

长焦距同轴四反射镜光学系统设计

陈 丽^{1,2}, 刘 莉^{1,2}, 赵知诚^{1,2}, 李瀛搏³, 傅丹鹰⁴, 沈为民^{1,2}

1. 苏州大学 物理与光电·能源学部 教育部现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006;
2. 苏州大学 物理与光电·能源学部 江苏省先进光学制造技术重点实验室, 江苏 苏州 215006;
3. 北京空间机电研究所, 北京 100076; 4. 航天东方红卫星有限公司, 北京 100094)

摘要: 低成本、高性能对地遥感微纳卫星是当前研究和开发的热点, 为适应微纳卫星平台, 要求空间相机具备小型、轻量化的特点。在其体积和质量的限制下, 设计结构尽可能紧凑的长焦距大视场望远镜是成功研制高分辨率对地遥感光学相机的关键, 研究利用同轴四反射镜系统解决这一问题的可能性。首先, 介绍无二次遮拦同轴四反射镜望远镜的组成与工作原理; 基于近轴光学和初级像差理论, 导出几何约束条件和初级像差公式, 给出结构紧凑的长焦距同轴四反镜系统的设计思想与方法; 最后给出举例及设计结果。优化设计了全视场角 $1^\circ \times 1^\circ$ 、有效焦距 2 100 mm、 F 数为 7 的同轴四反射光学系统, 总长 228 mm, 约为有效焦距的 $1/9$, 结构简单紧凑, 像质接近衍射极限。

关键词: 光学设计; 对地遥感相机; 长焦距; 同轴四反射望远镜; 无二次遮拦
中图分类号: O435 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0118002

Design of coaxial four-mirror anastigmat optical system with long focal length

Chen Li^{1,2}, Liu Li^{1,2}, Zhao Zhicheng^{1,2}, Li Yingbo³, Fu Danying⁴, Shen Weimin^{1,2}

1. Key Lab of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, College of Physics, Optoelectronics and Energy, Soochow University, Suzhou 215006, China; 2. Key Lab of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province, College of Physics, Optoelectronics and Energy, Soochow University, Suzhou 215006, China;
3. Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100076, China; 4. DFH Satellite Co. Ltd., Beijing 100094, China)

Abstract: The earth-observing remote sensing micro/nano satellite with low-cost and high-performance is the focus of the current research and development. In order to adapt to the micro/nano satellite's platform, the camera is often required to be compact and light weight. Limited of its volume and weight, designing a long focal length, wide-field telescope as compact as possible is the key of successfully manufacturing the high-resolution remote sensing optical camera. The possibility of solving this problem by using on-axis four-mirror system is studied. First of all, the basic composition and the working principle of on-axis four-mirror system without secondary obscuration was introduced. Then, the conditions of geometric constraint and the formulas of primary aberrations were presented

收稿日期: 2018-08-13; 修订日期: 2018-09-17

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0501300, 2016YFB0501302, 2016YFB05500501-02); 江苏高校优势学科建设工程

作者简介: 陈丽(1991-), 女, 硕士生, 主要从事光学设计与仪器光学方面的研究。Email: 20154208108@stu.suda.edu.cn

导师简介: 沈为民(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光学设计和仪器光学以及遥感航天技术等方面的研究。

Email: swm@suda.edu.cn

based on Gauss and optical aberration theory. The design idea and method of the compact on-axis four-mirror system with long focal length were presented. Finally, an optimized optical system was given, with full field angle is $1^\circ \times 1^\circ$, effective focal length (EFL) is 2 100 mm, F number is 7, respectively. The total length of this system is 228 mm, only about 1/9 of EFL. This optical system is simple and compact and its imaging quality is near diffraction limit.

Key words: optical design; remote sensing camera; long focal length; on-axis four-mirror system; without secondary obscuration

0 引言

为获取高分辨率对地遥感图像,空间相机通常需采用长焦距光学系统。总质量小于 100 kg 的微纳卫星上质量及功耗资源非常有限^[1-2],相机体积大会导致卫星所承受负荷急剧增大,解决相机载荷小型轻量与长焦距高分辨率间的矛盾,是成功开发高分辨率对地遥感微纳卫星的关键之一。

高分辨率星载遥感相机通常使用反射式结构,具有无色差、体积小、对温度变化不敏感、易于实现轻量化等优势^[3]。两反系统结构简单^[4],但视场范围较小,需用长的外遮光罩抑制视场外杂光,导致相机体积较大,越来越不适用于高性能微纳卫星平台。目前广泛采用同轴三反系统^[5],具有视场大、易于控制系统杂散辐射等优点,但为引出像面通常需添加平面镜,同时需要避免其二次遮拦。采用偏视场结构^[6]可避免二次遮拦,但边缘视场残余彗差、像散和畸变较大,影响成像质量。另一种常用方法是利用主次镜实像和三镜出瞳附近的倾斜折叠平面反射镜,使主次镜实像无遮拦地通过该平面反射镜上的中心孔,三镜反射光线不穿过平面镜中心孔,而是无拦光地通过平面反射镜的环形孔径^[7-9],为了减小光学系统的长度,需要增大三镜放大倍率,增长三镜的像距,需用多块平面镜转折光路,导致光学系统复杂,可靠性下降。为进一步减小系统总长,使得相机体积和质量更加轻小,需要研究四反射镜系统结构,通过进一步增加自由参量,更加有效地避免二次遮拦、减小光学系统尺寸、增大相机视场范围,解决相机小型轻量与长焦距高分辨率应用需求的矛盾。

国内外不少学者针对四反射系统进行了像差理论推导^[10-12],大多用于离轴四反射系统的初始结

构求解。1979年,Robb提出一种同轴四反射结构^[13],其入瞳位于球面主镜上,四镜位于主次镜实像和三镜出瞳附近,四镜反射光线无遮拦穿过三镜中心孔到达像面,自然引出像面,便于探测器的安装和使用。其优点在于可使用口径较小的凹面四镜校正球面主镜残余像差,详细的设计过程未见报道。2009年,朱立荣采用球面和抛物面主镜设计了出瞳在四镜处的超大口径长焦距同轴四反射光学系统^[14],由于视场角较小,并未对系统的二次遮拦情况进行分析。

