获得主次镜组合焦距为 $f'=1170$, 主镜 F 数为 0.845, 焦点伸出量 $\Delta=108$, 代入公式 (3) 后, 得到 $R_1=-608.4$, $R_2=-229.8842$, $d=-219.143$, $K_1=-1.05248$, $K_2=-3.36234$ 。再经过一定控制和优化参数确定为: $R_1=-608.4$, $R_2=-230.335$, $d=-219.02$, $K_1=-1.052$, $K_2=-3.37$ 。

两镜的光路及 MTF 如图 2 所示。由图 2(b) 可知, 两反系统仅在轴上像质较好, 其他视场的像质则需透镜后组进行补偿校正。

红外/可见缩束镜的光路图如图 3 所示。

由图 3 可知, 可见缩束物镜在分光棱镜之后加入了两个透镜, 用于校正分光棱镜带来的轴向色差和部分的轴外像差, 在材料选择上自由度增大。缩束系统准直镜光路采用六片透镜, 将准直物镜的剩余像差与自身像差平衡, 得到良好的缩束系统像质。准直光路中有一块 $\Phi 33$ mm 口径的反射镜, 45° 放置, 用于折转光路, 使得系统结构紧凑。缩束光路出瞳处放置快速反射镜, 口径 $\Phi 60$ mm。最终, 可见缩束镜的角放大倍率 $\gamma=9.9$ 。中波红外缩束物镜是在分光棱镜之后一块

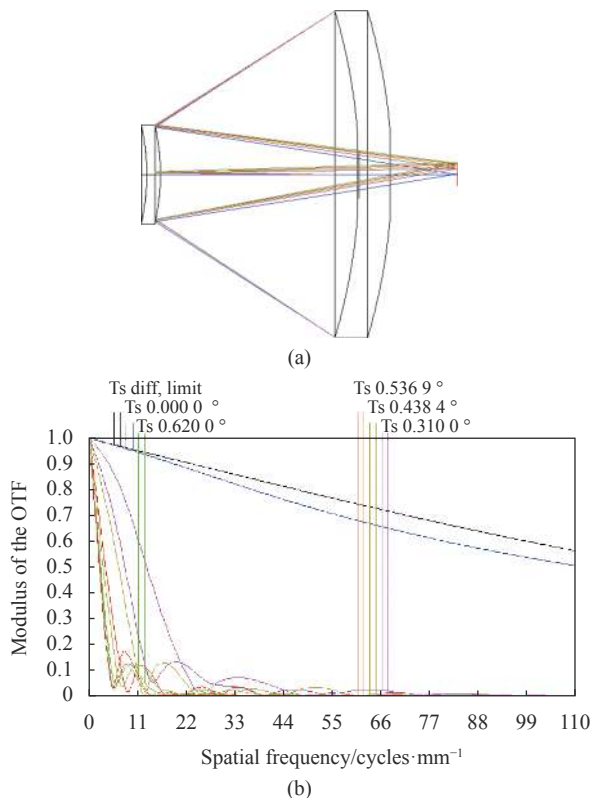
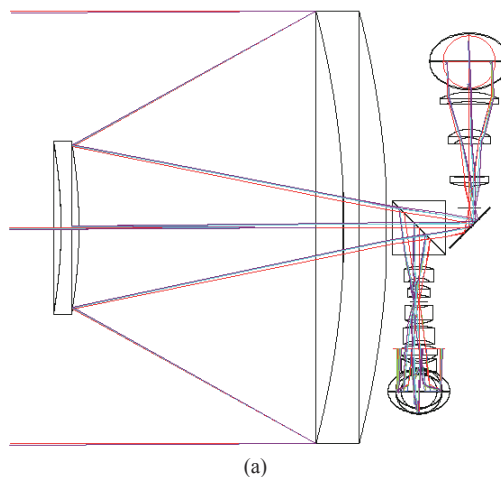


图 2 RC 两反镜的光路 (a) 及其 MTF 曲线 (b)
Fig.2 Raytrace diagram (a) and MTFs (b) of the two-mirror Ritchey-Chretien system

$\Phi 47.6$ mm 口径的反射镜, 45° 放置, 用于折转光路, 使得系统结构紧凑。缩束系统准直镜光路采用三片透镜, 均为偶次非球面透镜, 将准直物镜的剩余像差与自身像差平衡, 得到的缩束系统像质优良。在缩束光路出瞳附近放置快速反射镜, 口径 $\Phi 66$ mm。最终, 红外缩束镜的角放大倍率 $\gamma=10.04096$ 。其对应的 MTF 分别如图 4 所示。



