

文章编号: 1001 - 9014(2008)01 - 0039 - 03

# 大线视场大相对口径红外成像系统的 optical 设计

王立辉, 郁蕴健, 陆段军

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘要:** 在同轴三反射光学系统基础上, 采用视场离轴方式, 设计了一个在地球同步轨道上对地观测的空间离轴三反射光学系统. 该系统同时具有大线视场和大相对口径的特点, 设计结果表明, 成像质量达到了衍射极限.

**关键词:** 红外成像; 光学设计; 离轴三反射系统; 大线视场; 大相对口径

**中图分类号:** O435 **文献标识码:** A

## OPTICAL DESIGN OF IR IMAGING SYSTEM WITH LARGE LINEAR FIELD OF VIEW AND LARGE RELATIVE APERTURE

WANG Li-Hui, YU Yun-Jian, LU Duan-Jun

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** Based on the coaxial three-reflective system, a space off-axial three-reflective system applied to observe the earth on the geostationary orbit was designed by means of field of view off-axis form. The characteristics of the system are both large linear field of view and large relative aperture. The results of design indicate that the quality of imaging is so high as to have arrived at the diffraction-limitation.

**Key words:** IR imaging; optical design; off-axial three-reflective system; large linear field of view; large relative aperture

### 引言

在空间对地观测领域中, 对目标的空间分辨率和时间分辨率要求越来越高, 传统的利用单元探测器进行二维扫描的方法已经很难满足要求. 而最新的红外焦平面阵列往往只能在某一特定波段内使用. 对于工作在较长波段的热探测器, 目前只有线阵的技术比较成熟. 综合各方面的因素来考虑, 在某些特定的场合, 用大的线视场进行一维扫描是目前最可取的探测模式<sup>[1]</sup>.

系统的口径取决于目标辐射的强弱及探测距离要求, 系统的焦距则与观测距离、线分辨率及接收器尺寸等有关. 口径一定, 焦距愈长则相对口径愈小, 光学系统的设计及加工相对容易, 但对同一角视场而言, 线视场尺寸就愈大, 线阵接收器的长度就愈长, 同时, 光学系统总尺寸愈长, 这对于航空航天是非常不利的. 从另一方面看, 为了减小探测器

的本征噪音, 像元尺寸往往很小, 如果像元对应的瞬时视场一定, 则像元尺寸愈小, 焦距就愈短. 因此, 焦距长短的选择是要综合考虑各方面的因素而定. 总的来讲, 红外探测系统的焦距往往只能很短, 也就是光学系统的相对口径往往要很大.

本文就以工作在地球同步轨道上的红外探测系统为背景<sup>[2]</sup>, 设计出了一个大的线视场大相对口径的红外成像系统, 并得到了很好的成像质量.

### 1 系统分析

由于该系统接收的辐射波段非常宽, 包括可见光, 中短波红外及长波红外, 如果采用折射式光学系统, 不但能透过红外辐射的光学材料很难获取, 选择余地少, 价格昂贵, 而且还会产生很严重的色差, 校正十分困难. 而反射式系统不会产生色差, 材料选择简单, 孔径可以做得很大, 易于实现轻量化设计, 对温度等环境因素变化的适应性强, 因此对于较长波

收稿日期: 2007 - 01 - 21, 修回日期: 2007 - 12 - 18

基金项目: 航天预研项目 (O0782020700)

作者简介: 王立辉 (1982-), 男 (满族), 辽宁北镇人, 博士生, 主要从事红外光电技术研究.

Received date: 2007 - 01 - 21, revised date: 2007 - 12 - 18

段的红外成像,宜选用全反射的光学系统。

光学系统在保证一定成像质量要求的同时,还应该具有最简单的形式和最少数量的光学元件。首先考虑过去常用的两反射镜系统,它结构型式简单,但系统自变量少,只有轴上点成像符合理想,视场不能做的很大。然后是同轴三反射系统,结构也比较简单,但成像质量受次镜的遮拦影响较大,辐射利用率也不高,一方面不能有很大的视场,另一方面还要增加口径来保证有一定的接收辐射能量。而离轴三反射系统,不但可以通过光阑离轴或视场离轴,完全消除系统的遮拦,可以做到大视场和大口径,而且系统的自变量多达 8 个<sup>[3]</sup>,在满足焦距、球差、慧差、像散及场曲的条件下,还剩余 3 个可变参数来满足光学系统的结构要求。