文中基于小型紧凑的结构设计理念出发,针对同轴四反系统进行详细的理论分析和设计,由高斯光学和三级像差理论,分析系统无二次遮拦条件与次镜倍率的关系,通过确定次镜倍率参数,得到系统初始结构,优化设计了主镜、三镜可集成一体化、长焦距、短筒长、结构紧凑的同轴四反射镜光学系统,像质接近衍射极限,结果表明较现有同轴三反系统,具有更加小型紧凑的结构优势,成像质量好,杂光抑制能力强,在今后微小型卫星相机载荷系统中具有潜在的应用价值。

1 工作原理及理论分析

文中研究的同轴四反射镜望远物镜光路如图 1 所示,由凹面主镜 M1、凸面次镜 M2、凹面三镜 M3 和凸面四镜 M4 四块非球面反射镜组成,物镜的孔径光阑位于主镜 M1 处,主镜、三镜和四镜开有中心孔,来自远处景物的光线经主镜 M1 和次镜 M2 反射后形成景物的一次实像 I_1 ,穿过四镜 M4 的中心孔后入射到三镜 M3,再经过三镜 M3 和四镜 M4 反射后,光束穿过三镜 M3 上的中心孔,将景物一次实像 I_1 中继成像于探测器焦平面 FPA 处。

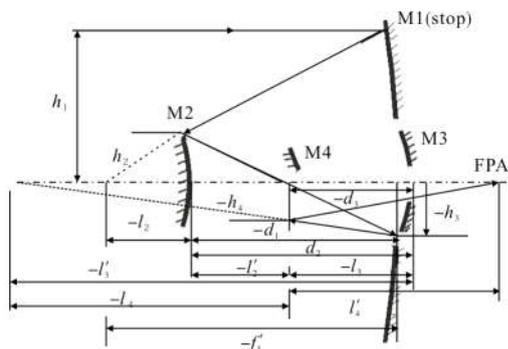


图 1 同轴四反射光学系统示意图

Fig.1 Layout of on-axis four-mirror system

该同轴四反系统结构上类同于有中间实像的同轴三反系统，只是将同轴三反物镜中用于引出像面的平面镜改成有光焦度的凸面反射镜。三反射镜系统有三块反射镜的三个顶点曲率半径、三个二次非球面系数和两个镜间距共八个一阶参数，考虑到总光焦度、平像场、光学总长和像面工作距四个约束条件后，余下的四个一阶参数恰好能用来校正球差、彗差、像散、畸变四个初级像差，随着对物镜紧凑度要求的不断提高，难以校正高级像差和兼顾成像质量与紧凑要求。通过引入第四块有光焦度的非球面反射镜 M4，增加了一个顶点曲率半径、一个二次非球面系数和一个镜间距共三个一阶参数，使得有足够的参数来平衡初级和高级像差，有望设计得到比三反射镜系统更紧凑的物镜。

类似于推导三反系统像差系数，引用轴上边缘光线在次镜、三镜、四镜上的入射高度与在主镜上的入射高度之比 $\alpha_i (i=1,2,3)$ 和次镜、三镜、四镜的横向放大率 $\beta_i (i=1,2,3)$ ，令轴上边缘光线在主镜上的入射高度 h_1 和物镜总光焦度归一化为 1，利用近轴光学成像关系式和三角几何关系，可用比例系数和放大率表示图 1 中所示反射镜的物距 l_2, l_3, l_4 、像距 l'_2, l'_3, l'_4 、顶点曲率半径 $r_i (i=1,2,3,4)$ 和各镜间距 $d_i (i=1,2,3)$ ，即

$$l_2 = \frac{\alpha_1}{\beta_1 \beta_2 \beta_3} \quad (1a)$$

$$l'_2 = \frac{\alpha_1}{\beta_2 \beta_3} \quad (1b)$$

$$l_3 = -\frac{\alpha_1 \alpha_2}{\beta_3 \beta_2} \quad (2a)$$

$$l'_3 = -\frac{\alpha_1 \alpha_2}{\beta_2 \beta_3} \quad (2b)$$

$$l_4 = -\frac{\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3}{\beta_3} \quad (3a)$$

$$l'_4 = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \quad (3b)$$

$$r_1 = \frac{2}{\beta_1 \beta_2 \beta_3} \quad (4a)$$

$$r_2 = \frac{2\alpha_1}{(1+\beta_1)\beta_2\beta_3} \quad (4b)$$

$$r_3 = \frac{2\alpha_1 \alpha_2}{(1+\beta_2)\beta_3} \quad (4c)$$

$$r_4 = \frac{2\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3}{(1+\beta_3)} \quad (4d)$$

$$d_1 = \frac{1-\alpha_1}{\beta_1 \beta_2 \beta_3} \quad (5a)$$

$$d_2 = \frac{\alpha_1(1-\alpha_2)}{\beta_2 \beta_3} \quad (5b)$$

$$d_3 = \frac{\alpha_1 \alpha_2 (1-\alpha_3)}{\beta_3} \quad (5c)$$

光学总长为次镜顶点到物镜像平面的距离，即：

$$L = d_2 + d_3 + l'_4 \quad (6)$$

图 2 中 u_0, u_1, u_2, u_3 分别为轴外主光线经主镜、次镜、三镜、四镜反射后与光轴的夹角。考虑到光阑在主镜处，令轴外主光线在孔径光阑（即主镜）处的入射角 $u_0 = -1$ ，追迹轴外主光线，可得四块反射镜上的入射高度 y_1, y_2, y_3, y_4 分别表示为：

$$y_1 = 0 \quad (7a)$$

$$y_2 = \frac{\alpha_1 - 1}{\beta_1 \beta_2 \beta_3} \quad (7b)$$

$$y_3 = \frac{\alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \beta_1 (1 - \alpha_2)}{\beta_1 \beta_2 \beta_3} \quad (7c)$$