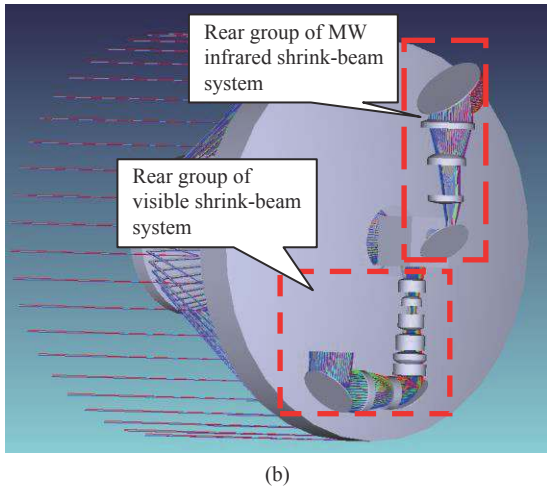


图 3 红外/可见缩束镜组光路截面图 (a) 及立体图 (b)

Fig.3 Two-dimension (a) and three-dimension (b) raytrace diagrams of the MW infrared/visible shrink-beam system

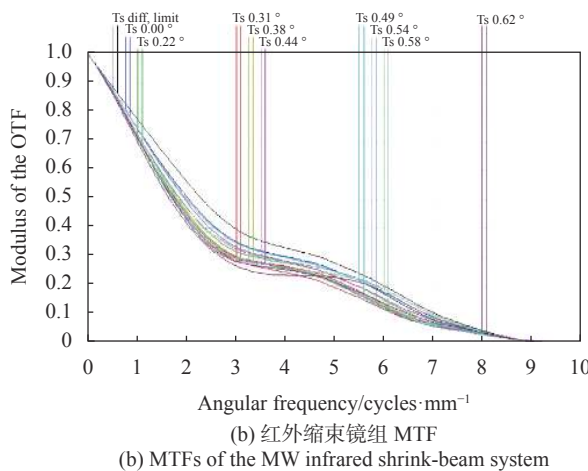
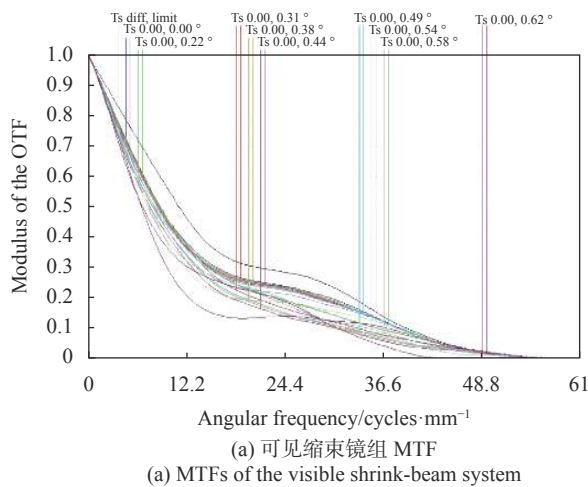


图 4 红外/可见缩束镜组 MTF(全视场±0.62°)

Fig.4 MTFs of MW infrared/visible shrink-beam system (with full field angle of ±0.62°)

2.2 红外与可见成像后组的设计

可见成像后组焦距 177 mm, 视场角 7.62°×6.08°, 含有六片透镜。具体光路如图 5(a) 所示。可见成像后组采用了六片透镜, 均为球面, 仅有一片为胶合镜, 材质为 H-ZPK1A/H-TF3L。设计过程中将成像镜组分为前后两组, 焦距均为正, 焦距之比为 3 : 4, 后组场镜既可校正像差, 又合理控制了系统整体长度, 后组远摄比为 1.03。中波红外成像系统焦距 143 mm, 视场角 7.74°×6.2°, 含有六片透镜, 其中四片为偶次非球面透镜。为进一步折叠光路, 加入一片反射镜, 光路图如图 5(b) 所示。设计过程令红外后组成像系统的入瞳基本与缩束系统的出瞳重合, 这样二维快反的尺寸最小; 同时为了实现与中波制冷探测的冷光阑的 100% 匹配, 红外成像后组采用二次成像系统^[28], 将光瞳投影至冷光阑上。设计过程中, 将红外成像镜组分为两组: 前组为聚焦镜组, 其主要参数为焦距 f_{1cxh} ; 后

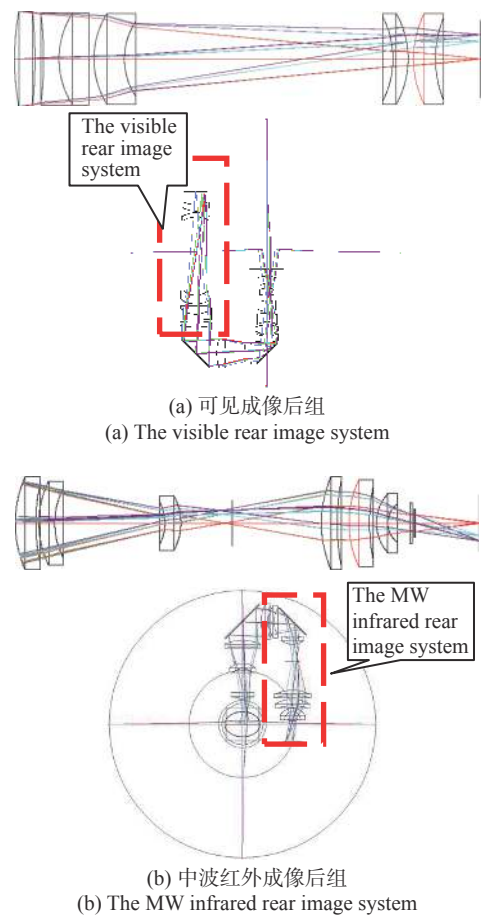
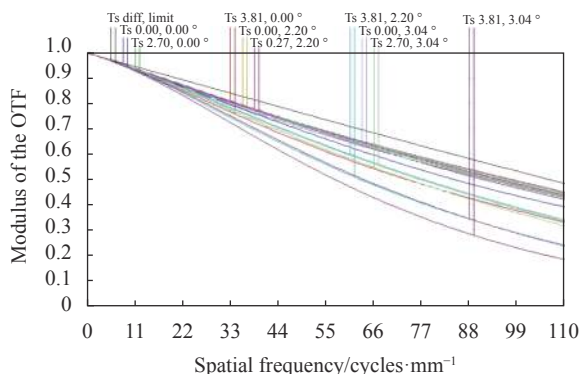


