

文章编号 1004-924X(2014)08-2067-08

## 空间成像与激光通信共口径光学系统设计

金 光<sup>1</sup>, 李艳杰<sup>1,3\*</sup>, 钟 兴<sup>1</sup>, 任秉文<sup>1,3</sup>, 王长庚<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 小卫星技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**针对空间成像系统与激光通信天线同时需要大口径光学系统而使卫星载荷质量增大的问题,提出了一种成像光学系统与收发合一激光通信天线共口径工作的新型光学系统。从像差理论出发,给出了以主次反射镜为共用部分、成像和通信工作在不同视场的共口径光学系统初始结构设计方法。实际设计了共口径光学系统,该系统口径为 600 mm,次镜遮拦比为 0.225,成像系统的传递函数在 50 lp/mm 时大于 0.47,接近衍射极限;发射分系统波像差远小于  $\lambda/20$ ,发射激光的最小束散角可达  $4 \mu\text{rad}$ ,出射光斑质量良好;接收系统达到衍射极限,光斑远小于探测端面,满足探测要求。最后,进行了公差分析,给出了光学系统的装调方法。该设计通过共用主次镜减少了系统总质量和总体积,同时满足空间成像和激光通信系统的性能要求。

**关 键 词:**共口径光学系统;卡塞格林天线;遮拦比;空间成像;激光通信

**中图分类号:**O435.2;TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142208.2067

## Design of co-aperture optical system for space imaging and laser communication

JIN Guang<sup>1</sup>, LI Yan-jie<sup>1,3\*</sup>, ZHONG Xing<sup>1</sup>, REN Bing-wen<sup>1,3</sup>, WANG Chang-geng<sup>2</sup>

(1. National & Local United Engineering Research Center of Small Satellite Technology,  
Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Changchun Institute of optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

\* Corresponding author, E-mail: liyanjiework@126.com

**Abstract:** Both space optical system and laser communicating antenna need a large aperture optical system, which increases the load of a satellite. This paper proposes a new co-aperture optical system for space imaging and laser communication to decrease the mass of the satellite. On the basis of primary aberration theory, the design method of initial configuration of the co-aperture optical system was presented, in which the imaging and communication share primary and secondary mirrors and work at

收稿日期:2014-01-16;修订日期:2014-02-27.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2012AA121502)

different fields. A co-aperture optical system was designed with a primary mirror with a diameter of 600 mm and a secondary mirror with a obstruction ratio of 0.225. The system shows good imaging capability and its Modulation Transfer Function(MTF) for all field of view is more than 0.47, very close to the diffraction limitation. The RMS wavefront of the laser sending section is far less than  $\lambda/20$ , and the sending laser beam is in good quality with a least divergence angle about  $4 \mu\text{rad}$ . The size of the light spot on the imaging surface is less than that of detecting surface, which satisfies the detecting request. Finally, the tolerance analysis was preformed and the assembling method was given. By sharing the primary and secondary mirrors, this design reduces the mass and volume of the system and satisfies the needs of space imaging and laser communication.

**Key words:** co-aperture optical system; Cassegrain antenna; obstruction ratio; space imaging; laser communication

## 1 引言

随着高分辨率成像系统的发展,出现了星际、星地海量数据快速传输的需求。激光的短波长,高载波频率特性使其具有传输速率高、信息容量大的优势,有望突破微波传输的带宽瓶颈;此外,激光通信具有功耗低、抗截获能力强等特点,适合于星际、星地、空空、空地等链路通信<sup>[1-3]</sup>;因此,空间激光通信系统的研制备受关注。现有的高分辨成像系统和激光通信系统一般是分开设计的 2 个独立系统。独立系统的优点是技术成熟、互不干扰,但是受系统体积、质量的限制,卫星负载会加大。对光学系统进行对比可知,激光通信系统多采用收发合一的卡塞格林光学天线,要求具有较大的入瞳口径<sup>[4]</sup>,以便能最大限度地收集来自光源的信号;成像系统多采用反射式光学系统,要求具有较大入瞳口径以满足高分辨率成像的要求。无疑,二者同时对大口径光学系统的需求必然增大载荷的总质量。

