

## 米级车载高分辨率光电成像系统光学设计

刘莹奇<sup>1,2</sup>, 王 志<sup>1</sup>, 刘欣悦<sup>1</sup>, 卫沛峰<sup>1</sup>

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘 要:** 研究了一套能实现机动式布站的米级车载可见光和红外高分辨率光学成像系统新方案。主系统口径 1.2 m, 采用无焦卡塞格林形式, 遮拦比 1:10; 机上中、长波红外成像通道采用共口径光谱分光、二次成像的形式, 冷阑匹配效率 100%,  $F$  数为 4; 机下成像光学系统焦距 47 m,  $F$  数为 39, 光学设计满足高分辨率与白天成像的要求, 且成像质量达到衍射极限; 各通道光学系统结构紧凑。光学设计与分析结果表明: 该套光学系统能够用于空中和空间目标的全天时移动式高分辨率可见、红外成像。

**关键词:** 大口径望远镜; 高分辨率成像; 白天成像; 移动式光电跟踪系统; 光学设计  
**中图分类号:** TB133   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1007-2276(2011)08-1512-05

## Optical design of vehicle-based high resolution E-O imaging system using meter class telescope

Liu Yingqi<sup>1,2</sup>, Wang Zhi<sup>1</sup>, Liu Xinyue<sup>1</sup>, Wei Peifeng<sup>1</sup>

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** A set of meter class aperture and vehicle-based optical system including visible, infrared imaging, which was used for motional E-O imaging, was studied. The main system aperture was 1.2 m, the form of afocal Cassegrain was adopted, and obstruction ratio was 1:10. The front aperture of on-vehicle imaging system was shared by MWIR and LWIR, then the spectrum was separately reimaged in the terminal. The  $F$  number was 4, and 100% cold shield efficiency was realized. The focal length of the off-vehicle imaging system was 47 m and the  $F$  number was 39. The optical design meet the requiemment of high resolution and daylight imaging, and the imaging quality of each channel reached diffraction limit in the off-vehicle imaging system. The optical system configuration of each channel was compact. The design and analysis results indicate that mobile high resolution imaging and all-day imaging of targets in the air and space can be realized with the optical system.

**Key words:** large aperture telescope; high resolution imaging; daylight imaging; mobile E-O tracking system; optical design

收稿日期: 2010-12-05; 修订日期: 2011-01-03

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新研究项目专项资金

作者简介: 刘莹奇(1984-), 男, 研究实习员, 博士研究生, 主要从事新型光学系统设计工作。Email: a1032510210@126.com

导师简介: 卢振武(1955-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事衍射光学等方面的研究。Email: luzw@ciomp.ac.cn

## 0 引言

对特定观测波长,望远镜口径越大,理论分辨率越高,作用距离越远。目前,地基光电望远镜越来越朝着大口径的趋势发展,然而望远镜的体积和重量通常与系统口径的立方成正比,所以,米级大口径光电望远镜一般都需要固定的基站来支持及使用<sup>[1]</sup>。随着现代光学材料和加工工业的进步,具有高刚度、抗热变、轻型等特点的米级移动式光电望远镜已成为可能。米级车载移动式光电望远镜平台的可拆装和机动性特点,使其系统部件还可以通过空运、船载到达船上、海岛或者其他传统方式难以接近的危险和恶劣环境,远程控制使用,系统平台能够在最佳时间和地点对有限时间段内出现的目标进行观测,满足对突发事件监测的应急需要。另一方面,由于地球的遮挡,还有高亮度天空背景和白天强湍流大气条件的限制,传统的地基卫星光电成像系统一般都工作在昼夜分界处,每天有效观测时间仅限制在 3~4h,更有一些卫星只在白天通过特定观测地点或者几周才在昼夜分界处出现,这极大地限制了观测效率及设备的使用率<sup>[2]</sup>。多波段成像系统具有优于单色成像系统的探测能力和复杂环境背景下的目标识别与抗干扰能力,增加系统的应用范围<sup>[3]</sup>。根据实际需要,提出的米级车载高分辨率光电成像系统是一种能实现机动式布站的大口径可见光、近、中和长波红外全天时高分辨率光电成像系统,文中讨论并设计了一套满足以上光电成像传感新概念特点的光学系统。