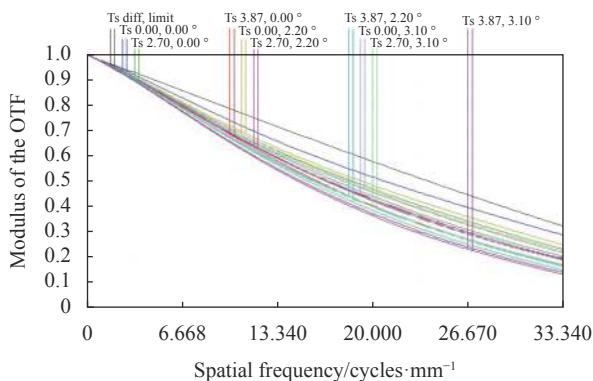
图 5 可见及红外成像后组光路图及其在系统中的位置图

Fig.5 Raytrace diagram and position of the MW infrared/visible rear image system

组为投影镜组,其主要参数为放大倍率 β_{cxh} 。为了有效地缩短系统长度,取 $f_{icxh}'=103.6$, $\beta_{cxh}=1.38$,后组远摄比为 1.44。其对应的 MTF 分别如图 6(a)、(b) 所示。



(a) 可见成像后组 MTF ($7.62^\circ \times 6.08^\circ$)
(a) MTFs of the visible rear image system ($7.62^\circ \times 6.08^\circ$)



(b) 红外成像后组 MTF ($7.74^\circ \times 6.2^\circ$)
(b) MTFs of the MW infrared rear image system ($7.74^\circ \times 6.2^\circ$)

图 6 红外/可见成像后组 MTF

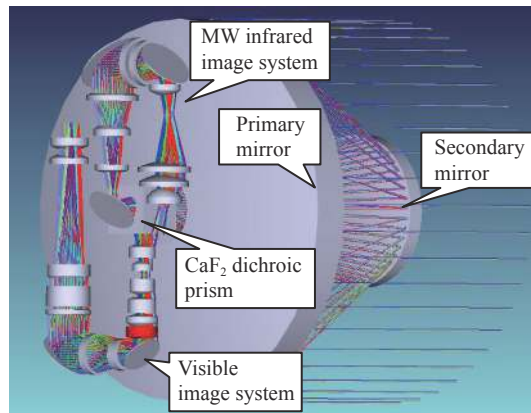
Fig.6 MTFs of the MW infrared/visible rear image system

2.3 红外/可见成像系统的紧凑布局及像质分析

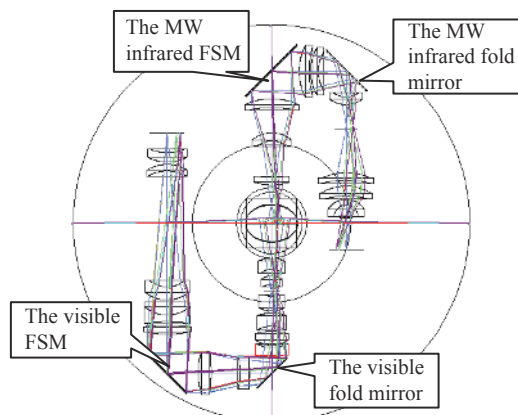
紧凑型红外/可见光摆扫成像探测光学系统由共孔径光路及中波红外和可见光成像光路组成,各色光成像光路由缩束系统、快速反射镜和成像系统组成,快速反射镜位于缩束系统和成像系统之间,补偿框架扫描过程中积分时间内像在 CMOS 及制冷探测器上像移。红外/可见光成像探测光学系统总体布局如图 7 所示。

光学系统三维总尺寸为 380 mm (轴向) $\times \Phi 360$ mm,双波段系统中可见光系统焦距为 1752 mm,远摄比达到了 0.22,系统结构紧凑,布局合理。

中波红外和可见光共用前端缩束系统的物镜部分,形成共孔径光路,且两路光路的入瞳均设置在主



(a)



(b)