离轴三反射系统是在同轴三反射系统的基础上进行离轴、优化得到的。主要有两种方法<sup>[4]</sup>:一是将光阑置于主镜上,光阑离轴;二是将光阑置于次镜上,通过视场的倾斜来避免中心遮拦,光阑不离轴。采用光阑离轴的方法,虽然可以使系统结构变得紧凑,但是在较大视场的情况下,成像质量下降的很快。而视场离轴的三反射系统具有更强的像差校正能力,视场大,成像质量好,比较适合大线视场和大相对口径的要求。

## 2 设计步骤

首先要确定同轴三反射系统的结构参数。一般来说,给定的有关结构方面的条件和系统的长度要求的关系更加直接明了。可以用三个间隔为给定的条件,即把主镜到次镜的距离  $d_1$ ,次镜到三镜的距离  $d_2$ ,三镜到像面的距离  $d_3$  作为已知量。规定光线入射的方向从左向右为正,则  $d_1 < 0$ ,  $d_2 > 0$ ,  $d_3 < 0$ 。给出下面三个等式<sup>[5]</sup>:

$$\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} = s_4 \quad (1)$$

$$\frac{r_1 r_2 - 2 r_2 d_1}{2 r_1 - 4 d_1 - 2 r_2} - d_2 = \frac{1}{f} \quad (2)$$

$$\frac{2(r_1 r_3 - 2 r_3 d_1 - r_2 r_3) + 1}{2 r_1 r_2} = \frac{d_3}{f} \quad (3)$$

根据系统要求的匹兹万和数  $s_4$ ,总焦距  $f$  和给定的 3 个间隔  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  作为已知量代入方程 (1), (2), (3) 中,可以求出 3 个镜面在顶点处的曲率半径  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ 。由  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ ,  $d_1$ ,  $d_2$  和  $f$  可以求出次镜对主镜的遮拦比  $\beta_1$ ,第三镜对次镜的遮拦比  $\beta_2$ ,次镜的放大率  $\beta_1$ ,第三镜的放大率  $\beta_2$ 。再由求出的  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,

$\beta_1$ ,  $\beta_2$ , 根据系统要求的球差  $s_1$ 、慧差  $s_2$ 、像散  $s_3$  的值即可求得三个反射镜面的二次非球面系数  $-e_1^2$ ,  $-e_2^2$ ,  $-e_3^2$ 。至此,系统的 8 个结构参数  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ ,  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $-e_1^2$ ,  $-e_2^2$ ,  $-e_3^2$  就全部确定了<sup>[6]</sup>。值得注意的是,由于视场离轴的三反系统采用的是无中间成像面的原始同轴结构,在计算时,系统焦距  $f$  应取负值。

求出初始结构参数后,将光阑置于次镜上,在保证焦距为定值的条件下,对系统的结构参数进行微量的优化,即可得到很好的像质。然后让中心视场离轴,选取合适的倾斜角,避免中心遮拦,同时适当调整各个镜面的离轴量和倾斜角,使结构更加合理,再次进行反复的优化,直到整个系统无遮拦并且成像质量达到衍射极限为止。在优化过程中,应尽量保持间隔  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  不变,否则,像差平衡的结果会大幅度增加  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ , 使系统总长度变大,也不能无限制的优化视场和各个镜面的倾斜角,否则系统会减小离轴量趋向于同轴系统来达到提高像质的目的。

## 3 设计结果

根据设计要求和所选用的探测器,该光学系统应满足下列技术指标:

- 1) 焦距  $f = 41\text{mm}$ , 通光口径  $D = 20\text{mm}$ ;
- 2) 视场角:  $x$  方向  $\pm 9^\circ$ ;  $y$  方向  $\pm 0.035^\circ$ ;
- 3) 工作波段:  $0.3 \sim 50\mu\text{m}$ ;
- 4) 成像质量良好,达到衍射极限。

这是一个大线视场大相对口径的系统,考虑到系统的工作环境,取  $d_1 = -55\text{mm}$ ,  $d_2 = 55\text{mm}$ ,  $d_3 = -65\text{mm}$ 。并取  $s_4 = 0$ ,  $f = -41\text{mm}$ , 通过方程 (1), (2), (3) 解得初始结构如表 1 所示:

根据前面所述的设计步骤进行离轴与优化的操作。选取中心视场的倾斜角为  $-9.5^\circ$  优化后的最终结构参数如表 2 所示:

表 1 初始结构参数

Table 1 Original structural parameters

	半径 (mm)	间距 (mm)	二次非球面系数 ( $-e^2$ )
主镜	-362.9613	-55	-2.3618
次镜	-64.3422	55	3.0487
三镜	-78.2057	-65	0.1815

表 2 最终结构参数

Table 2 Final structural parameters

	半径 (mm)	间距 (mm)	二次非球面系数 ( $-e^2$ )
主镜	-322.924528	-54.540733	-2.318648
次镜	-56.967990	54.412693	1.367464
三镜	-76.738196	-65.141096	0.177212

