

文章编号: 0253-2239(2010)07-2093-05

大 F 数长焦距空间相机光学系统设计

李旭阳^{1,2} 李英才¹ 马 臻^{1,2} 易红伟¹ 冯广军^{1,2}

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

² 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要 随着空间技术的不断发展, 地面分辨率不断提高, 空间相机光学系统的设计不断提出新的要求。分析了长焦距空间相机光学系统设计过程中需要考虑的问题, 研究了大 F 数、长焦距空间光学系统的设计原理, 并进行了光学系统设计。设计了谱段位于 500~800 nm, 焦距 $f=7200$ mm, $F=14.4$ 的大 F 数、长焦距的折轴三反光学系统。结果表明, 光学系统视场角达到 1.6° , 在 450 km 的轨道上, 地面幅宽可以达到 12.5 km, 像元尺寸为 $10 \mu\text{m}$ 时, 地面像元分辨率达到 0.62 m, 当中心遮挡为 6% 时, Nyquist 频率 (50 lp/mm) 处调制传递函数 (MTF) 优于 0.38, 成像质量达到衍射极限, 光学系统畸变量优于 0.5%, 可以满足高分辨率空间相机对地观测的使用要求, 同时也验证了大 F 数、长焦距光学系统的设计原理。

关键词 光学设计; 空间相机; 大 F 数; 长焦距

中图分类号 TH703 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103007.2093

Optical System Design of Space Camera with Large F number and Long Focal Length

Li Xuyang^{1,2} Li Yingcai¹ Ma Zhen^{1,2} Yi Hongwei¹ Feng Guangjun^{1,2}

(¹ Xi'an Institute of Optics and Precision Machinics, Chinese Academy of Science, Xi'an Shaanxi 710119, China)

² Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China

Abstract With the development of space technology, the optical system design must be satisfied with the latest demand due to the ground sample distance (GSD) steadily improving. The issues of the optical system design is discussed, the space optical system design principle with large F number, long focal length is analyzed and a reflective optical system which is characterized by the spectrum band 500~800 nm, focal length of 7200 mm and F number of 14.4 is designed. The result indicates that the field angle reaches 1.6° , the ground width reaches 12.5 km and the ground sample distance (GSD) reaches 0.62 m at 450 km orbit, the quality of image approaches the diffraction limited, modulation transfer function (MTF) reaches 0.38 at the Nyquist frequency of 50 lp/mm with 6% central obscure, and optical system distortion is less than 0.5%. So this kind of optical system can meet the demand for the use of high resolution space cameras. At the same time, the large F number, long focal length design principle are approved.

Key words optical design; space camera; large F number; long focal length

1 引 言

随着空间光学技术的不断发展, 地面像元分辨率不断提高, 美国近年发射的 Geoeye-1, Worldview-2 等商业卫星全色地面分辨率均优于 0.5 m, 同时具有多

光谱成像能力, 因此长焦距、大口径和接近衍射极限的光学系统成为空间光学领域研究的热点。为了获取更高的角分辨率, 就要求光学系统的焦距很长, 但由于受到口径的限制, 相对孔径一般不会很大, 因此

收稿日期: 2009-09-01; 收到修改稿日期: 2009-10-10

基金项目: 国家 973 计划 (2009CB724006) 资助课题。

作者简介: 李旭阳 (1981—), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事光学设计与光学检测等方面的研究。

E-mail: lixuyang2004@126.com

导师简介: 李英才 (1945—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间光学方面的研究。E-mail: liyingcai@opt.ac.cn

地元分辨率所对应的特征频率并不高。同时在光机加工、装配及在轨工作过程中^[1], 成像质量均会受到各种因素的影响而有所降低, 因此光学系统设计时成像质量要尽可能达到衍射极限^[2]。目前普遍在空间相机上采用的 TDI-CCD 器件, 不仅解决了相机系统的能量问题而且提高了相机系统的信噪比, 可以使光学系统的相对孔径较小, 缩小空间相机的体积和重量, 使相机整体结构更加紧凑。以 TDI-CCD 空间相机为例, 研究了大 F 数、长焦距空间光学相机的光学设计原理, 并进行了光学系统设计。