## 1 光机系统组成及主要特点

米级车载高分辨率光电成像系统,主系统口径 1.2 m,采用 Bent-Cassagrain 形式,主镜采用具有高刚度、70%轻量化率的 SiC,以减轻主镜支撑结构的质量,主次镜间隔支撑采用绝热性好、轻质的碳基复合材料;为进一步减轻整机质量,系统跟踪架采用桁架结构,望远镜底座与载车一体化设计,整个系统及光学载荷布局如图 1 所示。跟踪架四通上还备有多波段捕获电视光学系统,起到大视场捕获、粗跟踪与瞄准目标的作用。

主系统平面三镜可根据任务需要进行旋转,分别将主光路引到两个不同的成像单元。其中一路通过系统的水平轴和库德光路的折转引到机下的自适

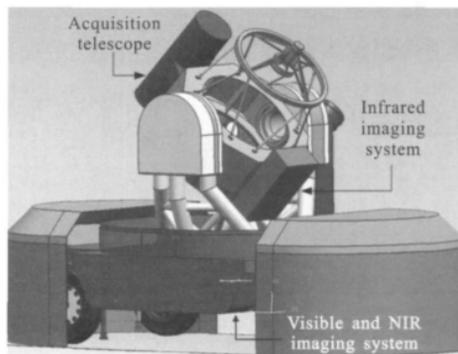


图 1 米级车载高分辨率光电成像系统图  
Fig.1 Diagram of vehicle-based high resolution E-O imaging system using meter class telescope

应光学系统,实现对目标的高分辨率成像,并具备白天对目标成像的能力,设计光路如图 2 所示。

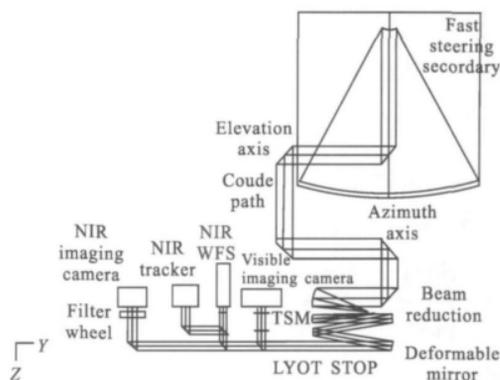


图 2 机下高分辨率成像光学系统光路图  
Fig.2 Optical path diagram of the off-vehicle high resolution imaging system

另一路光路通过四通直接进行中、长波红外成像,相对于前一成像通道,定义此通道为机上成像单元,该单元可实现对目标的中、长波红外成像及红外特性测量,终端光路位置及设计光路如图 3 所示。

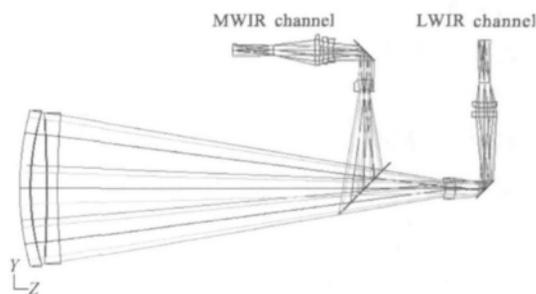


图 3 机上红外成像单元光路图  
Fig.3 Optical path diagram of the on-vehicle infrared imaging channel

