

静止轨道大视场中波红外光学系统设计

王威^{1,2}, 陈凡胜¹, 崔坤^{1,2}

(1.中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 地球静止轨道凝视成像技术是航天遥感领域的重要研究内容。为了实现静轨对地不间断观测的目的, 设计了一套覆盖地球全圆盘的大视场中波红外凝视成像光学系统。通过光焦度分配、光线高度控制和冷阑匹配, 实现了大视场二次成像光学结构; 根据现有面型检测水平, 合理分配非球面, 解决了多重像差问题。结合实际装调工艺, 对温度适应性情况进行讨论。设计得到的光学系统视场达到 $18^\circ \times 18^\circ$, 角分辨率为 $72 \mu\text{rad}$ 。设计结果表明, 各个视场的 MTF 在奈奎斯特频率处 (16.7 lp/mm) 均大于 0.7, 像元尺寸内能量集中度大于 83%, 冷阑效率大于 98%。该系统有望在静止轨道红外探测相机、高灵敏度天文卫星等领域实现重要应用价值。

关键词: 静止轨道; 凝视成像; 中波红外; 大视场; 光学设计; 温度适应性

中图分类号: O435.1, TN216 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2015)02-0114-05

The Design of MWIR Staring Wide FOV Optical System Based on GEO Orbit

WANG Wei^{1,2}, CHEN Fan-sheng¹, CUI Kun^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Geostationary Orbit (GEO) staring imaging technology is an important field of aerospace remote sensing technology research. A wide FOV of high-resolution secondary imaging optical system is realized by optical power distribution, materials athermal design and ray height control. Combined with the actual processing and detection level, the aspheric design method is used in the aberration balance. Finally, temperature adaptability is discussed. The designed optical system has a full field of view of $18^\circ \times 18^\circ$, the IFOV is $72 \mu\text{rad}$. The results indicate that the modulation transfer functions (MTF) of all FOV at Nyquist frequency (16.7 lp/mm) are larger than 0.7, 83% infrared encircled energy is concentrated in one pixel. Moreover, it could obtain well cold aperture efficiency of 98%. The staring wide FOV optical system could be widely applied in infrared detection camera and high sensitivity astronomy satellite in GEO orbit and other fields.

Key words: geostationary orbit, staring imaging, MWIR, wide FOV, optical design, temperature adaptability

0 引言

在空间对地观测领域中, 随着用户对卫星观测数据高时间、高空间分辨率和高稳定性要求的不断增加, 地球静止轨道凝视成像系统以其远优于中低轨道观测卫星的高时效性、持续探测能力和对敏感事件的近实时响应能力, 成为当前国际遥感卫星领域一个重要的发展方向, 许多国家都在致力于高时间分辨率的大视场面阵凝视型成像仪的研发工作。

目前在轨的 GEO 轨道成像系统, 如美国的 SBIRS GEO 系列^[1-2]、GOES 气象卫星系列^[3]、欧空局 3.5 m 级 Herschel 空间望远镜^[4]、法国 GEO-Oculus 气象卫星^[5]和我国的 FY-2、FY-4 气象卫星卫星^[6-7]所搭载的红外成像仪光学结构普遍采用反射式或折反射式光学系统, 光学视场均在几度以内, 必须结合光机扫描机构实现全圆盘成像要求。这种工作模式一方面牺牲了系统的时间分辨率, 无法对感兴趣目标进行实时不间断观测; 另一方面指向控制机构的引入不仅增大了

收稿日期: 2014-05-20; 修订日期: 2014-06-26。

作者简介: 王威 (1987-), 男, 博士生, 主要从事空间红外光学系统设计方面的研究。E-mail: wangweisitp@163.com。

通讯作者: 陈凡胜 (1978-), 男, 研究员, 主要从事空间红外弱小目标探测系统总体技术研究。E-mail: cfs@mail.sitp.ac.cn。

基金项目: 中国科学院知识创新工程基金项目, 编号: O9KBD013G0。

系统的不稳定度同时也大大提高了发射成本; 近几年来, 离轴三反光学结构在空间相机中得到大量的应用, 该结构可以提供十几度到几十度的线视场要求^[8], 但仍需要配合一维扫描机构完成凝视观测, 且加工装调也存在着一定复杂度, 有报道的实际制造案例国内只有长春光机所等为数不多的几家研究机构。随着大面积探测器制造技术的不断发展, 研发大视场凝视成像光学系统已成为可能和迫切需求。