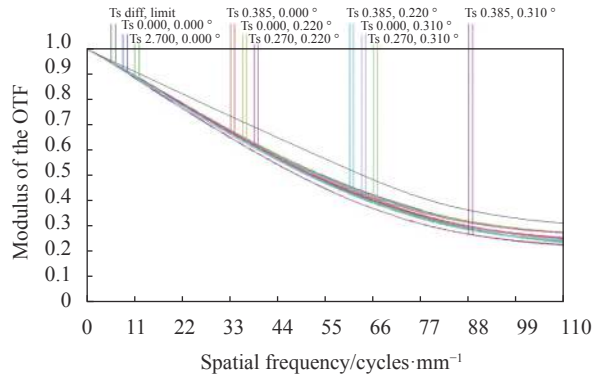
图 7 紧凑型红外/可见光成像探测光学系统的三维总图 (a) 及二维视图 (b)

Fig.7 Three-dimension (a) and two-dimension (b) raytrace diagrams of the compact MW infrared/visible imaging detector optical system

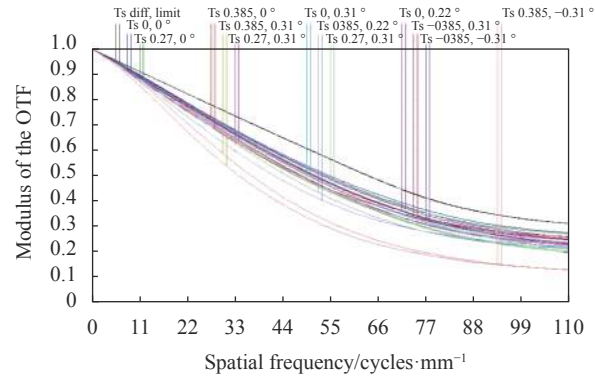
镜处。两路光通过两反系统之后的分光棱镜分光,反射光路进入可见光光路,透射光路进入中波红外光路。通过分光棱镜的红外光线再次通过光路转折平面反射镜,控制光学系统的轴向尺寸,将光路尽量布局在径向方向。

光学系统设计过程中,采用整体校正和分开校正相结合的设计思路,共孔径两反物镜的轴上视场完善成像,缩束系统和成像系统各自都完善成像,组合成整体系统时,由于光瞳匹配、像差方向及放大等因素,整体系统的像质还需要再校正,此时的校正属于小像差的平衡,校正过程中同时保证缩束系统和最终整体系统的像质,既保证了缩束系统出射至快速反射镜光路的平行度,又有利于系统装调工艺的设计。

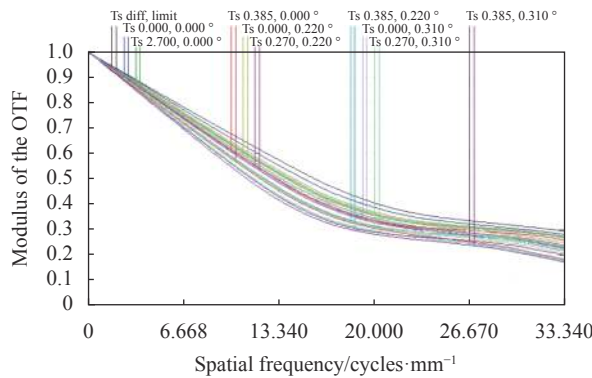
光学系统在静态凝视时,整体 MTF 分别如图 8 所示。



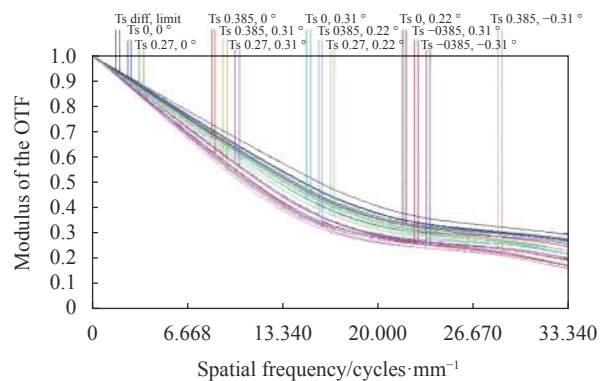
(a) 可见光探测凝视成像系统的 MTF
(a) MTFs of the visible staring image system



(a) 可见光探测摆扫成像系统的 MTF
(a) MTFs of the visible staring image system on whisking broom mode



(b) 红外探测凝视成像系统的 MTF
(b) MTFs of the MW infrared staring image system



(b) 红外探测摆扫成像系统的 MTF
(b) MTFs of the MW infrared staring image system

图 8 红外/可见光探测装置凝视成像系统的 MTF (0.77°×0.62°)

Fig.8 MTFs of the MW infrared/visible imaging detector on staring image mode (with full field angle of 0.77°×0.62°)