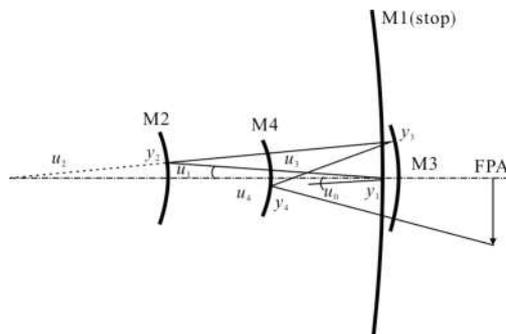


图 2 轴外主光线光路图

Fig.2 Layout of the off-axis principal ray

$$y_4 = \frac{1}{\beta_1 \beta_2 \beta_3} [(\alpha_3 - 1)(1 - \alpha_2 + \beta_2)(1 - \alpha_1 + \beta_2) + (1 - \alpha_3)(1 + \beta_2)(1 - \alpha_1) + \alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)] \quad (7d)$$

根据参考文献[15]中三级像差公式(2.2),可导出同轴四反射镜系统的归一化初级球差 S_1 、彗差 S_2 、像散 S_3 、像面弯曲 S_4 和畸变 S_5 系数:

$$S_1 = \frac{e_1^2 \beta_1^3 \beta_2^3 \beta_3^3}{4} - \frac{e_2^2 \alpha_1 (1 + \beta_1)^3 \beta_2^3 \beta_3^3}{4} + \frac{e_3^2 \alpha_1 \alpha_2 (1 + \beta_2)^3 \beta_3^3}{4} - \frac{e_4^2 \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 (1 + \beta_3)^3}{4} - \frac{\beta_1^3 \beta_2^3 \beta_3^3}{4} + \frac{\alpha_1 (1 + \beta_1)(1 - \beta_2)^2 \beta_2^3 \beta_3^3}{4} - \frac{\alpha_1 \alpha_2 (1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2 \beta_3^3}{4} + \frac{\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 (1 + \beta_3)(1 - \beta_3)^2}{4} \quad (8)$$

$$S_2 = \frac{e_2^2 (1 - \alpha_1)(1 + \beta_1)^3 \beta_2^3 \beta_3^3}{4\beta_1} + \frac{e_3^2 [\alpha_2 (\alpha_1 - 1) - \beta_1 (\alpha_2 - 1)]}{4\beta_1 \beta_2} \times (1 + \beta_2)^3 \beta_3^3 - \frac{e_4^2 y_4 (1 + \beta_3)^3}{4} - \frac{1}{2} (\alpha_1 - 1)(1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2 \times \frac{\beta_2^3 \beta_3^3}{4\beta_1} - \frac{(1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2 \beta_2^3 [\alpha_2 (\alpha_1 - 1) - \beta_1 (\alpha_2 - 1)]}{4\beta_1 \beta_2} + \frac{y_4 (1 + \beta_3)(1 - \beta_3)^2}{4} \quad (9)$$

$$S_3 = \frac{-e_2^2 \beta_2 \beta_3 (\alpha_1 - 1)^2 (1 + \beta_1)^3}{4\alpha_1 \beta_1^2} + e_3^2 [\alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \beta_1 (\alpha_2 - 1)]^2 \times \frac{\beta_3 (1 + \beta_2)^3}{4\alpha_1 \alpha_2 \beta_1^2 \beta_2^2} - \frac{e_4^2 y_4^2 (1 + \beta_3)^3 (\alpha_1 - 1)^2 (1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2}{4\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3} + \frac{\beta_2 \beta_3}{4\alpha_1 \beta_1^2} - \frac{[\alpha_2 (\alpha_1 - 1) - \beta_1 (\alpha_2 - 1)]^2 (1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2 \beta_3}{4\alpha_1 \alpha_2 \beta_1^2 \beta_2^2} + \frac{y_4^2 (1 + \beta_3)(1 - \beta_3)^2}{4\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3} - \frac{(\alpha_1 - 1)(1 - \beta_1^2) \beta_2 \beta_3}{\alpha_1 \beta_1} - \beta_1 \beta_2 \beta_3 - \frac{[\alpha_2 (\alpha_1 - 1) - \beta_1 (\alpha_2 - 1)](1 - \beta_2^2) \beta_3}{\alpha_1 \alpha_2 \beta_1 \beta_2} - \frac{y_4 (1 - \beta_3^2)}{\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3} + \frac{(1 + \beta_1) \beta_2 \beta_3}{\alpha_1} - \frac{(1 + \beta_2) \beta_3}{\alpha_1 \alpha_2} + \frac{(1 + \beta_3)}{\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3} \quad (10)$$

$$S_4 = \beta_1 \beta_2 \beta_3 - \frac{(1 + \beta_1) \beta_2 \beta_3}{\alpha_1} + \frac{(1 + \beta_2) \beta_3}{\alpha_1 \alpha_2} - \frac{(1 + \beta_3)}{\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3} \quad (11)$$

$$S_5 = -\frac{(\alpha_1 - 1)^3 e_2^2 (1 + \beta_1)^3}{4\alpha_1 \beta_1^2} + \frac{y_3^3 e_3^2 (1 + \beta_2)^3 \beta_3^3}{4\alpha_1 \alpha_2^2} - \frac{y_4^3 e_4^2 (1 + \beta_3)^3}{4\alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2} + \frac{(\alpha_1 - 1)^3 (1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2}{4\alpha_1^2 \beta_1^3} - \frac{y_3^3 (1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2 \beta_3^3}{4\alpha_1^2 \alpha_2^2} + \frac{y_4^3 (1 + \beta_3)(1 - \beta_3)^2}{4\alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2} - \frac{3(\alpha_1 - 1)^2 (1 - \beta_1^2)}{2\alpha_1^2 \beta_1^2} - \frac{3y_4^2 (1 - \beta_3^2)}{2\alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2} + \frac{2(\alpha_1 - 1)(1 + \beta_1)}{\alpha_1^2 \beta_1^3} - \frac{2y_3 (1 + \beta_2) \beta_3}{\alpha_1^2 \alpha_2^2} + \frac{2y_4 (1 + \beta_3)}{\alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2} - \frac{3y_3^2 (1 - \beta_2^2) \beta_3^2}{2\alpha_1^2 \alpha_2^2} \quad (12)$$