考虑现有的高分辨空间成像光学系统的大口径特点,本文提出一种成像光学系统与收发合一激光通信天线共口径工作的新型光学系统。对共口径系统的参数指标和设计方法进行了分析,提出了该系统的初始结构参数推导方法,并进行了共口径系统的实例设计和分析。设计结果表明,该系统完全满足空间成像和通信的需求,通过共用主次镜,可大大减少系统总质量。

## 2 共口径系统设计分析

无论是空间成像还是激光通信,光学系统口

径都是至关重要的系统参数,它直接关系到两系统能否完成预定的光学指标,同时也制约两系统的体积和重量。

由瑞利判据可得,成像光学系统的衍射极限角分辨率和通信发射系统衍射极限发散角(半角)均可表示为:

$$\alpha = \frac{1.22 \lambda}{D}, \quad (1)$$

式中:  $D$  为光学系统的入射光瞳口径。可见光学系统的口径越大,系统能实现的分辨能力越高,通信光的衍射极限发散角越小。

通信光束若以衍射极限角发射,激光通信的链路可以简单描述成:

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot \eta \cdot G_r \cdot \eta_t \cdot \eta_r, \quad (2)$$

式中:  $P_r$  为探测器接收的信号功率;  $P_t$  为发射单元的发射功率;  $G_t$  为发射光学天线增益;  $\eta$  为发射光学单元的效率(透过率);  $G_r$  为接收光学单元的增益;  $\eta_t$  为接收光学系统效率(透过率);  $\eta_r$  为信道传输损失。发射、接收光学天线的增益分别表示为:

$$G_t = \left(\frac{\pi D_t}{\lambda}\right)^2, \quad (3)$$

$$G_r = \left(\frac{\pi D_r}{\lambda}\right)^2, \quad (4)$$

其中:  $D_t$ 、 $D_r$  分别是发射光学系统、接收光学系统的口径。可见,对于通信光学单元,提高光学系统增益的有效途径为增大天线口径,从而增加接收端的功率密度。

为满足空间成像分辨率的要求,空间成像光学系统一般具有较大口径,在共口径系统的设计中,将成像系统作为发射天线使用,可以大大提高通信天线的增益。

一般设计具有多种功能的共口径系统初始结

构有两种方法:一是根据系统要求,先设计满足其中一种功能的结构,保持共口径部分不变,通过添加折转镜、透镜、反射镜等来满足其他功能需求;二是综合考虑各种功能对结构、像差的要求,同步推导二者的初始结构。本设计中成像部分采用同轴三反系统,通信部分采用反射系统加透镜的形式,成像和通信通过分视场工作——激光通信系统使用中心视场,成像系统使用偏视场——来共用同轴三反系统的主次反射镜<sup>[5]</sup>,共口径部分之后分光路工作,通信部分通过添加折转镜、分光镜、透镜来实现通信功能。同轴三反系统的初始结构计算相对成熟,而通信光学系统由于输入输出光束形式的多变不容易进行初始结构的确定,因此采用如下设计方法:

(1)先设计成像系统,在成像系统的设计中考虑以下特殊要求:

(a)主镜的口径满足成像系统和通信系统的性能要求。

(b)遮拦比为最优值。通信系统对卡塞格林形式的光学天线的遮拦比要求较高,遮拦比越小,激光发射和接收效率越高,因此在推导成像同轴三反光学系统的初始结构时,需要将主次镜的遮拦比设为变量,寻求成像系统性能最佳的最小遮拦比<sup>[6]</sup>。