光学系统在摆扫成像时,整体 MTF 分别如图 9 所示。

根据前文的光学系统设计,红外二维快反镜位于红外缩束镜之后的平行光路中。将主次镜、缩束镜以及后端的成像镜组作为整体进行转动,快反补偿镜单独作为一个系统进行补偿,追迹实际光线,利用全局坐标来判定红外系统在转动角度和补偿角度相同的情况下仿真实际光线位置坐标的变化情况。

在系统转动角度为 0.123°、补偿镜补偿 0.615°的情况下,红外系统的补偿误差最大为 5.73 μm,小于 1/2 像元^[29],补偿前后物点和像点一一对应,实现了准凝视。且对比图 8(b) 及图 9(b) 可知,像移补偿后,红外成像像质基本无下降。同理,可见系统也进行了像移补偿仿真,像移量控制在 0.5 像元以内。对比图 8(a) 及图 9(a) 可知,像移补偿后,可见成像像质在边缘视场有所下降,由于摆扫成像时重叠率为 20%,边缘视场的像质下降不会影响整体成像。

图 9 红外/可见光探测装置摆扫成像系统的 MTF (0.77°×0.62°)

Fig.9 MTFs of the MW infrared/visible imaging detector on whisking broom mode (with full field angle of 0.77°×0.62°)

3 温度适应性、公差分析与杂光控制

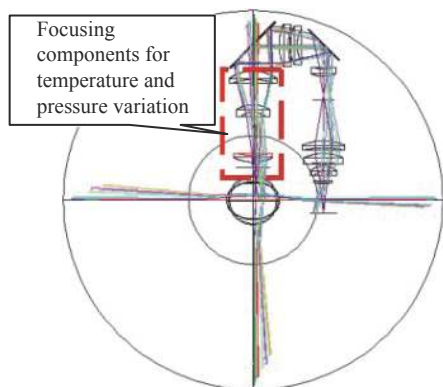
由于红外分系统与可见分系统分析方法类似,仅以红外分系统为例介绍分析方法与结果。

3.1 温度适应性分析

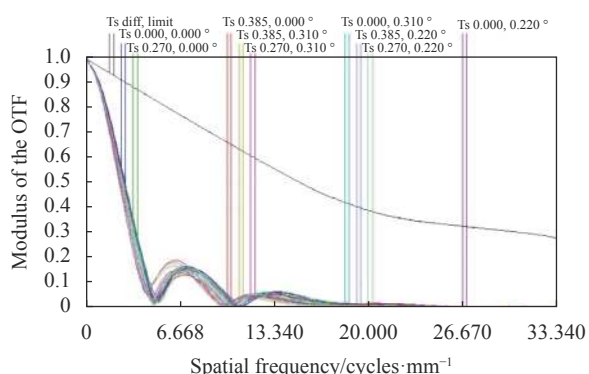
由于该天基系统需要在地面进行挂飞试验,对系统环境适应性要求较高,系统需适应的环境温度为 -30~65 °C,系统身焦距较长,被动无热化比较困难,因此采用主动调焦的方式来满足系统的温度适应性要求^[30]。

主次镜均采用 SiC 材料,主次镜之间采用殷钢材质,膨胀系数为 2.5×10⁻⁶ 与 SiC 材质保持一致。其余材质均采用 Ti 合金,膨胀系数为 9×10⁻⁶,其余则根据玻璃材料自身的膨胀系数及折射率温度系数进行分析。

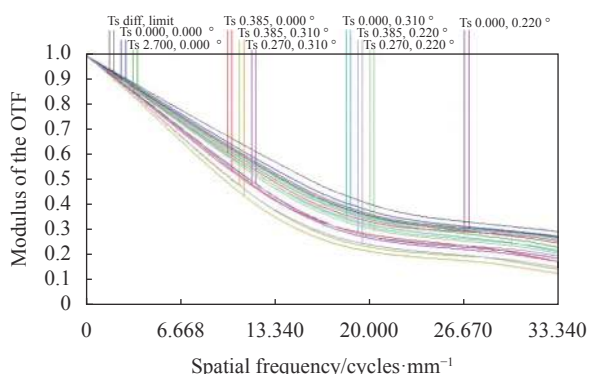
如图 10(a) 所示,调节缩束镜后组的离焦位置即可保证系统的问题适应性。



(a) 中波红外成像系统温度适应性调整组件
(a) Focusing components in MW infrared image system with thermal adaptability



(b) 中波红外成像系统调整前 MTF (-30 °C)
(b) MTFs of MW infrared image system before focusing (-30 °C)



(c) 中波红外成像系统调整后 MTF (-30 °C)
(c) MTFs of MW infrared image system after focusing (-30 °C)

图 10 中波红外成像子系统的温度适应性调节及效果

Fig.10 Focusing components and effects for the MW infrared image sub-system with thermal adaptability

调节间隙对应于一系列温度及气压变化值,边缘视场在 33.34 lp/mm 时 MTF 在调节后的提升量 ΔMTF 见表 2。

其中, -30 °C 时调节量最大,调焦前的系统的 MTF 如图 10(b) 所示,调节后系统 MTF 如图 10(c) 所示,边缘视场 MTF 提升了 0.123。调节后,边缘视场像质有一定下降,由于是摆扫成像,存在 20% 的重叠率^[1],因此不影响最终的像质。