2 光学设计参数分析

空间相机的地元分辨率由光学系统的角分辨率决定, 而光学系统的角分辨率受限于光学系统的衍射艾里斑。光学系统的角分辨率为

$$\theta = 1.22\lambda/D, \quad (1)$$

式中 θ 为光学系统的角分辨率, λ 为工作谱段的中心波长, D 为光学系统的入瞳直径, λ 取 $0.6 \mu\text{m}$ 。

光学系统的线分辨率为

$$f\theta = 1.22\lambda f/D, \quad (2)$$

式中 f 为光学系统焦距。则光学系统的艾里斑直径为

$$d_{\text{Airy}} = 2.44\lambda F, \quad (3)$$

式中 F 为光学系统的 F 数。

为了使 CCD 对光学系统充分采样, 应该使艾里斑的直径充满两个像元尺寸。如图 1 所示, 即

$$2.44\lambda F = 2P, \quad (4)$$

式中 P 为 CCD 探测器的像元尺寸。

由(4)式可得:

$$\lambda F/P = 0.82. \quad (5)$$

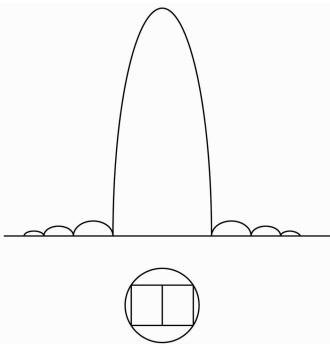


图 1 艾里斑采样原理

Fig. 1 Airy disk sampling

(5)式所表述的情况是两个物点的艾里斑分离时的情形。但根据瑞利条件, 当两个像点照度合成曲线的最小值与最大值相差 26% 时, 这两点即被认

为是可以分辨开来的^[3], 于是有

$$d_{\text{Rayleigh}} = 1.845\lambda F. \quad (6)$$

同样, 为了使 CCD 充分采样, 应该使 $d_{\text{Rayleigh}} = 2P$, 如图 2 所示, 即:

$$1.845\lambda F = 2P. \quad (7)$$

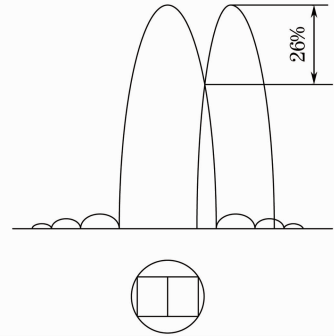


图 2 瑞利条件采样原理

Fig. 2 Rayleigh criterion sampling

由(7)式可得:

$$\lambda F/P = 1.08 \approx 1. \quad (8)$$

国外已发射并在轨运行的第一代商业遥感卫星均满足(5)式所示的设计要求, 且 $\lambda F/P < 0.82$, 如表 1 所示。

表 1 第一代商业遥感卫星

Table 1 First generation of remote sense satellite

Name	F	Pixel / μm	$\lambda F/P$
IKONOS	14.3	12	0.715
QuickBird	14.7	12	0.735
Orbview-3	6.3	6×5.4	0.630

由表 1 可知, $\lambda F/P$ 的值均小于 0.82, 满足光学系统分辨能力与地元分辨率相匹配的要求。

国外已在轨运行或在研的第二代商业遥感卫星均满足(8)式所示的设计要求, 且 $0.90 < \lambda F/P < 1$, 如表 2 所示。

表 2 第二代商业遥感卫星

Table 2 Second generation of remote sense satellite

Name	F	Pixel / μm	$\lambda F/P$
WorldView-1	14.7	9	0.98
WorldView-2	12	8	0.90
Geoeye-1	12	8	0.90
Pleiades	20	13	0.92