上述公式表明,同轴四反系统的主镜非球面系数 e_1^2 只影响初级球差,对轴外像差不起作用,次镜、三镜、四镜非球面系数 e_2^2 、 e_3^2 、 e_4^2 影响初级球差、彗差、像散、畸变,通过合理控制次镜、三镜、四镜的非球面系数来校正球差、彗差、像散和畸变,初级场曲 S_4 只与系统结构有关,与各面的非球面系数无关,可以通过控制结构参数来校正场曲。

中心遮拦是同轴反射镜系统的固有问题,对于如图 1 所示的同轴四反系统,主镜上的入射光束不可避免地会被次镜遮拦,当主镜中心孔在次镜的阴影内时,次镜中心遮拦通常称为一次遮拦,而由于三镜通光口径限制,当主镜中心孔超出次镜阴影时,中心孔决定主镜入射光束的一次遮拦程度。除此之外,三镜和四镜的中心孔和通光口径可能会引起二次、甚至三次遮拦。为了不产生二次遮拦,次镜反射光束要能够全部通过四镜中心孔,入射到三镜上时,全部要在其环形通光口径内,没有光线到达三镜中心孔和直接入射到焦平面,三镜反射光束同样要全部落在四镜的环形通光口径内,并经四镜反射后全部通过三镜中心孔,在焦平面处形成景物像。

满足上述无二次遮拦条件十分复杂,然而,根据对有中间实像三反射镜系统的研究与设计经验,一个直观的解决办法是将四镜置于主镜和次镜形成的一次实像处,并让四镜位于三反系统的出瞳附近。这时,次镜反射光束最容易无二次遮拦地通过四镜中心孔,且主镜和四镜中心孔处于共轭位置,三镜反射光束不致入射到四镜中心孔内。利用近轴物像关系,不难得到四镜

位于主镜和次镜所成景物一次实像处的条件是:

$$\beta_2 = \frac{1}{1 - \alpha_3} \quad (13)$$

同样地,可导出三镜出瞳离四镜距离 ΔL 为:

$$\Delta L = -\frac{\alpha_1 \alpha_2}{\beta_1 \beta_2} + \frac{\alpha_1 \alpha_2 [(1 - \alpha_2) \beta_1 + \alpha_2 (1 - \alpha_1)]}{\beta_3 (1 - \alpha_2 + \beta_2) (1 - \alpha_1 + \beta_1) - \beta_3 (1 + \beta_2) (1 - \alpha_1)} \quad (14)$$

为使系统出瞳位于中间实像即四镜附近,从而利于消除四镜引起的二次遮拦,上式右方的值应尽可能地接近 0。

同样需要避免由三镜中心孔引起的二次遮拦,为满足三镜无遮拦条件,要求经主次镜反射后的光束不会入射到三镜中心孔内且经四镜反射后光束全部通过三镜中心孔到达像面,因此需分析在遮拦影响下,轴外最低高度的入射光线经主、次镜反射到达三镜时的光线高度。令轴上光线最低入射高度为 $-h_1'$ 时,其在次镜 M2、三镜 M3、四镜 M4 上的入射高度分别为 $-h_2'$ 、 $-h_3'$ 、 $-h_4'$, 视场角为 w 的轴外光线在主镜 M1、次镜 M2、三镜 M3、四镜 M4 上的入射高度分别为 $-H_1$ 、 $-H_2$ 、 H_3 、 H_4 , 如图 3 所示。

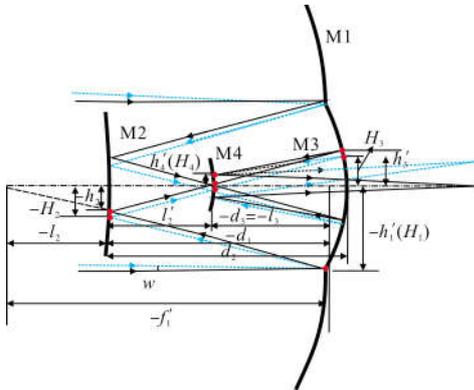


图 3 入射高度为 $-h_1'$ 时轴上和轴外光线光路图
Fig.3 Layout of the on-axis and off-axis light with the incidence height is $-h_1'$

图 3 中由相似三角形关系,可得到:

$$-h_2' = -h_1' \frac{l_2}{f_1} \quad (15)$$

因此:

$$-h_2' = -h_1' \cdot \alpha_1 \quad (16)$$

追迹视场角为 w 的轴外光线可得到:

$$-H_1 = -h_1'$$

$$-H_2 = -h_2' - d_1 \tan w \quad (18)$$

$$H_3 = -H_2 - d_2 \frac{-H_2 \beta_2 \beta_3 - \tan w}{\alpha_1} \quad (19)$$

将公式(16)代入公式(18)得到:

$$-H_2 = -h_1' \cdot \alpha_1 - d_1 \tan w$$

将公式(20)和(5b)代入公式(19),经化简可得到

$$H_3 = -h_1' \alpha_1 \alpha_2 + \left[1 - \frac{(1 - \alpha_1) \alpha_2}{\beta_1} \alpha_2 \right] \frac{\tan w}{\beta_2 \beta_3} \quad (21)$$