## 2 光学系统设计及分析

主要阐述了主光学系统、机上红外和机下可见、近红外成像单元的光学设计。光学设计在满足总体任务需求的情况下,力求精简紧凑与机械结构合理衔接,符合机动可拆装特点。

### 2.1 主光学系统设计

主光学系统采用无焦 Mersenne-Cassegrain 形式,无焦系统有利于系统的装调和整机拆装之后各个分系统之间的光路对接。其次,主次镜均为抛物面面型,能够降低大口径主镜、凸面型次镜的检测和加工难度<sup>[1]</sup>。系统的视场角比较小,因此设计次镜遮拦比约为 1:10,以提高系统像质。此外,为次镜、三镜设计锥形遮光罩,以减小杂散光对各成像通道的影响。

### 2.2 机上红外成像光学系统设计

机上红外成像单元的设计参数如表 1 所示。

表 1 红外成像光学系统设计参数

Tab.1 Design parameters of the infrared imaging optical system

| Parameter                 | MWIR channel | LWIR channel |
|---------------------------|--------------|--------------|
| Bandpass/ $\mu\text{m}$   | 3-5          | 8-12         |
| Detector                  | Cooling      | Cooling      |
| Focal length/mm           | 4 800        | 4 800        |
| Active pixels             | 320×240      | 320×240      |
| F number                  | 4            | 4            |
| Pixel size/ $\mu\text{m}$ | 30           | 30           |
| Field of view/(°)         | 0.14         | 0.14         |

机上红外成像单元采用共用前组大口径透镜和光谱分光二次成像的方式,光路如图 3 所示。共用光路部分的像差和后组一起校正,玻璃材料采用 Ge、ZnSe 和 ZnS。分色片以 ZnSe 作为基底材料反射中波红外、透射长波红外,倾斜放置在光路中的分色片采用楔形基片,以消除轴外视场的像散。在一定范围内优化系统光学零件曲率使得各表面 YNI 大于或接近 1,以减小冷像对系统的影响<sup>[4]</sup>。光学设计像质接近衍射极限,如图 4、图 5 所示。

在一次像面处加入视场光阑并降低其发射系数,消除视场外杂散光。用 TRACEPRO 软件对系统

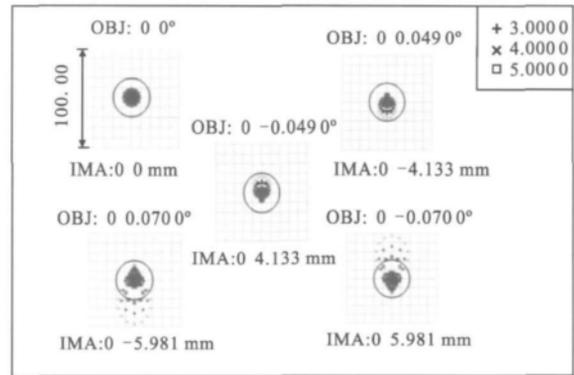


图 4 中波红外通道点列图

Fig.4 Spot diagram of the MWIR channel

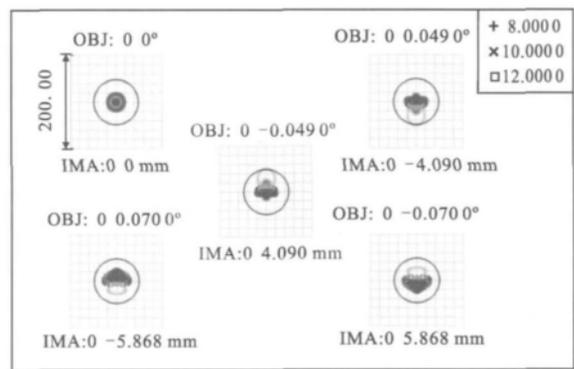


图 5 长波红外通道点列图

Fig.5 Spot diagram of the LWIR channel

进行热分析,对镜筒和分色片进行不同温度制冷,以提高像质。光学设计主要考虑光瞳和冷阑的匹配和热辐射抑制问题。系统具有 100%的冷光阑效率,并且具有结构紧凑、同轴度和光轴稳定性好的优点。中波红外通道后组透镜材料采用 Si 和 Ge,长波通道采用 Ge 和 ZnSe。