本文通过消像差方法并结合非球面的使用, 解决了大视场大口径红外系统轴外像差问题。构建二次成像结构并出瞳限制, 抑制了光学系统自身及外部杂散辐射对像质的影响, 实现了冷阑匹配的目标, 从而得到了视场为 $18^\circ \times 18^\circ$ 凝视型大视场红外光学系统, 成像质量良好, 满足对地球全圆盘实时、不间断观测的需求。对光学公差的分配也保证了后期加工生产的可行性。

1 系统设计

1.1 指标参数

静止轨道对地成像卫星要求系统光学视场能够覆盖地球全圆盘, 图 1 为地球辐射散射模型观测角与卫星视场角的关系, 由三角函数关系可得, 地球全圆盘对应光学系统视场角为 17.6° , 考虑到设计过程中离轴光线可能带来的大的轴外像差, 为确保全视场尤其是边缘视场的成像质量, 对视场进行适当拓展, 取光学设计视场为 $18^\circ \times 18^\circ$ 。

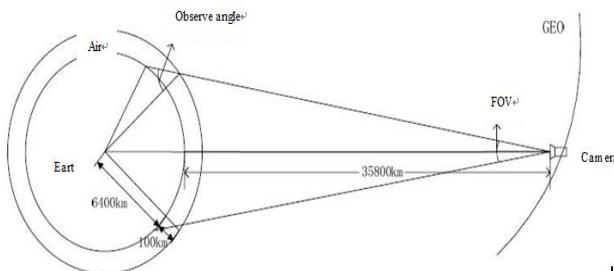


图 1 静止轨道对地观测模型

Fig.1 Model of earth observation from GEO orbit

目前已知在轨卫星红外波段对应星下点最高对地分辨率为 1 km, 以此为设计标准, 波段为 $3.5\text{--}5\ \mu\text{m}$, 由光学衍射极限公式:

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

和星下点地面分辨率公式:

$$L = \alpha \times H \quad (2)$$

式中: $\bar{\lambda}$ 为中央波长; H 为地轨距离, 取 35800 km, 可得光学系统入瞳口径 D 为 180 mm。在综合衡量各项指标后, 确定光学系统设计参数如表 1。

表 1 光学设计参数

Table 1 Optical design parameters

parameter	value
effective focal length	400 mm
entrance pupil diameter	180 mm
field of view	$18^\circ \times 18^\circ$
MTF (@17 lp/mm)	≥ 0.6
waveband	$3.5\ \mu\text{m} \text{--} 5\ \mu\text{m}$

1.2 设计思想

1.2.1 光学结构设计原理

根据光学系统设计指标要求, 为了保证系统能够接收足够的能量, 光学系统选用无遮拦结构, 可选用透射式结构和离轴反射式结构。系统要求光学视场为 $18^\circ \times 18^\circ$, 反射式结构并不适用; 同时, 对于大视场系统, 像差矫正存在较大困难, 相比反射式结构, 透射式结构拥有更多的自由变量, 更易于矫正轴外像差, 因此采用透射式结构。

静止轨道光学结构, 除了要考虑结构本身问题, 深空复杂的热杂光环境对结构本身的影响也是考虑的重要因素之一。为了降低红外系统自身热辐射以及空间杂散辐射的对最终成像质量的影响, 除了对探测器进行制冷外, 还需要对系统的出瞳进行限制。因此在全透射结构基础上采用二次成像红外光学结构, 同时为了得到尽可能高的冷阑效率, 并保证出瞳位置可用, 根据光瞳衔接原理^[9], 通过设计计算将系统孔径光阑经过光学系统最终成像于焦平面的前面(系统像面之前)。光学结构如图 2 所示。