令对入射光束的一次遮拦由主镜中心孔决定,假设三镜口径边缘恰好位于主镜中心孔边缘处,即主镜中心孔半径等于三镜半口径 h_3^1 时,三镜对入射光线的遮拦为主要遮拦,即一次遮拦,如图 4 所示,主镜中心孔尺寸由三镜通光口径大小决定,此时主镜上光线的最低入射高度即为三镜通光半口径:

$$h_1^1 = h_3^1 \quad (22)$$

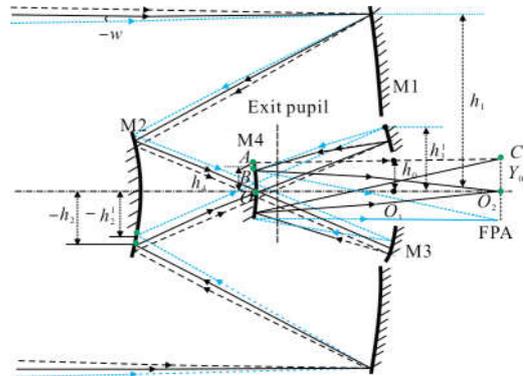


图 4 轴外边缘光线和轴上边缘光线光路图

Fig.4 Layout of the off-axis and on-axis edge field light path

为了得到三镜通光口径,追迹图 4 中轴外视场为 $-w$ 的边缘光线,得到其在次镜 M2 上的入射高度 $-h_2^1$ 为:

$$-h_2^1 = -\frac{h_2}{2F} + d_1 \tan w \quad (23)$$

式中: F 为系统 F 数。上式可写为:

$$-h_2^1 = -\frac{\alpha_1}{2F} + d_1 \tan w \quad (24)$$

在三镜上的入射高度 h_3^1 即三镜通光半口径为:

$$h_3^1 = -h_2^1 - d_2 \frac{-h_2^1 \beta_2 \beta_3 + \tan \omega}{\alpha_1} \quad (25)$$

将公式(5a)、(5b)、(24)代入公式(25),经化简得到:

$$h_3^1 = \frac{-\alpha_1 \alpha_2}{2F} + \left(\alpha_2 + \frac{(1-\alpha_1)\alpha_2}{\beta_1} - 1 \right) \frac{\tan \omega}{\beta_2 \beta_3} \quad (26)$$

因此主镜上光线的最低入射高度 h_1' 为:

$$h_1' = -\frac{\alpha_1 \alpha_2}{2F} + \left(\alpha_2 + \frac{(1-\alpha_1)\alpha_2}{\beta_1} - 1 \right) \frac{\tan \omega}{\beta_2 \beta_3} \quad (27)$$

将上式代入公式(21)得到当最低入射高度等于三镜通光半口径时,轴外视场角为 w 的入射光线在三镜上的最低投射高度 H_3 为:

$$H_3 = -\left(-\frac{\alpha_1 \alpha_2}{2F} + \left[\alpha_2 \left(1 + \frac{1-\alpha_1}{\beta_1} \right) - 1 \right] \frac{\tan \omega}{\beta_2 \beta_3} \right) \alpha_1 \alpha_2 + \left(1 - \frac{(1-\alpha_1)\alpha_2}{\beta_1} - \alpha_2 \right) \frac{\tan \omega}{\beta_2 \beta_3} \quad (28)$$

经化简得到:

$$H_3 = \frac{\alpha_1^2 \alpha_2^2}{2F} +$$

$$\left[1 - \frac{(1-\alpha_1)\alpha_2}{\beta_1} - \alpha_2 - \alpha_1 \alpha_2 \left(1 + \frac{1-\alpha_1}{\beta_1} \right) + \alpha_1 \alpha_2 \right] \frac{\tan \omega}{\beta_2 \beta_3} \quad (29)$$

三镜中心孔半径须小于上式决定的三镜上光线的最低入射高度,为了让经四镜反射后的光束全部通过三镜的中心孔,该中心孔应对四镜出射光束不产生遮拦。其中四镜的像方光路如图 5 所示,考虑到物镜出瞳在四镜附近,可近似地认为,当轴上边缘光线在四镜上的入射点和像高点构成的光线锥能够通过三镜中心孔时,该中心孔对四镜出射光束不产生遮拦。

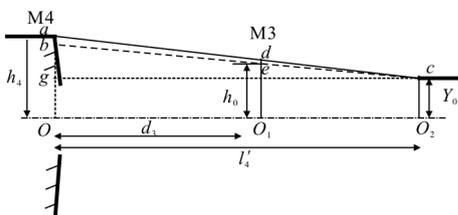


图 5 四镜像方光路图

Fig.5 Layout of the image space of the fourth mirror

通过近轴光线追迹得到的轴上边缘光线在四镜处的入射高度 h_4 ,并利用平面相似三角形几何关系,得到四镜出射光线锥在三镜处的半口径为:

$$h_0 = \frac{-h_4 - Y_0}{l_4'} (l_4' + d_3) + Y_0 \quad (30)$$

式中: Y_0 为焦距归一化时的像高,即等于 $\tan \omega$ 。上式经化简得到:

$$h_0 = -\frac{\alpha_1 \alpha_2}{2F} \left(\alpha_3 + \frac{1-\alpha_3}{\beta_3} \right) - \frac{1-\alpha_3}{\alpha_3 \beta_3} \tan \omega \quad (31)$$

为使四镜出射光束全部通过三镜中心孔,由公式(29)决定的三镜中心开孔半口径须大于公式(31)给出的通光半口径,即:

$$H_3 - h_0 \geq 0 \quad (32)$$

2 设计思想与举例

2.1 指标要求

课题要求星载对地推帧遥感相机的高度 350 km,地面像元分辨率 1 m,单帧地面覆盖范围 6 km×6 km,工作波长范围覆盖可见光 450~750 nm,焦平面探测器采用像元尺寸为 6 μm×6 μm 的 CMOS 面阵探测器。利用遥感投影关系,不难计算得到相机物镜有效焦距为 2 100 mm,全视场角为 1°×1°。为了适用于微小卫星平台,要求相机体积尽可能小、质量尽可能轻,相机体积不大于 300 mm×300 mm×320 mm,因此取物镜 F 数为 7。另外,要求物镜相对畸变值低于 5%。