### 2.3 机下可见、近红外成像光学系统设计

大口径望远镜的分辨率受大气扰动的影响,实际分辨率远远达不到衍射极限,白天成像分辨率受大气的影响更大<sup>[2,5]</sup>。自适应光学利用波前探测技术,控制 Tip/Tilt 镜对波前倾斜校正,控制变形镜对波前高阶相位误差校正。该方案机下成像光路加入自适应光学系统,以克服大气扰动对光学成像质量的影响。

自适应光学系统由于受到大气等晕角的限制,视场一般都在角秒量级。大气等晕角为:

$$\theta = 0.62 r_0 / h \quad (1)$$

式中: $r_0$ 为大气相干长度; $h$ 为湍流层相对于望远镜的高度。长春地区的大气相干长度一般在 8~10 cm<sup>[6]</sup>,假设  $h=10$  km,则等晕角为 1~2"。自适应光学系统

的设计要求保证系统入瞳、波前传感器微透镜阵列、变形镜三者位置相互共轭。目前自适应光学对可见光波段进行波前校正成像的难度较大。另一面,白天高亮度天空背景波段主要集中在可见短波波段,所以该方案波前探测、校正成像通道的设计波段偏于近红外。此外,为了进一步提高白天目标与背景的对比度,增加了一个偏向于短波红外的窄带近红外成像通道,以提高系统白天成像的信噪比。机下可见、近红外光学系统设计参数如表 2 所示。

表 2 机下可见、近红外光学系统设计参数

Tab.2 Design parameters of the off-vehicle visible and NIR imaging optical system

| Parameter                  | Visible channel | NIR channel |
|----------------------------|-----------------|-------------|
| Bandpass/ $\mu\text{m}$    | 0.7-0.935       | 1.12-1.38   |
| Focal length/m             | 46.97           | 48.00       |
| Active pixels              | 512 x 512       | 512 x 512   |
| Pixel size/ $\mu\text{m}$  | 16              | 25          |
| Field of view/( $^\circ$ ) | 0.85            | 1.3         |
| IFOV/ $\mu\text{rad}$      | 0.34            | 0.52        |

库德光路将主系统光路通过折转引向机下可见、近红外成像光学系统,采用全反射形式,系统原理设计光路如图 2 所示。机下中继光路加入无焦离轴三反系统,起到压缩主光路光束、将系统光瞳引向变形镜和波前传感器微透镜阵列、并校正系统轴外视场慧差和像散的作用,光路图如 6 所示,经无焦离轴三反中继镜后的系统轴上、轴外波像差均小于 $1/24\lambda$ ,像质达到衍射极限,如图 7、图 8 所示。