3.2 公差分析

根据表 3 所示的加工及装配的公差要求,对红外分系统进行公差敏感度分析^[31],分析结果如表 4 所示。

由表 3 及表 4 可知,在主次镜公差、红外透镜公差要求较为严格的情况下,系统在两个方向的 MTF 值均大于 0.15。

3.3 冷反射与杂光分析

由于红外系统采用制冷探测器,其像面制冷温度低至 77 K^[17],而光学系统和目标的温度一般要远远高于探测器本身的温度,且镜片上的增透膜不会完全消除反射光,在系统的每个表面之间会残留部分冷反射。

冷反射效应^[9]是指制冷的探测器光敏面自身发射出的冷光线,被探测器前端红外光学系统中透镜的表面反射回来,并重新聚焦在光敏面上,导致其探测到自身冷像的一种成像缺陷。冷反射效应会严重降低探测系统的灵敏度,其主要有两种存在的形式:第一种是冷反射均匀分布在探测器的光敏面上,影响探测器的背景信号,相当于引入了额外的噪声源,这会导致系统成像质量的退化,也会影响系统的动态范围;第二种是冷反射非均匀分布在探测器的光敏面上,在红外图像的中心位置出现一块较大的黑斑,严重影响了红外成像系统对目标的探测与识别,这就是红外成像系统中典型的冷反射效应。

表 2 各个温度点及真空环境下,调节组件的调节量及 MTF 的提升参量 $\Delta MTF@33.34$ lp/mm

Tab.2 Adjustment and $\Delta MTF@33.34$ lp/mm of focusing components at different temperatures and in vacuum

	Nominal value	-30 °C	-10 °C	0 °C	10 °C	30 °C	50 °C	65 °C	In vacuum
Air interval value	20.16	20.15	20.16	20.16	20.16	20.16	20.17	20.17	20.16
Adjustment	0	0.64	0.38	0.27	0.15	-0.15	-0.38	-0.55	-0.21
ΔMTF	0	0.123	0.140	0.108	0.037	0.036	0.155	0.129	0.057

表 3 红外分系统的加工及装配要求

Tab.3 Process and assembly requirements for MW infrared image sub-system

Component list	Process requirements				Assembly requirements		
	N	ΔN	Edge thickness difference	Refractive index	Decenter	Linear tilt	Space
Primary mirror	2	0.5	-	-	0.005	-	0.005
Secondary mirror	2	0.5	-	-	0.005	0.005	0.02
Prism	5	0.5	0.01	1×10^{-3}	0.1	0.05	0.02
Lenses	5	0.5	0.01	1×10^{-3}	0.015/0.01	0.02	0.02

表 4 红外分系统公差敏感度分析结果

Tab.4 Tolerance sensitivity analysis result of the MW infrared image sub-system

Angle of view	Nominal MTF values		Calculated MTF values	
	MTFT	MTFS	MTFT	MTFS
0.0°, 0.0°	0.270	0.270	0.239	0.249
0.27°, 0.0°	0.263	0.227	0.233	0.196
0.385°, 0.0°	0.255	0.188	0.223	0.152
0.0°, 0.22°	0.242	0.266	0.208	0.245
0.27°, 0.22°	0.232	0.221	0.198	0.191
0.385°, 0.22°	0.225	0.185	0.191	0.150
0.0°, 3.1°	0.214	0.261	0.175	0.237
0.27°, 3.1°	0.205	0.215	0.169	0.186
0.385°, 3.1°	0.202	0.183	0.169	0.152

非序列模式实际光线追迹将会是一种更加有效的冷反射效应定量分析方法。首先,定义透镜表面的冷反射引入温差 NITD,并将其作为非序列模式实际光线追迹冷反射分析方法的评价指标,具体表示如下^[32]:

$$NITD_{ij} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [L(\lambda, t_H) - L(\lambda, t_D)] R_d(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial L(\lambda, t_S)}{\partial t} R_d(\lambda) d\lambda} \frac{\varepsilon_j^2}{\varepsilon_0} R_j \delta_{ij} \quad (4)$$

式中: $NITD_{ij}$ 为探测器光敏面上像点 i 处发出的冷光线被 j 个透镜表面反射回探测器所形成的冷反射引入温差; λ_1 和 λ_2 分别为红外成像工作波段的上下限; t_H 为红外光学系统镜筒的温度; t_D 为制冷型探测器光敏面的温度; t_S 为系统所探测精度的背景温度; $R_d(\lambda)$ 为探测器的光谱响应率; ε_j 为第 j 个透镜表面到探测器的透过率; ε_0 为整个光学系统的透过率; R_j 为第 j 个透镜表面的反射率; $L(\lambda, t)$ 为黑体辐射亮度,可用普朗克公式表示:

$$L(\lambda, t) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/\lambda kt) - 1} \quad (5)$$