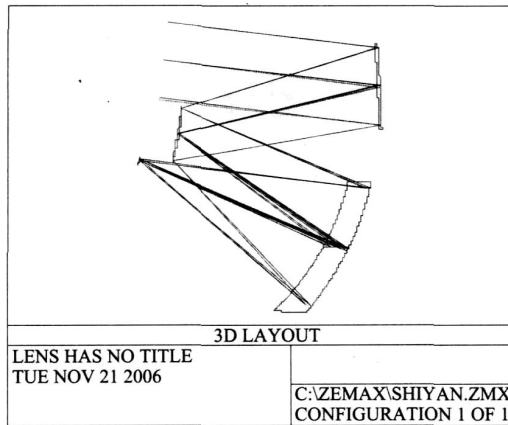


图 1 系统三维结构图  
Fig 1 System 3D Layout

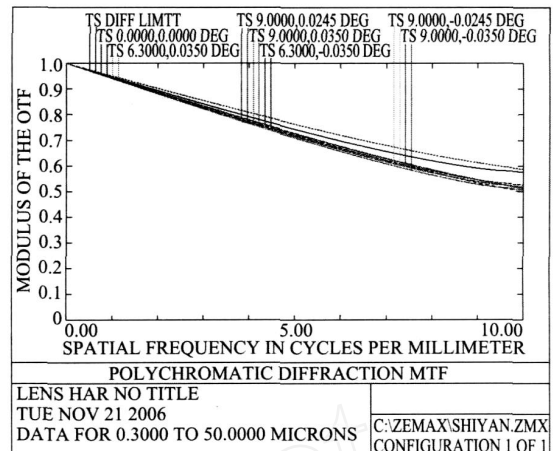


图 3 各视场全波段传递函数曲线图  
Fig 3 The MFT curve of every field and all spectrum band

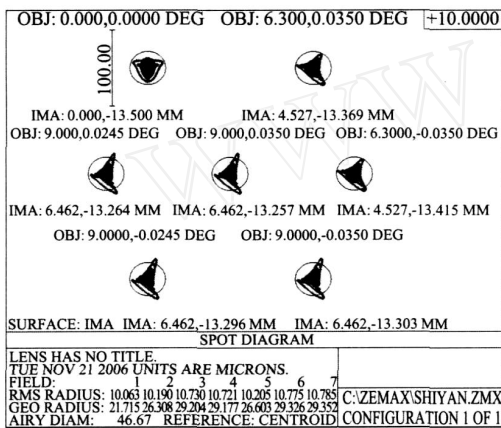


图 2 点列图  
Fig 2 Spot diagram

各个反射镜面经过截取以后,系统的三维结构如图 1 所示:

该系统主镜为双曲面,次镜和三镜为椭球面.主镜大小为: 46.36mm × 22mm,次镜大小为: 15.2 mm,三镜大小为: 60mm × 34mm.

为了对系统的像质进行评价,采用了具有代表性的 7 个视场,图 2 是各个视场的点列图.(黑圆圈代表峰值波长 10μm 的衍射极限)

图 3 是系统的传递函数曲线,在 10Lp/mm 时达到了 0.52(衍射极限为 0.58).

从各个图中可以看出,系统在整个波段和视场内成像质量接近衍射极限,而且结构合理,无遮挡.

通过实验发现,一开始并不能把中心视场的倾斜角设为最大,否则优化工程中很难找到最优解,应该先取较小的倾斜角,并不断优化,使系统逐步达到无遮挡.其它镜面的离轴量和倾斜角也最好为手动控制.

对于一个大视场的系统,往往畸变与传递函数不能同时兼顾.该系统的畸变在最大视场处为 2.28%,可采用空间变换,灰度插值等数字图像技术进行畸变校正.

考虑到系统的成本和加工的难度,本实验中采用了标准的二次曲面.为了进一步提高像质,还可以最大限度的使用可变量,即每个镜面采用高次非球面项.

#### 4 结论

离轴三反射系统具有无色差、平像场、无中心遮挡、大视场等优点.用本文的设计方法可以设计出具有较高成像质量大线视场大相对口径的红外成像光学系统,从而充分发挥此类离轴三反射系统的优越性.该设计实例特别适合于在地球同步轨道上采用线阵探测器对地球进行推扫的测量方式.这样在充分发挥此类系统优势的同时,又可以克服系统在另一个方向上视场相对较小的缺陷.随着对离轴三反射系统研究的进一步深入和非球面镜加工技术的进一步完善,相信此类系统会有越来越大的用途.

以上所有的结构优化都是在 zemax 软件上进行的.