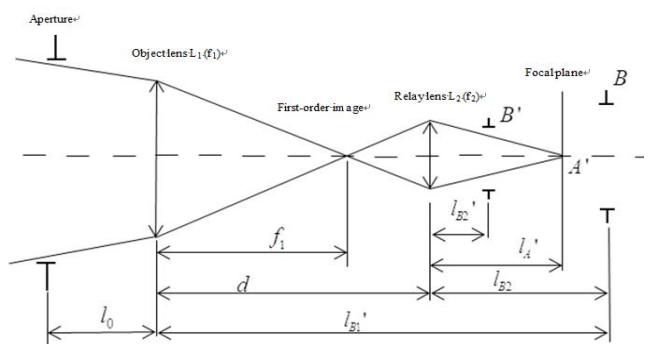


图 2 二次成像光学结构示意图

Fig.2 Schematic drawing of a re-imaging optical system

该系统由 2 组透镜构成, 分别为物镜组 L_1 和中继镜组 L_2 , 对应的等效焦距分别为 f_1 和 f_2 , 两镜组之间间隔为 d , 镜组之间成一次像。孔径光阑经前镜组一次成像于 B , 并最终成像于 B' 。各组件间距离关系如图 2 各个几何量标示。根据高斯成像公式, 两镜组近轴光学几何关系为:

$$\begin{cases} \frac{1}{l'_{B_1}} - \frac{1}{l_0} = \frac{1}{f_1} \\ \frac{1}{l'_{B_2}} - \frac{1}{l_{B_2}} = \frac{1}{f_2} \\ \frac{1}{l'_{A'}} - \frac{1}{f_1 - d} = \frac{1}{f_2} \end{cases} \quad (3)$$

由上面3组物像关系可以推导出：

$$\begin{cases} \frac{1}{l'_{B_2}} = \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_1 l_0} - d \\ \frac{1}{l'_{A'}} = \frac{1}{f_2} - \frac{1}{f_1 - d} \end{cases} \quad (4)$$

为了保证系统使用要求（出瞳可用），需要保证：

$$l'_{A'} > l'_{B_2} > 0 \Rightarrow 1/l'_{B_2} > 1/l'_{A'} > 0 \quad (5)$$

结合公式(2)式和(3)式，以前组焦距 f_1 为因变量，分别就 $f_1 < 0$, $0 < d < f_1$, $0 < f_1 < d$ 三种情况代入上述3个公式，探讨 f_1 、 f_2 和 d 相对几何关系。运算得出满足系统设计要求的结构约束为：

$$\begin{cases} d > f_1 + f_2 \\ f_1 > 0 \\ f_2 > 0 \end{cases} \quad (6)$$

因此系统构型要求 L_1 和 L_2 均为正光焦度镜组，且二镜组间距大于其焦距之和，从而保证在 L_1 和 L_2 之间成一个实的中间像。假设两镜组对系统孔径光阑的放大倍率分别为 β_1 和 β_2 ，系统的通光口径为 D ，则系统出瞳（Lyot光阑）的口径 D' 应满足：

$$D' = \beta_1 \beta_2 D \quad (7)$$

通过选定参数 l_0 、 l'_{B_2} 和 $l'_{A'}$ 以及对出瞳的约束，利用上述公式可以求解出两镜组 L_1 和 L_2 的焦距 f_1 和 f_2 以及它们的间距 d 等参数，即可得到该系统的初始结构。计算得到系统初始光焦度分配见表2。

表2 光学系统初始光焦度分配

Table 2 The initial distribution of optical power

System structure	Power value
L_1	$\phi_1 = 0.0058543$
L_2	$\phi_2 = 0.0450396$

1.2.2 消像差设计

红外透射式光学结构受温度环境影响明显，温度变化会导致材料折射率、厚度、间距等参量变化，从而导致光学系统像面产生热聚焦漂移现象。借鉴色差校正原理^[10-11]，采用热差图法^[12]，利用不同光学材料热特性之间的差异，在结构中采用不同特性材料相间

组合排布，同时考虑机械结构材料热性能影响，通过材料与结构件之间的热补偿效应来消除热像差影响。选取锗、硅、硫化锌、砷化镓4种材料，镜筒材料为铝合金，线胀系数为 $22.7 \times 10^{-6}/K$ 进行系统热像差校正。其中物镜组采用两片式结构，分别为硅、锗各1片；中继镜组采用硅、硫化锌、砷化镓、锗透镜相间排布。