式中: h 为普朗克常数; c 为光速; k 为玻耳兹曼常数; t 为黑体温度。

δ_{ij} 为第 j 透镜表面产生的冷反射量,可表示为:

$$\delta_{ij} = \frac{m}{M} \quad (6)$$

式中: m 为探测器光敏面上像点 i 取足够多的光线经过冷光阑后,被第 j 个透镜表面反射回探测器光敏面上的光线数目; M 为像点 i 所追迹的总光线数目。

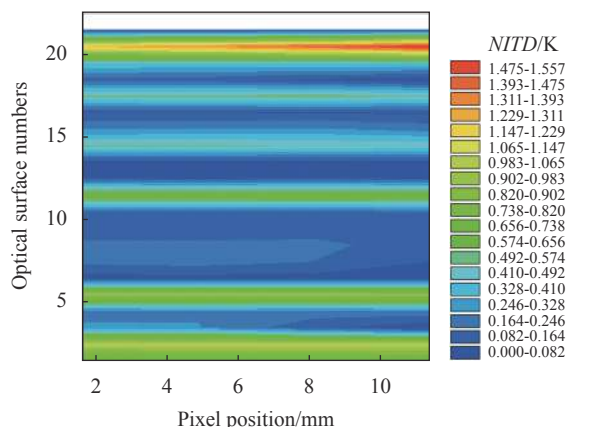
冷反射分析过程中,设置透镜表面反射率为 2%,制冷探测器的温度为 77 K,系统镜筒及探测景物的温度均为 293 K,对整个系统进行冷反射,所得各个表面的 NITD 及整个系统的 NITD 分布如图 11 所示。

由图 11(a)、11(b) 可知,系统单个表面的 NITD 为 1.5 K,总体的 NITD 为 0.4 K。

对于应用于天基环境的光学系统,杂光来源是多样的,在各种杂光中,太阳光占主导。故主要分析太阳光对系统造成杂光影响。太阳光在中波红外波段的黑体辐射温度为 5656 K,对地的立体角为 6.8×10^{-5} sr^[16],太阳光到达镜头附近的照度为:

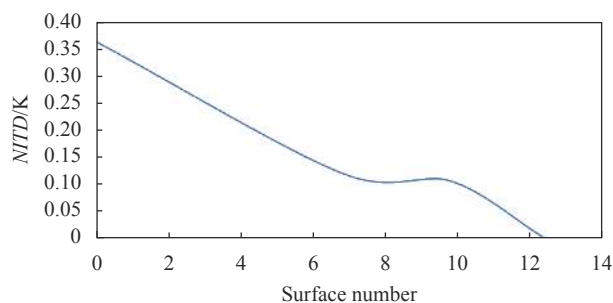
$$E_{inc} = L_{sun} \tau_{sun} \Omega_{sun} \cos(\theta_{sun}) \quad (7)$$

公式 (7) 中太阳光照度为:



(a) 中波红外子系统各个表面的 NITD

(a) NITDs of surfaces in MW infrared image sub-system



(b) 中波红外子系统总 NITD

(b) Total NITD of MW infrared image sub-system

图 11 中波红外子系统各个表面的 NITD 及总 NITD

Fig.11 NITDs of surfaces and total NITD of the MW infrared image sub-system

$$L_{\text{sun}} = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(c_1/\lambda T_{\text{sun}}) - 1} d\lambda \quad (8)$$

由此可得出不同角度太阳光入射到光学系统口径处的照度。

另外,探测器的噪声等效功率 P_{NEP} 为^[33]:

$$P_{NEP} = \frac{\sqrt{A_d \Delta f}}{D^*} \quad (9)$$

探测器靶面的噪声等效辐照度 E_{NEP} 为:

$$E_{NEI} = \frac{P_{NEP}}{A_d} \quad (10)$$

由公式(7)~(10)即可计算出系统参考 PST。经计算,30°时,参考 PST 为 1.41×10^{-3} 。

采用 FRED 软件^[34]对整个系统进行杂散光分析,红外系统的 PST 如图 12 所示。

由图 12 可知,红外光学系统在大于 30°时 PST 均小于 1×10^{-4} ,满足系统杂散光要求。

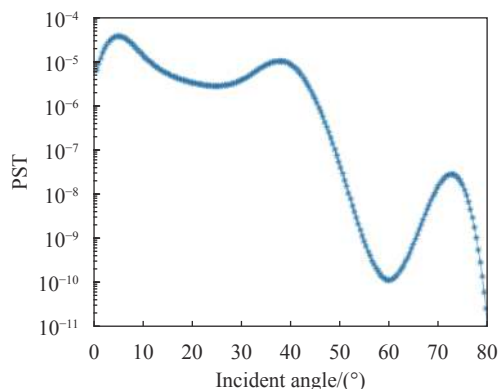


图 12 不同入射角时中波红外子系统的 PST

Fig.12 PST of the MW infrared image sub-system at different incident angles

4 结论

通过有针对性地优化光学系统设计、选择合适的系统评价函数并对系统加工装调、冷反射及杂光进行分析及控制,采用 RC 折反两镜(主次镜无透镜)、CAF2 分光棱镜、红外/可见缩束镜、双二维快反镜、红外二次成像镜后组及可见成像镜后组,建立了一种紧凑型复合双波段摆扫成像光学系统。讨论了系统的参数计算与核算、光学系统的设计、温度适应性、公差分析以及杂光分析计算。结果表明,该双波段摆扫成像系统结构紧凑,布局合理,公差分配合理,满足系统对温度适应性和杂光的要求,为天基中等口径紧凑型双波段摆扫成像探测提供了一种新的技术路线。该系统稍加改进还可被拓展应用于更多波段的成像测量,或被更改为单一波段的成像测量。