近红外跟踪器提取波前受大气扰动存在的大量倾斜误差,控制快反次镜偏摆和平面镜横向移动,使系统稳像跟踪。波前探测器提取波前的高阶相位误

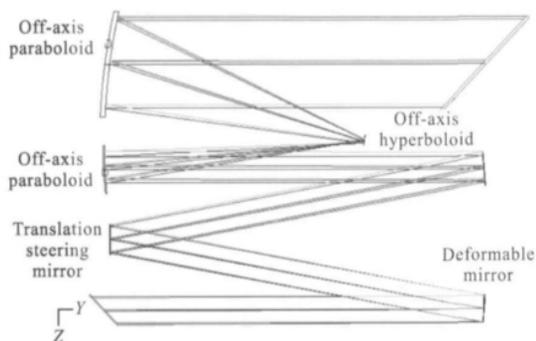


图 6 中继光学系统光路图  
Fig.6 Optical path of the relay optics

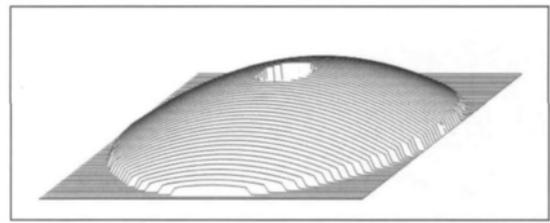


图 7 中继光学系统轴上波前  
Fig.7 On-axial wavefront of the relay optical system

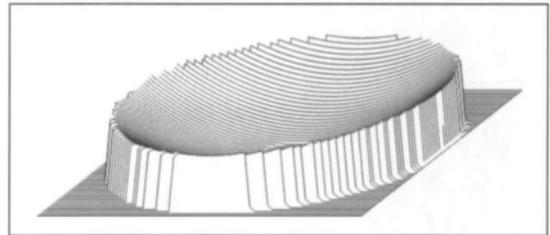


图 8 中继光学系统轴外波前  
Fig.8 Off-axial wavefront of the relay optical system

差,控制变形镜自适应校正成像。变形镜附近加入里奥光阑,用来抑制衍射杂散光。可见光、近红外成像通道、波前探测器和图像跟踪器均需加入相应的耦合光学系统,与各自探测器匹配。波前传感器耦合光学系统采用二次成像的方式压缩光束口径,使变形镜光瞳与微透镜阵列共轭并匹配,如图 9 所示。

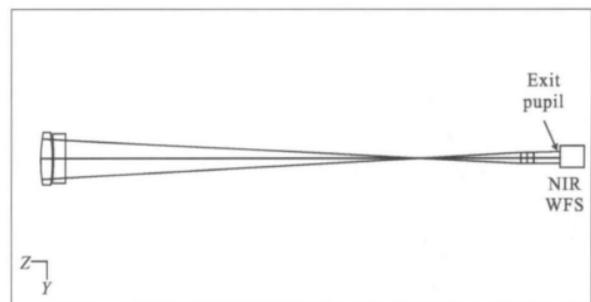


图 9 近红外波前传感器中继光学系统光路图  
Fig.9 Optical path diagram of the NIR wavefront sensor relay optical system

为减小系统长度,可见光、近红外成像和跟踪器耦合光学系统形式采用摄远型,图 10 为可见光成像通道光路图。可见光成像通道的点列图如图 11 所示,外围的实线圆为爱里斑,各视场弥散斑均方根值半径小于 $16\mu\text{m}$ 。可见光成像通道的传递函数如图 12 所示,各视场传递函数与衍射极限重合,像质达到衍射极限。其他通道的光学成像像质评价均比较理想,能达到衍射极限。

