

文章编号 1004-924X(2003)01-0055-04

宽覆盖、离轴空间相机光学系统的设计

常 军¹, 翁志成¹, 姜会林², 丛小杰¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130022;
2. 长春理工大学, 吉林 长春 130022)

摘要:当前空间相机的光学系统的要求是:在多光谱范围内,系统要有高分辨率、大视场、小体积、质量轻且像面为平像场,TMA(Three mirror anastigmat)可以满足上述要求。为此给出了这方面的设计,所研究的TMA系统三个反射面都是二次曲面,将主镜和第三镜离轴放置,避免中心遮拦的影响,系统的视场可达到 $5^\circ \times 0.2^\circ$,焦距为6 m,像质接近衍射极限。

关键词:高分辨率;空间相机

中图分类号:TH703 **文献标识码:**A

1 引言

目前,在空间对地观测遥感领域中,无论是军事还是民用领域都在努力发展高分辨力的空间相机,并要求相机在多光谱条件下,具有大视场、高分辨率、体积小、无色差、平像场。当工作轨道高度和探测器尺寸一定时,增大焦距,可以提高对地面像元的分辨率。但是,焦距增大时,系统尺寸也将随着增大,体积大对航空和航天产品非常不利。对于长焦距光学系统,折射系统和折反系统存在二级光谱,不易校正^[1];反射系统不产生色差,无二级光谱,使用波段范围宽,而且孔径可以做得较大,宜于轻量化,在抗热性能方面有较强的优势,而且通过使用非球面来校正像差,可以使结构简单,像质优良。目前已有学者在这方面做了不少工作^[2-6]。最常用的卡氏系统也同样具有上述优点,但其视场小,且存在残余场曲;同轴的三镜消像散反射系统(TMA)由于中心遮拦的影响,减少了进入系统的能量,降低了系统的传函值。离轴TMA避免了中心遮拦,传函值可做到较高。本文探讨一种离轴TMA,系统焦距为6 m,视场可达到 $5^\circ \times 0.2^\circ$,对地面有较大的覆盖范围,且筒长较短,成像质量接近衍射极限。

2 光学系统分析

在无像差光学系统中或者系统的像差足够小时,光学系统口径的衍射决定了系统的最高分辨率。衍射对系统分辨率的影响由艾利斑直径 d 来表征:

$$d = \frac{2.44 \lambda f}{D}, \quad (1)$$

其中: λ 为波长, f 为光学系统焦距, D 为光学系统口径。

光学系统的成像质量最好能做到衍射极限,即像斑直径最小为衍射极限。系统焦距 f 与探测器单元尺寸有如下关系:

$$f \frac{s}{H} = \quad (2)$$

式中: H 为卫星轨道高度, s 为地面线分辨率。

地面覆盖宽度:

$$Q = 2 \cdot H \cdot \tan \quad (3)$$

式中: Q 为地面覆盖宽度,为系统的半视场角。由上式可知,在波长、卫星高度和探测器尺寸确定后,空间分辨率与光学系统相对孔径有关,当光学系统口径一定时,在相同的轨道高度条件下,增大焦距可以提高地面分辨率,增大系统的视

场角可以扩大对地面的覆盖宽度。同时,增大系统的口径有利于提高空间光学系统的性能。但在研制长焦距或超长焦距光学系统时,较少采用大口径的折射和折反射系统。主要原因为二级光谱消除困难;其次大尺寸、高光学均匀性的材料较难熔炼、对加工与装调要求极高,而且对环境温度和压力的变化也特别敏感。相对而言,反射式系统具有以下优势:

(1) 不存在任何色差,二级光谱也就不存在,因此可以用于很宽的谱段成像,特别适用于卫星遥感侦察和多光谱成像的光学系统;

(2) 零件数相对较少,质量轻,可以设计成轻量化结构进一步减轻质量,这正是空间光学系统所需要的;

(3) 设计型式非常灵活,可以借助折转反射镜来折叠光路使结构紧凑,还可以用非球面来获得大孔径、大视场、长焦距等多种性能要求的系统。

此类系统一般都要用到非球面,以前由于非

球面光学系统的加工、检测和装调工艺水平较低,使得反射式光学系统没有得到广泛应用。如今,随着计算机辅助加工非球面技术的日益成熟和计算机辅助检测与装调技术的应用;反射式系统的设计与应用获得了充分的解放,出现了一些高质量、高性能的反射式系统,长焦距光学系统的研究也就自然转到反射系统上来。由三块反射镜组成的 TMA 系统结构最简单,在满足消除 4 种初级像差的前提下,还有多余的参数可以用来安排系统结构,因此受到广泛的关注。

3 设计举例和性能分析

现设计一个焦距 $f = 6\ 000\ \text{mm}$,相对孔径 $D/f = 1/10$,视场角(矩形视场角): $5^\circ \times 0.2^\circ$,谱段为 $0.486 \sim 0.7\ \mu\text{m}$ 的 TMA 系统,确定系统各光学表面的初始结构参数和部分非球面参数如表 1 所示:

表 1 结构参数

Fig. 1 System parameters

	半径(mm)	二次曲率	非球面高次项	偏心量 x(mm)	偏心量 y(mm)
主镜	- 6 930.0	- 1.40	8 th	0	800
次镜	- 2 910.5	- 0.60	8 th	0	0
第三镜	- 5 010.1	- 2.00	8 th	0	- 1 000
像面	0			0	- 1 050

从表中可以看出:主镜、次镜和第三镜均为双曲面。其中孔径光阑和次镜重合,且无中间成像。为避免中心遮拦,将主镜和第三镜进行了偏心和倾斜,形成如图 1 所示 TMA 系统,透镜的偏心和倾斜会产生新的附加像差,主要产生离轴彗差和一定量的离轴像散,在此通过用第三镜的偏心和像面的偏心来校正。