由表 2 可知, 国外第二代高分辨率商业卫星均采用大 F 数、长焦距光学系统以提高地面像元分辨率和成像质量。

同时 $\lambda F/P$ 可以改写成

$$\frac{\lambda F}{P} = \frac{1/P}{1/\lambda F} = \frac{2 \times (1/2P)}{1/\lambda F} = \frac{2V_N}{V_C}, \quad (9)$$

式中 V_N 为探测器的 Nyquist 频率, V_C 为光学系统截止频率。

由(9)式, $\lambda F/P$ 不仅反映了探测器采样频率与光学系统截止频率的关系, 同时还反映了 Nyquist 频率与截止频率的关系^[4]。

当 $V_N < V_C/2$ 时, $\lambda F/P < 1$, 此时相机系统的空间分辨率由探测器的采样频率决定, 光学系统处于欠采样状态, 光学系统的信息在采样及恢复过程中存在一定程度的丢失, 恢复过程中将缺失图像的高频信息成分, 造成图像细节模糊。

当 $V_N = V_C/2$ 时, $\lambda F/P = 1$, 此时光学系统的衍射极限等于探测器的采样频率, 相机的 Nyquist 频率为光学系统截止频率的一半, 存在高频分量的混叠。

当 $V_C/2 < V_N < V_C$ 时, $1 < \lambda F/P < 2$, 此时相机系统的空间分辨率由探测器的决定, 光学系统处于欠采样状态, 图像细节可以部分被恢复。

当 $V_N = V_C$ 时, $\lambda F/P = 2$, 探测器的分辨能力等于光学系统衍射极限。相机的 Nyquist 频率等于光学系统的截止频率, 光学系统被充分采样, 频率无混叠。

当 $V_N > V_C$ 时, $\lambda F/P > 2$, 相机系统的分辨能力由光学系统的衍射极限决定, 相机系统处于过采样状态, 频谱无混叠。

因此采用 $\lambda F/P = 1$ 设计原理所对应的光学系统, 在相同的入瞳直径下, 可以提高光学系统的焦距, 提高地面像元分辨率, 同时也有助于相机整体的轻量化设计。

3 光学系统初始结构

在空间光学领域, 折射式光学系统存在结构尺寸大和二级光谱等问题, 需要采用特殊的材料和复杂的结构来消除二级光谱。折反式光学系统则存在体积大, 口径受限等问题, 大口径光学材料对环境温度和压力的变化也较敏感。而反射式光学系统零件数量相对较少, 容易实现轻量化, 可以借助折转反射镜折叠光路, 使结构紧凑、体积减小和重量减轻, 在抗热性能方面也有较强的优势。同时反射式光学系统无色差, 不仅适用于可见光成像, 也适用于紫外和红外波段成像^[5]。因此反射式光学系统在空间光学领域得到了广泛应用, 而三反消像散系统是最少的可以满足消像差、平像场要求的反射式光学系统^[6]。

三反射镜光学系统的初始结构如图 3 所示 M_1, M_2, M_3 分别代表三反系统的主镜、次镜和三镜, 其结构参数共有 8 个: 三个面的半径 R_1, R_2, R_3 , 主镜

到次镜的距离 d_1 , 次镜到三镜的距离 d_2 , 三个反射面的二次非球面系数 $-e_1^2, -e_2^2, -e_3^2$ ^[7]。

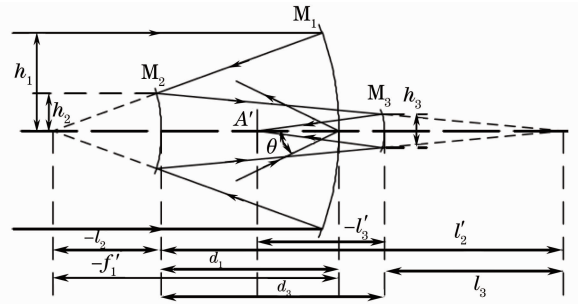


图 3 共轴三反系统的初始结构

Fig. 3 Initial configuration of coaxial three mirrors

由图 3 可知, 主、次、三镜的口径分别为 h_1, h_2, h_3 , f'_1 为主镜的焦距, l_2 为次镜顶点到主镜焦点的距离, l'_2 为次镜顶点到主、次两反射镜顶点的距离, l_3 为三镜顶点到主、次两反射镜顶点的距离, l'_3 为三镜顶点到三反系统焦点的距离。