大视场红外光学结构除了受热像差的影响，离轴像差对成像质量的制约也非常显著。根据余弦四次方关系^[13]，随着视场的增大边缘视场的照度下降远远快于中心视场，并导致边缘视场畸变、像散严重甚至引入高级像差。对于这一问题，不少文献采取引入折衍射面或自由曲面的方法予以解决，这些方法从设计层面能很好解决上述问题，但在实际加工检测时，往往难以达到软件仿真的效果。本文通过在适当的透镜表面加入二次非球面和高次非球面，在达到消除轴外像差的同时，确保了后期工程应用的可行性和加工检测精度。同时，为了满足大视场成像系统的要求，探测器像面采用多片探测器拼接技术，实现大面阵成像。这一技术目前已经投入实际工程使用。

2 设计结果与分析

在完成结构选型、光焦度分配和材料选择后，可以得到光学系统初始结构，并用ZEMAX-EE软件进行优化设计。在优化过程中，为了确保匹配效率，在出瞳位置设置虚拟面，通过控制出瞳处零视场和全视场光线高度差对冷光效率进行控制。在此基础上，保证前后光焦度不变，分别以半径和厚度为变量，取系统满足设计指标和初级像差最小为约束进行优化，系统存在较大的轴外像差和边缘光线溢出现象。移动孔径光阑位置，在孔径光阑相邻透镜凹面上设置二次非球面，主要用来校正大视场引入的高级像差；同时，在远离光阑透镜表面设置高次非球面，用于校正一次成像面造成的平场曲和畸变，对系统进行多次优化。最终优化得到的光学结构如图3所示。孔径光阑位于后光组第1块透镜后表面，二次非球面位于系统第2片透镜后表面和第3片透镜前表面，高次非球面取第4、6、8次项，放置在最后一片透镜凹面处。

光学调制传递函数（MTF）和能量集中度（Enc）是评价光学结构成像质量的重要指标。图4和图5分别为系统不同视场奈奎斯特频率处MTF和Enc曲线图。从图中可以看出，系统调制传递函数在奈奎斯特频率处（16.7lp/mm）大于0.7，全视场、全谱段MTF设计均值为0.75，各视场的传函都接近衍射极限。同时系统全视场在像元尺寸内能量集中度大于0.83。图6为光学系统畸变图，可以看出全视场光学畸变小于

5%，光学像差得到了有效的控制。

地球静止轨道空间环境由于存在太阳直射和午夜杂光入侵的干扰，对杂散辐射的抑制提出要求。出瞳(Lyot)光阑使探测器在出瞳前方只能直接看到镜面，对光学系统的杂散光抑制具有较好的效果。同时为了减少光学系统的背景辐射和杂光，除了对探测器进行制冷外，需要在杜瓦里面增加冷光阑，如图7所示，并要求符合出瞳和冷光阑尽量匹配的原则。

该大视场结构出瞳直径大小为69.998 mm。使用的冷光阑位置与之重合，冷光阑单边留0.25 mm余量，直径取70.25 mm。在该位置0°视场对应的投影面积的直径为69.434 mm。由此可以计算出焦平面上零视场的像元相对应的冷光阑效率为97.7%。全视场与零视场出瞳大小如图8、图9所示。因为孔径张角是随像元位置变化的，可以通过ZEMAX-EE光线追迹得出非零视场位置的像元对应的冷光阑效率大于97.7%，系统整体的平均冷光阑效率优于98%。

3 温度适应性分析

红外光学系统装调环境为20°C，工作环境为-5°C±2°C。随着温度降低，镜间距、透镜厚度变小，材料折射率、曲率半径也发生变化，因此，温度的变

化必然会导致传统装调方式所确定的系统焦面发生离焦，造成像质下降。

通过系统仿真分析，以最后一片透镜后表面为基准，焦面与透镜筒不直接相连，也即温度变化时后工作距不发生变化。当环境温度变为-5°C时原始焦面处MTF曲线如图10所示。

从图中可以看出，系统MTF比设计值有明显降低，且不满足总体技术指标要求，也就说明了，在焦面位置不变情况下，难以确保加工装调环境下与工作环境下像质均良好。为了解决该矛盾，可采取焦面预置措施，装调过程中使实际焦面位于光学系统的非理想成像位置，以此保证低温真空环境下成像质量良好。