2.2 初始结构选取

当物镜光学总长为 L ,镜间距 d_1 和 d_2 、次镜遮拦比 α_1 已知时,由公式(5a)和(5b)得到:

$$\alpha_2 = 1 - \frac{(1-\alpha_1)d_2}{d_1 \beta_1 \alpha_1} \quad (33)$$

$$\beta_2 \beta_3 = \frac{1-\alpha_1}{d_1 \beta_1} \quad (34)$$

由于主次镜所成远处景物实像位于四镜,系统总长为次镜像距 l_2' 与四镜像距 l_4' 之和,即:

$$l_4' = \frac{\alpha_1}{\beta_2 \beta_3} + \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \quad (35)$$

将公式(33)、(34)代入公式(35),得到:

$$\alpha_3 = \frac{d_1 \beta_1}{[d_1 \beta_1 \alpha_1 - (1-\alpha_1)d_2]} \left(L - \frac{\alpha_1 \beta_1 d_1}{1-\alpha_1} \right) \quad (36)$$

四镜位于主镜和次镜的景物一次实像处的条件:

$$\beta_2 = \frac{1}{1-\alpha_3} \quad (37)$$

由公式(34)得到:

$$\beta_3 = \frac{1-\alpha_1}{d_1 \beta_1} \cdot \frac{1}{\beta_2} = \frac{1-\alpha_1}{d_1 \beta_1} \cdot \frac{1}{1-\alpha_3} \quad (38)$$

由此得到的三镜和四镜遮拦比及放大率 α_2 、 α_3 、 β_2 、 β_3 均可由 L 、 d_1 、 d_2 、 α_1 、 β_1 表示,通过确定系统总长、主次镜间距和次三镜间距,将公式 (33)、(36)、(37)、(38)代入公式(14)、(29)、(31)、(32),分析系统出瞳距四镜间隔 ΔL 及三镜无遮拦条件随次镜放大倍率 β_1 的关系,通过选取合适次镜放大倍率即可求解出系统初始结构参数。

指标中要求系统长度 $L \leq 320$ mm,因此令归一化系统总长 $L = -0.15$, 该系统中三镜半口径边缘恰好位于主镜中心孔边缘处,因此主、三镜轴向间隔很小,根据设计经验,取主次镜间隔 d_1 、次三镜间隔 d_2 分别为 $d_2 = -0.08$ 、 $d_1 = 0.075$, 取次镜遮拦比分别为 $\alpha_1 = 0.25$, $\alpha_1 = 0.3$, $\alpha_1 = 0.35$ 。由公式(14)得到系统出瞳到四镜的距离 ΔL 随 β_1 变化关系曲线图如图 6 所示,随着 β_1 和 α_1 的逐渐减小, ΔL 先逐渐减小后增大,存在一个最小值。一般 $|\Delta L| \leq 0.025$ 时,可认为出瞳到四镜的距离很接近,因此当遮拦比 $\alpha_1 = 0.35$ 时,次镜横向倍率的取值范围为 $\beta_1 \leq -1.32$; 当 $\alpha_1 = 0.30$ 时, $\beta_1 \leq -1.09$; 当 $\alpha_1 = 0.35$ 时, $\beta_1 \leq -0.9$ 。

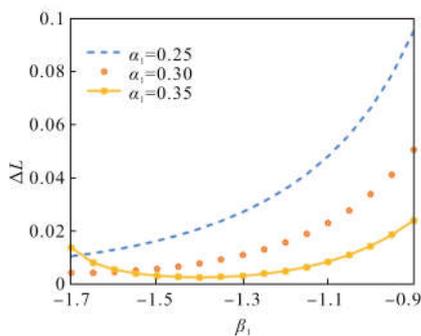


图 6 出瞳到四镜的距离随次镜放大率变化曲线图

Fig.6 Curves of distance from exit pupil to the fourth mirror varies with second mirror relay imaging magnification

三镜上轴外边缘光线高度差与次镜放大率关系的曲线图,如图 7 所示,为满足三镜中心孔无遮拦条件即 $\Delta h \geq 0$, 且 $|\Delta L| \leq 0.025$ 时,在 $\alpha_1 = 0.25$, β_1 无解,在 $\alpha_1 = 0.30$, β_1 取值范围为 $-1.1 \leq \beta_1 \leq -1.09$, 在 $\alpha_1 =$

0.35 , β_1 取值范围为 $-0.98 \leq \beta_1 \leq -0.9$ 。考虑到系统满足平像场条件,即 $S_4 = 0$,如图 8 所示,由图可知,在满足三镜无遮拦条件下,平像场存在零点的解为 $\alpha_1 = 0.30$ 时, $\beta_1 = -1.1$, $\alpha_1 = 0.30$ 时, $\beta_1 = -0.9$, 由于 $\beta_1 = -0.9$ 时次镜为凹面镜,且遮拦系数较大,因此最终取合理解为 $\alpha_1 = 0.30$, $\beta_1 = -1.1$,由此可求得次镜、三镜的遮拦比和放大率 α_2 、 α_3 、 β_2 、 β_3 值,进而求得初始结构轮廓参数。

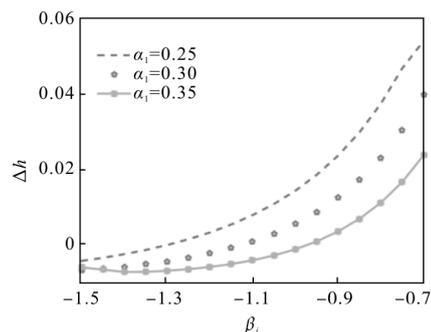


图 7 三镜边缘光线高度与经四镜反射处光线高度差随次镜放大率变化曲线图

Fig.7 Curves of the height difference between the edge light of center hole at the third mirror and the edge light reflected by the fourth varies with second mirror relay imaging magnification

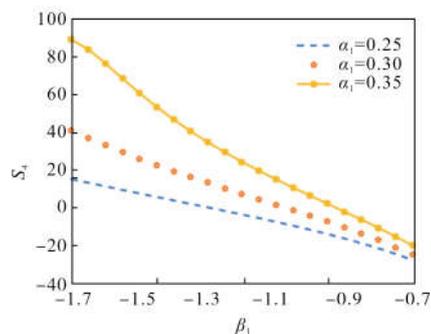


图 8 场曲 S_4 随次镜放大率变化曲线图

Fig.8 Curves of field curvature S_4 varies with second mirror relay imaging magnification