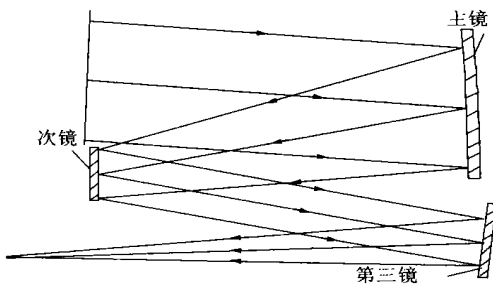


图 1 系统结构图

Fig. 1 System layout

将初始结构进行特定优化后,其传递函数曲线见图 2,能量分布见图 3,从图中可以看出系统的像质已达到衍射极限。系统的最大间隔为焦距的 $f/2.5 \sim f/3$ 。

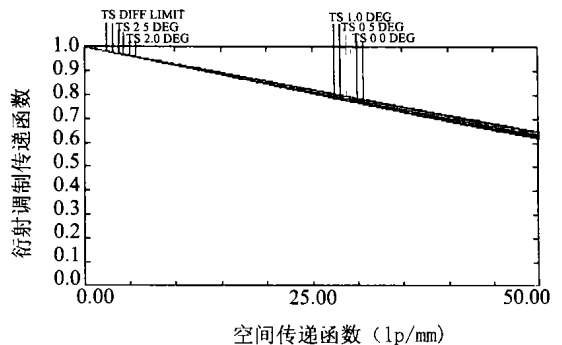


图 2 传递函数曲线图

Fig. 2 MTF curve

由公式(2)可知,当卫星高度为 600 km,探测

器的像元尺寸为 $10\ \mu\text{m}$ 时,本文光学系统的地面分辨率将为 $1\ \text{m}$,覆盖宽度为 $52.4\ \text{km}$ 。

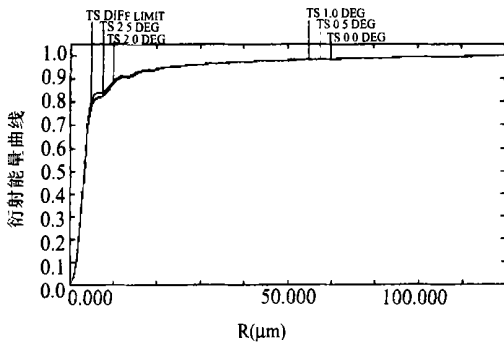


图 3 衍射能量分布图

Fig. 3 Encircled energy curve

4 结 语

三反系统由于其独特优势,适合于空间摄影等领域,已备受关注。本文设计使用的是矩形视场,适用于线阵的 TDI-CCD 接收器,通过推扫方法可得到成像,实例适合安放在空间对地遥感、空间摄影等领域上。

采用偏轴的 TMA 系统,消除了中心遮拦引起的像质下降,提高了成像质量,而且随着计算机辅助加工与干涉装调的技术不断提高,这类偏轴系统将得到更广泛的应用。

参考文献:

- [1] 姜会林. 关于二级光谱问题的探讨[J]. 光学学报, 1981, 2(2): 225-230.
JIANG H L. On the secondary spectrum[J]. *ACTA Optical Sinica*, 1981, 2(2): 225-230. (in Chinese)
- [2] 潘君骅. 关于大望远镜卡焦 R-C 系统视场改正镜设计的研究[J]. 光学 精密工程, 2002, 10(3): 231-234.
PAN J H. Research on the field corrector design for the R-C system of the large telescope cassegrain Focus[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(3): 231-234. (in Chinese)
- [3] WOODS C L, GIANINO P D. Rome for development CTV, white-light correlator recognition[J]. *SPIE*, 1987, 754: 146-156.
- [4] 薛鸣球. 长焦距光学系统研究[J]. 高速摄影与光子学, 1989, 4: 289-293.
XUE M Q. A study of long focal length system[J]. *High Speed Photography and Photonics*, 1989, 4: 289-293. (in Chinese)
- [5] 潘君骅. 具有三个二次反射镜的光学系统[J]. 光学学报, 1988, 8(8): 717-721.
PAN J H. A study of the optical system of second order surface[J]. *ACTA Optical Sinica*, 1988, 8(8): 717-721.
- [6] 沈为民, 薛鸣球, 余建军. 长波红外广角地平仪镜头的光学设计[J]. 光学 精密工程, 2002, 10(4): 329-332.
SHEN W M, XUE M Q, YU J J. Optical design of a wide-angle lens for long-wave infrared earth sensors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(4): 329-332. (in Chinese)

**Design of optical system for space camera with long focal length,
wide coverage and high resolution**

CHANG Jun¹, WENG Zhi-cheng¹, JIANG Hui-lin², CONG Xiao-jie¹

- (1. *The State Key Lab of Applied Optics, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China;*
2. *Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China*)

Abstract : The current requirements for the optical system of a space camera are high resolution , long focal length , wide field of view small volume and light weight. And all the surfaces in the system designed to satisfy these requirements are of uncoaxis , so that the effect of central obstruction can be avoided , and the system has a focal length of 6 m and a field of view of $5^{\circ} \times 0.2^{\circ}$. The evaluation test showed that the image quality is near diffraction limit.

Key words : high-resolution ;space camera

作者简介:常 军(1973 -) ,男 ,江西吉安人 ,博士后 ,94年毕业于长春光学精密机械学院检测专业 ,1997年获光学工程硕士学位 ,2002年获光学工程博士学位 ,现在中国科学院长春光学精密机械与物理研究所国家应用光学实验室进行博士后研究工作 ,主要方向为光学设计、检测。