常温条件下镜头设计后工作距为41.6812 mm，低温环境下，最佳焦面距离最后一片透镜后表面距离为41.9572 mm，装调过程中，可将焦面预置在低温环境下最佳焦面位置。经过预置，低温环境下焦面处MTF曲线如图11所示。

通过仿真分析可知，通过预置焦面可确保红外镜头在低温真空环境下像质良好。实际工程研制过程中，具体预置位置要参考光学系统仿真计算结果并通过低温焦面调试过程确定。

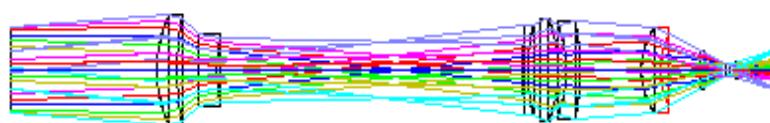


图3 光路追迹图

Fig.3 Diagram of ray trace

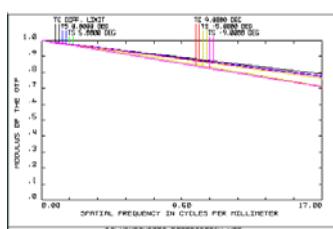


图4 光学系统 MTF 曲线

Fig.4 MTF curves of optical system

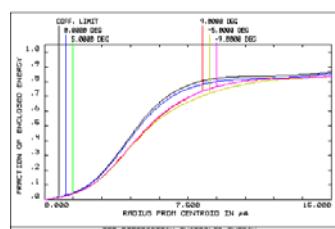


图5 系统能量集中度曲线图

Fig.5 Encircled energy distribution

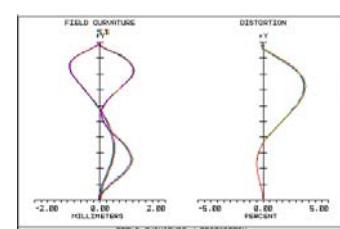


图6 系统畸变曲线图

Fig.6 Distortion of optical system

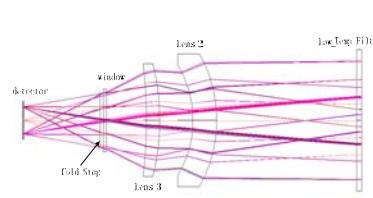


图7 系统出瞳位置示意图

Fig.7 Schematic drawing of exit pupil position

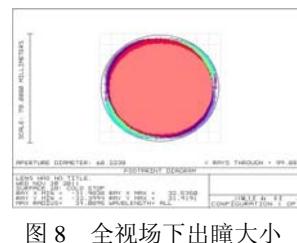


图8 全视场下出瞳大小

Fig.8 Exit pupil size in Full field

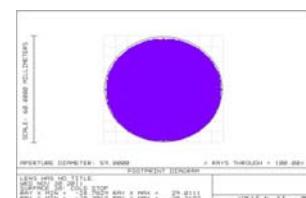


图9 零视场下出瞳大小

Fig.9 Exit pupil size in zero field

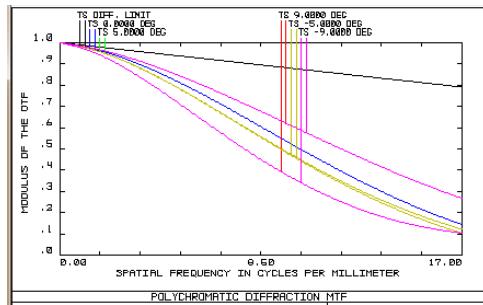


图 10 -5°C 原始 MTF 曲线图

Fig.10 The original value of MTF curves in -5°C

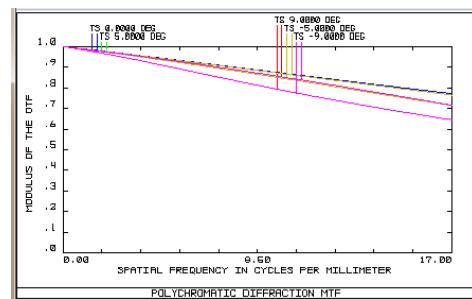


图 11 像面预置后 MTF 曲线图

Fig.11 MTF curves after image plane defocused in -5°C

4 结论

本文根据静止轨道对地观测系统的特点和需求, 运用二次成像光学结构的求解方法和红外材料消像差原理, 合理地确定了光学系统的初始结构和红外材料的组合方式; 结合目前加工工艺水平, 选择适当的非球面位置和阶次, 静止轨道大视场凝视成像光学结构的设计。设计结果表明: 该成像系统光学传递函数在奈奎斯特频率处值大于 0.7, 接近衍射极限, 能量集中度高于 83%、冷阑匹配效率优于 98%, 成像效果理想, 并具有工艺可实现性。随着面阵探测器技术的不断发展, 该系统对我国下一代空间遥感、探测、天文仪器的发展有着显著的技术的积累和促进作用。

参考文献:

- [1] Moody J A. SBIRS Background: Achieving affordable operational requirements on the SBIRS program[J]. AU/ACSC, 1997, **0548**: 5-12.
- [2] Andreas J E. SBIRS system of systems[C]//IEEE, 1997(5): 429-438.
- [3] Cousins D, Cafferty M S, et al. GOES image upgrade design for minimum system impact[C]//SPIE, 1996, **2812**: 376-341.
- [4] Goran L Pilbratt. Herschel mission overview and key programmes[C]//SPIE, 2008, **7010**: 701002-1-701002-12
- [5] Ulrich Schull, Thiemo Knigge. GEO-Oculus: A mission for real-time monitoring through resolution imaging from GEO orbit[Z].