次镜对主镜的遮拦比 α_1 为

$$\alpha_1 = l_2/f'_1 \approx h_2/h_1. \quad (10)$$

三镜对次镜的遮拦比 α_2 为

$$\alpha_2 = l_3/l'_2 \approx h_3/h_2. \quad (11)$$

次镜的放大率 β_1 为

$$\beta_1 = l'_2/l_2. \quad (12)$$

三镜的放大率 β_2 为

$$\beta_2 = l'_3/l_3. \quad (13)$$

利用近轴光学理论, 可得系统结构参数的有关公式:

$$r_1 = \frac{2}{\beta_1 \beta_2} f', \quad (14)$$

$$r_2 = \frac{2\alpha_1}{(1 + \beta_1)\beta_2} f', \quad (15)$$

$$r_3 = \frac{2\alpha_1 \alpha_2}{(1 + \beta_2)} f', \quad (16)$$

$$d_1 = \frac{r_1}{2} (1 - \alpha_1), \quad (17)$$

$$d_2 = \frac{r_1}{2} \alpha_1 \beta_1 (1 - \alpha_2). \quad (18)$$

由求出的 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$, 根据系统要求的球差 S_1 , 彗差 S_2 , 像散 S_3 , 即可求出三个反射面的非球面系数 $-e_1^2, -e_2^2, -e_3^2$, 至此, 可以确定系统的 8 个结构参数。

共轴三反光学系统在满足焦距及球差、彗差、像散和场曲条件下剩余三个可变参数, 如果再给定有关结构方面的三个条件, 则整个系统就可以确定了。共轴三反光学系统将不可避免的存在中心遮拦, 中

心遮拦将导致光学系统的有效通光口径变小,能量降低,最终导致整个光学系统的调制传递函数(MTF)下降^[8,9]。通过缩短主次镜的焦距可以有效地减少次镜对主镜造成的中心遮拦,但在一定焦距的情况下,缩短主次镜焦距意味着提高三镜的放大率,提高三镜放大率有利于消除整个系统的光学畸变。最后,通过图像传感器在像面上的合理排布避免二次遮拦的发生^[10,11]。

4 光学设计实例

设计了一焦距 $f=7200\text{ mm}$,相对孔径 $D/f=1/14.4$,视场角为 1.6° ,工作波段为 $500\sim 800\text{ nm}$ 的折轴三反光学系统,所采用的 TDI-CCD 图像传感器的像敏单元尺寸为 $10\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$ 。

由共轴三反光学系统的初始结构公式和光学设计软件 Code V 优化后可得到的光学系统如图 4 所示^[12]。

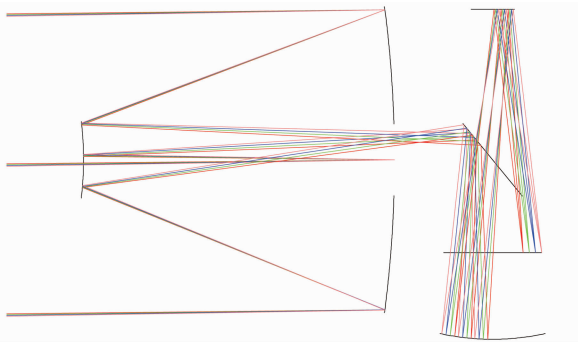


图 4 系统形式
Fig. 4 System layout

由图 4 所示可知,主反射镜采用接近抛物面的椭球面^[13],次反射镜采用凸双曲面,第三反射镜采用椭球面。加入两块折轴反射镜折叠光路,用于缩短整个光学系统的尺寸。第一块折轴反射镜与主次镜光轴夹角为 45° ,第二块折轴反射镜水平放置。