(c)方便消杂光设计。将同轴三反成像系统的一次像面位置定为次、三镜之间,主镜之后。

(2)保持主次镜不变,添加折转镜、分光镜、透镜等构成激光通信分系统

### 3 共口径系统初始结构推导

#### 3.1 成像系统初始结构推导

同轴三反系统结构如图1所示,对于望远系

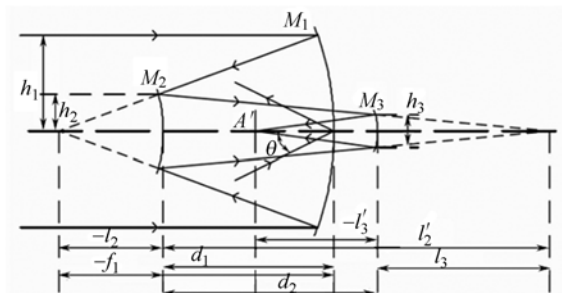


图1 同轴三反系统初始结构

Fig.1 Initial configuration of coaxial three-mirror system

统,假设物体位于无限远,即  $l_1 = \infty$ ,  $u_1 = 0$ ,入瞳位于主镜上,即  $x_1 = 0$ ,  $y_1 = 0$ 。主镜、副镜及第三镜的二次曲面系数分别为  $e_1^2$ 、 $e_2^2$  及  $e_3^2$ 。引入新参数  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ <sup>[7,8]</sup>。

一般情况下,成像系统的结构尺寸和焦距确定,即  $d_1$ 、 $d_2$ 、 $f$  确定。其中: $d_1$  是主次镜间距, $d_2$  是次镜和三镜间的距离, $f$  为成像系统焦距,它们与新引进参数之间的关系为:

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

$$d_2 = \frac{\alpha_1 (1 - \alpha_2)}{\beta_2} f. \quad (6)$$

系统场曲为:

$$S_N = \beta_1 \beta_2 - \frac{\beta_2 (1 + \beta_1)}{\alpha_1} + \frac{1 + \beta_2}{\alpha_1 \alpha_2}, \quad (7)$$

令场曲为0,消除变量  $\beta_1$ 、 $\beta_2$ ,可以得出遮拦比  $\alpha_1$  与  $\alpha_2$  间的关系:

$$\alpha_1^2 - \left[ 2 - \frac{2d_1}{d_2} + \frac{d_1 \alpha_2}{d_2} + \frac{d_1}{d_2 \alpha_2} \right] \alpha_1 - \frac{d_1}{\alpha_2 f} + 1 = 0. \quad (8)$$

鉴于在此系统中对遮拦比和一次像面位置有特殊要求,根据:

$$\alpha_2 = \frac{l_3}{l_2'} = 1 - \frac{d_2}{l_2'}. \quad (9)$$

可知在次镜、三镜间距确定的情况下,三镜对副镜的遮拦比由一次像面位置决定,系统的  $\alpha_1$  与一次像面位置  $l_2'$  有关:

$$\alpha_1^2 - \left( \frac{d_1}{l_2' - d_2} - \frac{d_1}{l_2'} + 2 \right) \alpha_1 - \frac{d_1 l_2'}{(l_2' - d_2) f} + 1 = 0. \quad (10)$$

对每个一次像面,根据式(10)同时结合同轴三反系统的结构特征判断,系统没有或者有唯一一个满足消像散条件的次镜遮拦比。

以实际的光学系统为例,分析一次像面位置对遮拦比的影响。假定  $d_1 = -400$  mm,  $d_2 = 700$  mm,  $f = 3\,600$  mm,根据前述消杂光设计要求有:

$$|d_1| < l_2' < |d_2|. \quad (11)$$

则  $\alpha_1$ 、 $l_2'$  二者关系如图2所示,可见,当  $l_2'$  小于某临界值时,光学系统的遮拦比随一次像面位置的远离次镜而减小,超过此临界值时,光学系统的遮拦比迅速增大超出可行范围。

根据  $\alpha_1$  和  $l_2'$  等可以确定系统的  $\alpha_2$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ ,由求出的  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ ,根据系统要求的球差、彗差、像散值即可求出3个反射面的非球面系数  $-e_1^2$ 、 $-e_2^2$ 、 $-e_3^2$ ,同时可以确定成像光学系统的结构参数<sup>[7-8]</sup>。