- [6] 游思梁, 裴云天, 陈桂林. FY-2 卫星载扫描辐射计午夜杂散光的分析[J]. 光学技术, 2006, **32**(5): 688-691.
You Si-liang, Pei Yun-tian, Chen Gui-lin. Analysis on stray radiation in the FY-2 imager during midnight[J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(5): 688-691.
- [7] 杨军. 我国“风云”气象卫星及其应用的回顾与展望[J]. 航天器工程, 2008, **17**(3): 23-28.
Yang Jun. Development and applications of China's Feng Yun(FY) meteorological satellite[J]. *Spacecraft Engineering*, 2008, **17**(3): 23-28.
- [8] 常军, 刘莉萍, 王涌天, 等. 大视场、大口径双波段红外非制冷光学系统[J]. 红外与毫米波学报, 2006, **25**(3): 170-172.
Chang Jun, Liu Liping, Wang Yongtian, et al. Dual-band infrared optical system with large field-of view and aperture[J]. *J. Infrared and Millimeter Waves*, 2006, **25**(3): 170-172.
- [9] 罗金平, 王合龙, 刘欣, 等. 二次成像光学被动无热化设计[J]. 光电与控制, 2012, **19**(4): 85-88.
Luo Jin-Ping, WANG He-Long, LIU Xin, et al. Passive optical athermalization design in re-imaging optical system[J]. *Electronics Optics & Control*, 2012, **19**(4): 85-88.
- [10] 张建忠, 杨乐, 郭帮辉, 等. 基于谐衍射的红外中波/长波双波段视景仿真光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(7): 1758-1765.
Zhang Jianzhong, Yang Le, Guo Bang-hui, et al. Optical design of MWIR/LWIR scene projector with harmonic diffraction element[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(7): 1758-1765.
- [11] 刘秀军, 张金旺, 彭垚. 中波红外光学系统无热化设计[J]. 红外技术, 2012, **34**(10): 602-607.
LIU Xiu-jun, ZHANG Jin-wang, PENG Yao. Athermal design of a MWIR optical system[J]. *Infrared Technology*, 2012, **34**(10): 602-607.
- [12] Kanagawa Y, Wakabayashi S, Tajime T, et al. Expansion of an athermal chart into a multiple system with thick lenses spaced apart[J]. *Opt. Eng.*, 1996, **35**(10): 3001-3006.
- [13] 张良, 毛鑫, 王合龙. 中波/长波双色多视场光学系统设计[J]. 红外与毫米波学报, 2013, **32**(3): 254-259.
Zhang Liang, MAO Xin, WANG He-Long. The design of MWIR/LWIR multiple FOV optical system[J]. *J. Infrared and Millimeter Waves*, 2013, **32**(3): 254-259.