主镜采用 $F/1.4$ 的大相对孔径的反射镜^[14],同时减小一次像面焦距,大大缩短了主次镜间隔。三镜放大率的提高有助于降低主光线的入射高度和入射角度,从而降低整个光学系统的畸变量。第二块折轴镜可以以任意角度和位置放置,增加了设计的灵活性。光学系统的总长度介于系统焦距的 $1/8\sim 1/9$ 之间,缩小了整个相机的体积和重量。同时大 F 数的光学系统可放松光学系统的加工和装配公差,便于物理实现。

为了反映光学系统的成像情况,分别用点列图、调制传递函数和视场畸变来评价各个视场的成像质量。

由图 5 可知各视场光线所成像点的半径均方根值均在 $2.2\ \mu\text{m}$ 以内,远小于光学系统的艾里斑直径。图 6 可知所有视场的传递函数均达到衍射极限, 50 lp/mm 时各视场 MTF 均达到 0.38 ,且系统无渐晕。由图 7 可知在各个视场基本无像散,光学系统的畸变量小于 0.5% ,因此该光学系统的成像质量基本完好,适合于国土勘查、城市普查和立体成像等方面的需求。

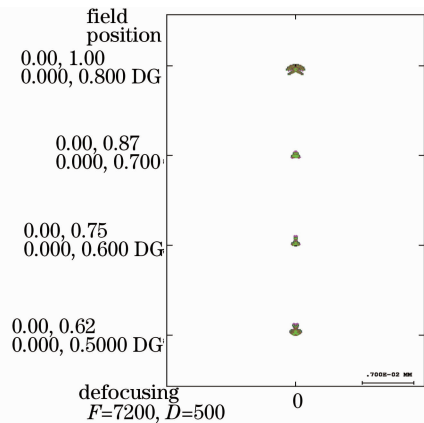


图 5 点列图
Fig. 5 Spot diagram

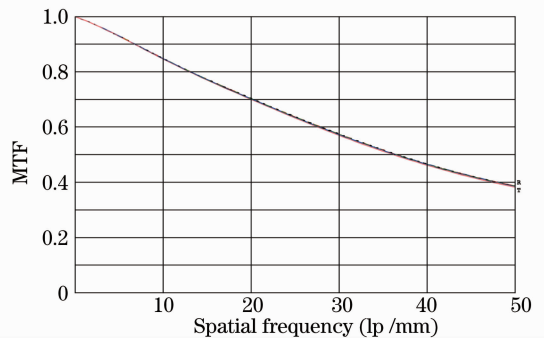


图 6 MTF 曲线
Fig. 6 MTF Curve

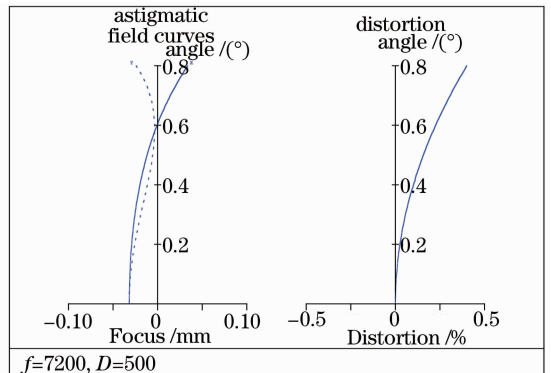


图 7 场曲和畸变
Fig. 7 Field curves and distortion

空间相机的地面像元分辨率由传感器的像元尺寸、轨道高度及光学系统的焦距决定,

$$R_{\text{GSD}} = \frac{aH}{f}, \quad (19)$$

式中 R_{GSD} 为地元分辨率, H 为轨道高度, f 为光学系统焦距, a 为传感器的像元尺寸。当轨道高度为 450 km, 像元尺寸为 $10 \mu\text{m}$, 焦距为 7200 mm 时, 地元分辨率为 0.62 m。