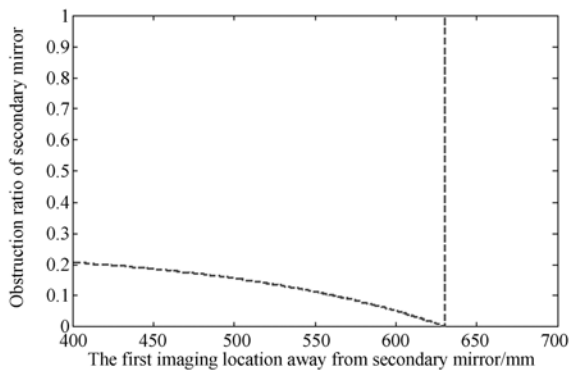


图 2 一次像面位置和次镜遮拦比的关系

Fig. 2 Relationship between first imaging location and obstruction ratio of the secondary mirror

在本成像系统中,孔径光阑在主镜上,则成像系统畸变的三级像差系数为:

$$S_V = S_{V2} + S_{V3} =$$

$$\begin{aligned} & \frac{D\theta^3}{2} \left\{ \frac{(\alpha_1 - 1)^3 (1 + \beta_1) (1 - \beta_1)^2}{4\beta_1^3 \alpha_1^2} - \right. \\ & \frac{3(\alpha_1 - 1)^2 (1 + \beta_1) (1 - \beta_1)}{2\beta_1^2 \alpha_1^2} + \\ & \frac{2(\alpha_1 - 1)\beta_2 (1 + \beta_1)}{\beta_1 \alpha_1^2} - \frac{(\alpha_1 - 1)^3 e_2^2 (1 + \beta_1)^3}{4\beta_1^3 \alpha_1^2} \cdot \\ & \frac{[\alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \beta_1 (1 - \alpha_2)]^3 (1 + \beta_2) (1 - \beta_2)^2}{4\alpha_1^2 \alpha_2^2 \beta_1^3 \beta_2^3} \cdot \\ & \frac{3[\alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \beta_1 (1 - \alpha_2)]^2 (1 + \beta_2) (1 - \beta_2)}{2\alpha_1^2 \alpha_2^2 \beta_1^3 \beta_2^3} \cdot \\ & \frac{2[\alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \beta_1 (1 - \alpha_2)] (1 + \beta_2)}{\alpha_1^2 \alpha_2^2 \beta_1 \beta_2} + \\ & \left. \frac{[\alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \beta_1 (1 - \alpha_2)]^3 e_3^2 (1 + \beta_2)^3}{4\alpha_1^2 \alpha_2^2 \beta_1^3 \beta_2^3} \right\}. \quad (12) \end{aligned}$$

假定系统的口径为 300 mm,成像视场角为  $0.5^\circ$ ,根据式(12),畸变与一次像面位置的关系如图 3 所示。只有当一次像面位置与次镜的距离在一定范围内时成像系统的畸变较小,在此范围内,系统的畸变随一次像面相对主镜的远离而增大。

一般说来,光学系统的畸变对成像的影响只是使像对物产生失真,并不影响像的清晰度,在共轴三反系统的设计中一般不对畸变进行限制。但是某些特殊情况下畸变对成像质量影响较大<sup>[9]</sup>,例如,目前高分辨、大 F 数、轻小型空间相机普遍采用 TDI CCD 这一特殊的线阵 CCD 器件,TDI CCD 具有多级结构,采用时间延迟积分技术来延长曝光时间以提高分辨率,光学系统的畸变对推扫成像过程中的 TDI CCD 产生附加像移,影响相