为求出面型参数,需求解初级像差公式中以满足消除球差 S_1 、彗差 S_2 、像散 S_4 和畸变 S_5 校正要求的方程组,但满足畸变校正的方程式十分复杂,为化简解方程组的复杂度,求解中先令主镜为抛物面镜,即 $K_1 = -1$,仅通过求解满足球差、彗差和像散校正要求时系统初始结构的二次非球面系数 e_2^2 , e_3^2 , e_4^2 , 由此,四反射镜光学系统的全部自由参数均求出。根

据系统有效焦距等指标要求,经计算其初始结构见图 9,参数见表 1,对其进一步优化,可得到满足成像质量要求的光学系统。

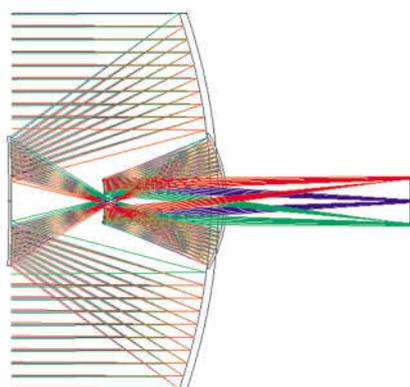


图 9 初始光学系统

Fig.9 Initial optical system

表 1 初始结构参数

Tab.1 Initial structure parameters

Surface	Radius/mm	Thickness/mm	Material	Conic
Stop	-450	-157.5	Mirror	-1
2	-1 485	168	Mirror	3.6814
3	-110.466	-93.75	Mirror	0.0407
4	-97.928 6	240.75	Mirror	-3.868 6
5	Infinity	-	-	-

2.3 设计结果

由上述初始结构优化设计得到焦距 2 100 mm、 F 数为 7、视场角 $1^\circ \times 1^\circ$ 的长焦距四反射镜光学系统,如图 10 所示,其主镜、次镜、三镜、四镜同轴,主次镜采用类卡塞格林结构,存在中间像面。中间实像位于四镜中心孔处,且在系统出瞳附近,口径较小的非球面四镜用来校正主镜像差,可减小对主镜非球面系数的要求。光线经四镜反射后无遮拦地通过三镜的中心环孔,再经平面折叠反射镜转折光路后到达像平面。添加的平面反射镜极大缩短了系统总长,同时便于探测器的安装,整个系统结构小型紧凑,无二次遮拦,其中各镜面遮拦比如表 2 所示。四镜处采用视场光阑和内遮光罩可有效减少系统杂散光,减小外遮光罩长度,甚至可不用外遮光罩。设计中由于主镜剩余球差较大,对其采用高次非球面,次镜、三镜轴向距离为 174 mm,约为有效焦距

的 1/12,具有较高的压缩比,在使用结构材料和光学材料匹配的情况下,仍具有对温度变化不敏感特性。系统后工作距长约为 101 mm,光学系统外部尺寸为 300 mm \times 300 mm \times 228 mm,总长约为有效焦距的 1/9。

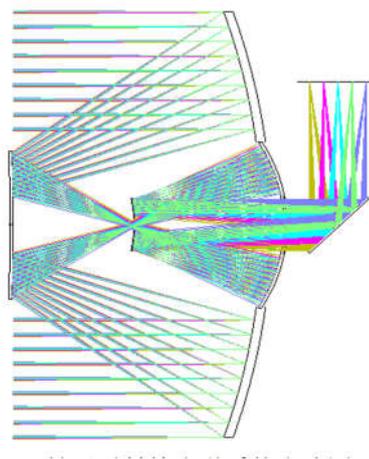


图 10 同轴四反射镜光学系统光路图

Fig.10 Layout of on-axis four-mirror optical system

表 2 各反射镜遮拦比

Tab.2 Obscuration ratio of the mirror

Mirror	Obscuration ratio
M2	0.34
M3	-1.18
M4	0.3

该系统的调制传递函数 MTF 曲线如图 11 所示,不同颜色表示不同视场的 MTF 曲线,可见各视场的 MTF 值均接近衍射极限值,表明该系统具有较高的分辨率和良好的成像质量,其在奈奎斯特频率 83.3 lp/mm 处 MTF 平均值为 0.36。

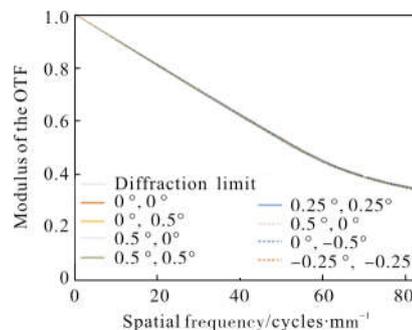


图 11 调制传递函数曲线

Fig.11 MTF curves

图 12 为各视场在像面上的光线追迹点列图,图中艾里斑半径为 $3.415 \mu\text{m}$,由图可见像斑大部分能量集中在艾里斑内,表明具有良好的成像质量。图 13 是像面上的畸变曲线。由图可以看出,边缘畸变最大,约为 0.23%,满足指标要求。