#### REFERENCES

[1] PAN Jun-Hua Design of the optical system with large relative aperture and large linear field of view[J]. *Engineering Science* (潘君骅.大相对口径大线视场光学系统的设计.中国工程科学), 2000, 2(8): 89—91.

[2] Bell D A. Geostationary earth radiation budget instrument [J]. *SPIE*, 1994, 2209, 236—242

(下转 46 页)

本文提出了将基于规则构型的二维元胞自动机模型应用于红外弱小目标图像分割. 实验表明, 提出的算法能够有效地分割出多个弱小目标区域, 有利于下一步的目标识别和跟踪. 另外, Preston等<sup>[10]</sup>曾指出: 若把CA算法在CA机器上实现, 计算复杂度是一个常量乘以迭代次数, 即 $O(n \cdot a)$ . 本文中, CA增强算法仅需要一个时间步, 则计算复杂度为 $O(a)$ , 所以CA增强算法是非常高效的. 实际上, 本文只是把CA模型应用到图像对比度增强, 没能完全应用到图像分割, 从而也没能彻底发挥出CA模型的高效性. 下一步工作考虑设计合适的局域转换规则, 经过多步演化, 可以直接分割出图像中的多个弱小目标区域.

## REFERENCES

- [1] ZHOU Cheng-Hu, SUN Zhan-Li, XIE Yi-Chun *Research on geography cellular automatic* [M]. Beijing: Science Press(周成虎, 孙战利, 谢一春. 地理元胞自动机研究. 北京: 科学出版社), 1999.
- [2] Hernandez Gonzalo, Hans J Hermann Cellular automata for elementary image enhancement [J]. *Graphical Models and Image Processing*, 1996, **58**(1): 82—89.
- [3] Wongthanavasu S, Sadananda R. A CA-based edge operator and its performance evaluation [J]. *J. Vis Comm un In-*  
*age R*, 2003, (14): 83—96
- [4] Nakano T, Morie T, Nagata M, *et al* A cellular-automaton-type image extraction algorithm and its implementation using an FPGA [A]. *In Proceeding of IEEE*, 2002: 197—200.
- [5] Chattopadhyay Santanu, Shelly Adhikari, Sabyasachi Sengupta, *et al* Highly regular, modular, and cascable design of cellular automata-based pattern classifier [J]. *IEEE Transactions on Very large Scale Intergration Systems*, 2000, **8**(6): 724—735.
- [6] Rosin Paul L. Training cellular automata for image processing [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, **15**(7): 2076—2087.
- [7] YANG Lei, YANG Jie, LNG Jian-Guo, *et al* Real-time method for detecting multi-small targets in infrared large sight field [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (杨磊, 杨杰, 凌建国, 等. 一种红外大视场环境下的多小目标实时检测方法. 红外与毫米波学报), 2006, **25**(5): 377—381.
- [8] TAO Wen-Bing, JIN Hai Ship infrared object segmentation based on mean shift filtering and graph spectral clustering [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (陶文兵, 金海. 基于均值漂移滤波及谱分类的海面舰船红外目标分割. 红外与毫米波学报), 2007, **26**(1): 61—64.
- [9] CHEN Zhong-Bi, ZHANG Qi-Heng An image segmentation algorithm suitable for multi-object detection [J]. *Opto-Electronic Engineering* (陈忠碧, 张启衡. 一种适合于多目标检测的图像分割方法. 光电工程), 2004, **31**(5): 34—37.
- [10] Preston Jr Basics of cellular logic with some applications in medical image processing [J]. *Proc IEEE*, 1979, (67): 826—857.
- [3] CHANG Jun, LU Li-Ping, WANG Yong-Tian, *et al* Dual-band infrared optical system with large field-of-view and aperture [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (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. 红外与毫米波学报), 2006, **25**(3): 170—172.
- [4] GUO Yong-Hong, SHEN Mang-Zuo, LU Zu-Kang A study on off-axis three-mirror system [J]. *Opto-Electronic Engineering* (郭永洪, 沈忙作, 陆祖康. 离轴三反射镜系统研究. 光电工程), 1999, **26**(Sup): 45—48.
- [5] LU L in The study on design of the three-reflective system [D]. Soochow University, Master Dissertation (刘琳. 长焦距反射式望远镜设计研究. 苏州大学硕士学位论文), 2002.
- [6] LU L in, XU Meng-Qiu, SHEN Wei-Min Approach to increase the image performance of the uncoaxial three-mirror reflective system [J]. *Optical Technique* (刘琳, 薛鸣球, 沈为民. 提高离轴三反射镜系统成像质量的途径. 光学技术), 2002, **28**(2): 181—184.

(上接 41页)