地面的覆盖宽度将由空间相机的有效视场角 2ω 决定, 当轨道高度 H 一定时, 地面覆盖宽度 W 表示为

$$W = 2H \tan \omega, \quad (20)$$

式中 W 为覆盖宽度, ω 为半视场角, 当系统的视场角 $2\omega = 1.6^\circ$ 时, 覆盖幅宽可以达到 12.5 km。

随着非球面加工技术^[15]、微应力装配技术、干涉测量技术和计算机辅助装调技术^[16]的应用及发展进步, 折轴三反光学系统的装调因子逐步提高, 可以达到 0.85~0.9 之间, 同时电子电路和数字信号处理技术水平的提高, 可以使整个相机系统的静态 MTF 达到 0.16~0.18 的水平^[16]。

本文所设计的光学系统 $\lambda F/P = 0.864 < 1$, 遵循了 $\lambda F/P$ 的设计原理, 同时兼顾了加工、装配可能造成的成像质量下降。

5 结 论

研究了 $\lambda F/P$ 原理在空间相机设计中的应用, 根据 $\lambda F/P$ 原理所设计的大 F 数、长焦距的光学系统不仅成像质量良好, 而且它的体积、质量、外形尺寸、适应性、工艺性和造价等都能满足一定的空间应用需求。随着空间对地观测系统的不断发展, 大 F 数、长焦距光学系统将会得到更加广泛的应用。

参 考 文 献

- 1 Li Hongzhang, Han Changyuan, Ma Dongmei. Assessment method of modulation transfer function of on-orbit space optical remote sensor using neural network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 631~637
- 2 Shi Guanghui. High resolution optical systems used to observation from the satellites to the earth and problems in design[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, **7**(2): 16~24
- 3 Don Light. A basic for estimating digital camera parameters[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2004, **70**(3): 297~300
- 4 D. F. Robert. Image quality and $\lambda F/P$ for remote sensing systems[J]. *Opt. Eng.*, 1999, **38**(7): 1229~1240
- 5 Pan Junhua. The methodic design of the IR imaging system with large aperture [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1475~1478
- 6 Liang Minyong, Liao Ningfang, Feng Jie *et al.*. Design and optimization of three cylindrical reflectors optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1359~1363
- 7 Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces[M]. Suzhou University Press, 2004. 130~138
- 8 Fan Xuewu, Ma Zhen, Chen Rongli *et al.*. Study on three-mirror reflective optic system having one image surface[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(8): 1001~1003
- 9 Liu Xinping. Three-mirror system with a folded mirror[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(1): 73~76
- 10 M. J. Sholl, M. L. Kaplan, M. L. Lampton. Three mirror anastigmat survey telescope optimization [C]. *SPIE*, 2008, **7010**: 70103M1~11
- 11 M. Lampton, M. Sholl. Comparison of on-axis three-mirror-anastigmat telescopes[C]. *SPIE*, 2007, **6687**: 66870S1-8
- 12 Dennis Gallagher, Jim Bergstrom, Joe Day *et al.*. Overview of the optical design and performance of the high resolution science imaging experiment[C]. *SPIE*, 2005, **5874**: 58740K1-14
- 13 Liang Pei. Study on collimation property of off-axis parabolic mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 909~913
- 14 Chen Jianping, Shen Lincheng. Model and control technology for machining large-diameter optical aspheric mirror[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1705~1709
- 15 Fu Lianxiao, Wu Yongguang, Li Xinglong *et al.*. Manufacture and test of cassegrain system's primary mirror with large relative diameter and lightweight[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 764~767
- 16 Yang Xiaofei, Zhang Xiaohui, Han Changyuan. Alignment of a three-mirror off-axis aspherical optical system by using gradual aberration optimization[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 115~120
- 17 付联效, 吴永刚, 李兴隆等. 大相对口径轻量化卡塞格林系统主镜的加工检验[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 764~767
- 18 梁晓飞, 张晓辉, 韩昌元. 用像差逐项优化法装调离轴三反射镜光学系统[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1): 115~120