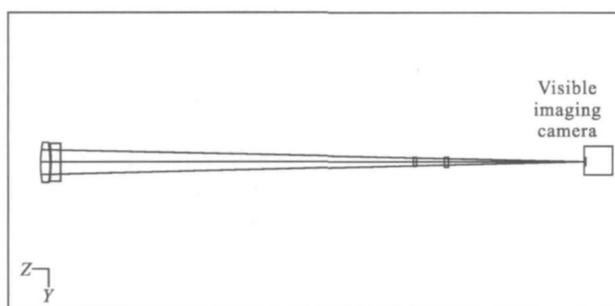


图 10 可见光通道光学系统光路图

Fig.10 Optical path diagram of visible channel optical system

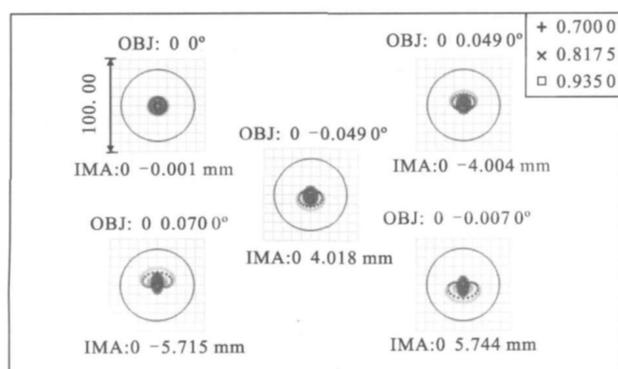


图 11 可见光通道点列图

Fig.11 Spot diagram of the visible channel

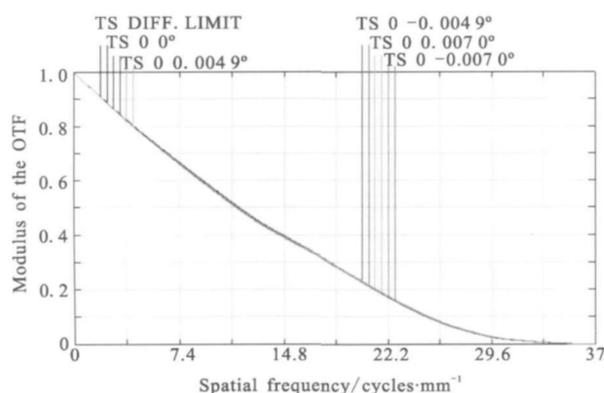


图 12 可见光通道传递函数

Fig.12 MTF of the visible channel

所设计的机下可见光通道成像光学系统焦距为 46.97 m,  $F$  数为 39.1。系统像面上的衍射极限分辨率:

$$D = 1.22\lambda F/\# \quad (2)$$

式中:  $\lambda$  为波长。如果取  $\lambda = 818 \text{ nm}$ , 则可以计算出其在像面处的线分辨率为  $39 \mu\text{m}$ , 成像 CCD 的像元尺寸为  $16 \mu\text{m}$ , 约为 2.4 倍采样, 满足采样定理。由以上分析可以得出: 机下成像通道性能优良, 设计合理, 满足应用要求。最后还对系统进行了公差分析,

结果表明: 该设计方案能够满足目前国内的光学检测、加工和装调现状。

### 3 结论

结合总体提出的光电传感新概念和技术需求, 对米级车载大口径高分辨率光电成像系统的光学载荷组成和技术指标进行了合理分配。对机上中、长波红外与机下可见、近红外高分辨率成像光学系统的特点和设计关键问题进行了阐述, 由光学设计及分析结果可以看出: 光学设计质量较好, 并且光学系统紧凑, 能够与机械结构合理衔接。该套光学系统具有大口径、多功能、多波段、全天时、杂散辐射光抑制能力强、分辨率高、像质好等优点, 具有白天对低轨人造目标进行高分辨成像的能力, 能够用于空中和空间目标的全天时移动式高分辨率可见、红外成像及特性测量。

### 参考文献:

- [1] Wilson R N. Reflecting Telescopes Optics[M]. Germany: Springer, 1996.
- [2] Gonglewski J D, Highland R G, Dayton D C, et al. Daylight imaging through atmospheric turbulence[C]//SPIE, 1996, 2827: 152-161.
- [3] Wang Haitao, Geng Anbing. Unified infrared imaging optical system of dual spectral[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 489-492. (in Chinese)  
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.
- [4] Li Ronggang, Yang Dongliang, Liu Lin, et al. Design of dual-field-of-view optical system for mid-wave infrared focal-plane arrays[J]. *Laser and Infrared*, 2009, 39(6): 640-642. (in Chinese)  
李荣刚, 杨栋梁, 刘琳, 等. 中波红外双视场光学系统的设计[J]. 激光与红外, 2009, 39(6): 640-642.
- [5] Zhou Renzhong, Yan Jixiang. Theory of Adaptive Optics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996. (in Chinese)  
周仁忠, 阎吉祥. 自适应光学理论 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.
- [6] Chen Hao, Xuan Li, Hu Lifa, et al. Design of open-loop liquid crystal adaptive optical system for 1 200 mm telescope [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(1): 29-33. (in Chinese)  
陈浩, 宣丽, 胡立发, 等. 1 200 mm 望远镜开环液晶自适应光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 29-33.