参考文献:

- [1] Hu Qinglong. Optical and mechanical structure design and research on image motion compensation technology of whisking broom space-based infrared imaging system[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018: 1-2. (in Chinese)
- [2] Meng Qingyu. Research on space-based multispectral imaging system of space targets[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012: 1-2. (in Chinese)
- [3] Scott L B, D'Agostino J A. NVEOD FLIR92 thermal imaging systems performance model [C]//Proceedings of SPIE, 1992, 1689: 194-203.
- [4] Song Minmin. The research of the relationship between infrared

- system distance and the impact of the factors[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [5] Wang Juan, Yang Chunping, Wu Jian. Position measurement method based on linear array CCD with inverting prism [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2003, 1(5): 56-58. (in Chinese)
- [6] Sun Wenfang. Research of performance evaluation of infrared imaging system and atmospheric effects based on MRTD[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015. (in Chinese)
- [7] Wang Chao. Research on space-based surveil imaging system of infrared space targets[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [8] Zhao Yuchen, Xu Yanjun, Sha Wei, et al. Stray light analyze and suppress of the space-borne infrared optical system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(10): 1016001. (in Chinese)
- [9] Li Hang. Research on key techniques for medium wave infrared target detection device[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)
- [10] Li Gang. Research about space-based IR-optical system for space object detection[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [11] Chen Xiaoyang, Gao Ming. Design of airborne dual-band common aperture photoelectric aiming optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(5): 20200322. (in Chinese)
- [12] Deng Jian, Qu Rui, Huang Jianbing. Several ways to realize multi-band common aperture optical imaging system (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(6): 20201017. (in Chinese)
- [13] Bai Yu, Liao Zhiyuan, Liao Sheng. Infrared dual band athermal optical system with common aperture [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(2): 268-277. (in Chinese)
- [14] Tan Chan. Research on two-dimensional image motion compensation of space-borne staring imager based on scanning control[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [15] Yu Yang, Jian Yi, Pan Zhaoxin. Design and test-result of re-imaging athermal infrared optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3180-3184. (in Chinese)
- [16] Eric C F. Stray Light Analysis and Control[M]. US: SPIE Press, 2013: 18-22.
- [17] D13U0001 Hercules F/4 specification[Z]. 2014.
- [18] SR-5100(5103)MG用户手册 [Z/OL]. 2020. <https://www.indigo-imaging.com/>
- [19] Li Wei. Technology studying on the supporting structure between primary mirror and second mirror on the space camera[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2010: 35-38. (in Chinese)
- [20] Sun Wen. Design and manufacture of low-cost high-resolution camera for remote sensing micro-satellite[D]. Suzhou: Soochow University, 2015: 21-30. (in Chinese)
- [21] Han Peixian. Optical system design and stray light analysis of micro video-capable satellite[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015: 17-34. (in Chinese)
- [22] Wang Yongyang. Research on high precision LOS stabilization technology based on fast steering mirror[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016: 1-8. (in Chinese)
- [23] Fischer R E. Optical System Design[M]. New York: McGraw-Hill, 2000: 233-240.
- [24] Cui Enkun. The design of visible/infrared multi-band optical system[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014: 14-18. (in Chinese)
- [25] 刘丽, 江松月. 综合孔径成像原理与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [26] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004: 10-35.
- [27] 雷英杰, 张善文, 李续武, 等. MATLAB遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2014.
- [28] Tan Ting, Yang Jianfeng, Zhou Ke. Athermalization design of a dual field-of-view IR optical system [C]/International Conference on Electronics and Optoelectronics, 2011, 2: 79-82.
- [29] Yao Chengkang, Li Qinghui. Analysis of image motion satellite remote sensing camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5): 901-905. (in Chinese)
- [30] Bai Yu. Research on infrared dual-band athermal detection imaging system with long focal length and wide spectrum[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017: 18-22. (in Chinese)
- [31] ZEMAX Optical Design Program User's Guide [Z/OL]. [2009-06-09]. <https://www.zemax.com/>
- [32] Akram M N. Simulation and control of narcissus phenomenon using nonsequential ray tracing. I. Staring camera in 3-5 μm waveband [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(6): 964-975.
- [33] Niu Jinxing, Zhou Renkui, Liu Zhaohui, et al. Analysis and calculation of space-based infrared detecting system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(3): 768-771. (in Chinese)
- [34] FRED User Manual [Z/OL]. [2013-06-09]. <https://www.fred.com/>