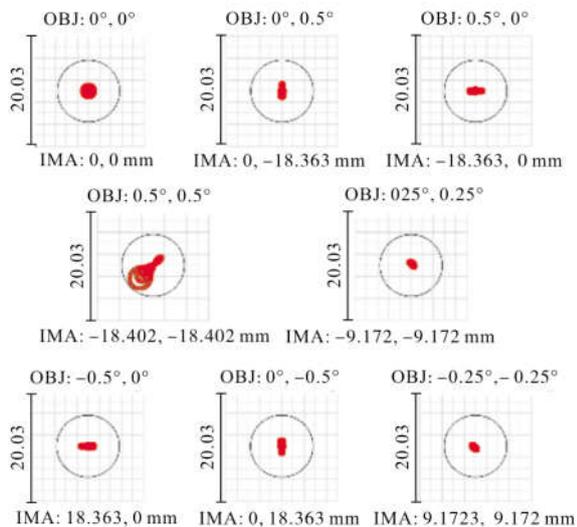


图 12 点列图

Fig.12 Spot diagram

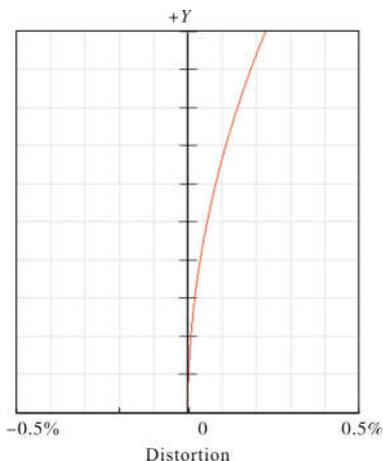


图 13 畸变曲线

Fig.13 Distortion curves

3 结论

基于微纳卫星相机轻小型光学系统设计理念,研究与设计了利用四块非球面同轴反射镜减小长焦距物镜体积和质量的可能性。根据高斯光学理论,推导分析了消除二次遮拦条件与次镜倍率的关系,通过确定合理次镜倍率参数,结合初级像差理论,给出初始结构参数求解方法与结果,并进行合

理的优化设计,对其调制传递函数、点列图和畸变曲线进行像质评价。得到成像质量接近衍射极限,结构紧凑,总长约为有效焦距的 1/9 的同轴四反射光学系统,该系统具有工作距长、体积小、结构紧凑、无二次遮拦、成像质量好等优点。结果表明同轴四反结构有利于减小长焦距望远物镜系统的体积和质量,适用于星载一体化微纳卫星平台,具有一定的应用价值。

参考文献:

[1] Ye Zhao, Li Xiwei, Wang Chao, et al. Survey of technological development of optical payload for micro/nano satellite [J]. *Spacecraft Engineering*, 2016, 25(6): 122-130. (in Chinese)
叶钊, 李熹微, 王超, 等. 微纳卫星光学载荷技术发展综述 [J]. *航天器工程*, 2016, 25(6): 122-130.

[2] Shi Rong, Li Xiao, Deng Ke. Development situation of micro-nano satellite and its application in optical reconnaissance [J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2016, 32(1): 8-13. (in Chinese)
石荣, 李潇, 邓科. 微纳卫星发展现状及在光学成像侦察中的应用 [J]. *航天电子对抗*, 2016, 32(1): 8-13.

[3] Guo Yongxiang, Li Yongqiang, Liao Zhibo, et al. Novel design of off-axis three reflective optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 546-550. (in Chinese)
郭永祥, 李永强, 廖志波, 等. 新型离轴三反射光学系统设计 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(2): 546-550.

[4] Ding Xuezhuan, Liu Yinnian, Wang Xin, et al. Design of reflective optic system used in aerospace remote sensing [J]. *Infrared Technology*, 2007, 29(5): 253-256.
丁学专, 刘银年, 王欣, 等. 航天遥感反射式光学系统设计 [J]. *红外技术*, 2007, 29(5): 253-256.

[5] Qu Hongsong, Jin Guang, Zhang Ye. NextView program and progress in optical remote sensing satellites [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(6): 467-476. (in Chinese)
曲宏松, 金光, 张叶. “NextView 计划”与光学遥感卫星的发展趋势 [J]. *中国光学与应用光学*, 2009, 2(6): 467-476.

[6] Wei Xiaoxiao, Xu Feng, Yu Jianjun. Design of Space coaxial field-bias three-mirror optical system with high resolution [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(4): 219-224. (in Chinese)

- 韦晓孝, 许峰, 余建军. 高分辨率空间同轴偏视场三反光
学系统设计[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 219-224.
- [7] Lampton M, Sholl M. Comparison of on-axis three-
mirror-anastigmat telescopes [C]//SPIE, 2007, 6687(1):
1-5.
- [8] Gondoin P. ESA study of a wide field imager for
supernovae surveys and dark energy characterization[J].
Bmc Infectious Diseases, 2006, 621(S2): 33.
- [9] Han Lin, Zhao Zhicheng, Mao Baoqi, et al. Design of
coaxial three-mirror anastigmat with long focal length
and two-dimensional field of view [J]. *Acta Optica
Sinica*, 2016, 36(7): 0722006. (in Chinese)
韩琳, 赵知诚, 毛保奇, 等. 长焦距面视场同轴三反望远物
镜设计[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0722006.
- [10] Liang Shitong, Yang Jianfeng, Xue Bin, et al. Design of
a four-mirror optical system with wide field of view[J].
Acta Optica Sinica, 2010, 30(11): 3300-3305. (in Chinese)
梁士通, 杨建峰, 薛彬, 等. 四反射镜光学系统像差分析与
设计[J]. 光学学报, 2010, 30(11): 3300-3305.
- [11] Liu Jun, Liu Weiqi, Kang Yusi, et al. Optical design of
off-axis four-mirror optical system with wide field of
view[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 228-233. (in
Chinese)
刘军, 刘伟奇, 康玉思, 等. 大视场离轴四反射镜光学系统
设计[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 228-233.
- [12] Ding Xuezhuan, Wang Xin, Lan Weihua, et al. Design
of four-mirror reflective anastigmat optic system [J].
Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(2): 319-321.
(in Chinese)
丁学专, 王欣, 兰卫华, 等. 离轴四反射镜光学系统设计
[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 319-321.
- [13] Robb P N. Reflecting telescope with a spherical primary
mirror [J]. *Journal of the Optical Society of America*,
1979, 69(10): 1439.
- [14] Zhu Lirong, Optical design of four-mirror systems with
ultra-large aperture [D]. Suzhou: Soochow University,
2007. (in Chinese)
朱立荣. 超大口径四反射镜光学系统设计[D]. 苏州: 苏州
大学, 2007.
- [15] Pan Junhua. The Design Manufacture and Test of the
Aspherical Optical Surfaces [M]. Suzhou: Soochow
University Press, 2004. (in Chinese)
潘君华. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大
学出版社, 2004.