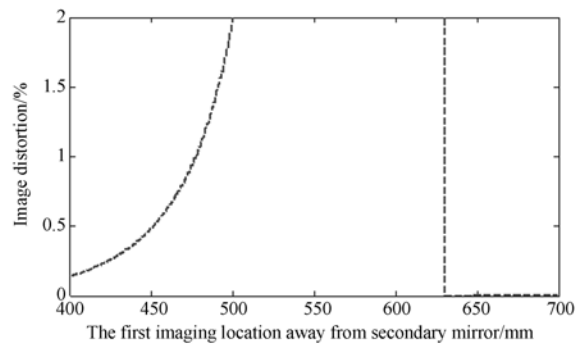


图 3 一次像面位置与像面畸变的关系

Fig. 3 Relationship between first imaging location and image distortion

机的成像质量。因此在成像光学系统设计中应综合考虑系统的一次像面位置对遮拦比和畸变的影响,选取合适的一次成像位置。

### 3.2 通信系统初始结构推导

卫星光通信系统具有以下要求<sup>[10-11]</sup>:

(1) 光学系统波像差小于  $\lambda/20$ ;

(2) 接收系统中,光束经主镜、准直镜之后光斑质量达到光探测部分的要求;

(3) 发射系统中,高斯光束的束散角介于一定范围之间,由系统的跟踪精度和链路功率等决定。

由于光通信系统的视场较小,激光通信光学系统的像差主要为球差和彗差。三级像差理论给出的赛德尔球差、彗差系数为:

$$S_I = \sum hP + \sum h^4 K, \quad (13)$$

$$S_{II} = \sum yP - J \sum W + \sum h^3 yK. \quad (14)$$

主次镜部分的球差、彗差系数为:

$$S_{I12} = \frac{h_1^4}{4f'_{12}} \left\{ \left[ \frac{\alpha_1 (\beta_1 - 1)^2 (\beta_1 + 1)}{4} - \frac{\alpha_1 (\beta_1 + 1)^3}{4} e_2^2 \right] - \frac{\beta_1^3}{4} (1 - e_1^2) \right\}, \quad (15)$$

$$S_{II12} = \frac{h_1^3 \theta}{f'_{12}} \left\{ \frac{1 - \alpha_1}{\alpha_1} \left[ \frac{\alpha_1 (\beta_1 + 1)^3}{4\beta_1} e_2^2 - \frac{\alpha_1 (\beta_1 + 1) (\beta_1 - 1)^2}{4\beta_1} \right] - \frac{1}{2} \right\}, \quad (16)$$

其中:  $f'_{12} = f'_{\text{image}}/\beta_2$ ,  $f'_{\text{image}}$  为成像系统焦距;  $h_1 = D/2$ ;  $\theta$  为通信系统的视场角。根据 PW 法可以求出后续补偿透镜的初始结构。

## 4 实例设计

### 4.1 设计实例与性能分析

该实例系统应用于对地详查和通信,根据系

统总体要求采用线阵 CCD 推扫成像;通信分系统中发射部分使用分布反馈半导体激光器 (DFB-LD),利用 EDFA 将速率为 2 Gb/s,功率为几十 mW 的信号放大到 W 量级的信号发射出去;通信接收部分采用多模光纤耦合 APD 探测器<sup>[12]</sup>。该共口径光学系统参数如表 1 所示。

表 1 共口径光学系统参数

Tab.1 Parameters of co-aperture optical system

| 指标                       | 成像系统                      | 通信系统         |                 |
|--------------------------|---------------------------|--------------|-----------------|
|                          |                           | 发射           | 接收              |
| 口径/mm                    |                           | 600          |                 |
| 系统长度/mm                  |                           | <1 500       |                 |
| 波段/ $\mu\text{m}$        | 0.5~0.8                   | 1.565        | 1.535           |
| 焦距/mm                    | 7 200                     |              |                 |
| 穿轨方向全视场角：                |                           |              |                 |
| 视场角                      | $2T_x=\text{FOV}=1^\circ$ | $0^\circ$    | 110             |
|                          | 偏斜角：                      |              | $\mu\text{rad}$ |
|                          | $T_y=0.3^\circ$           |              |                 |
| 通信发射束散角/ $\mu\text{rad}$ |                           | $\theta<200$ |                 |

设计时,根据光学系统结构紧凑的原则,成像分系统总长度为 1 400 mm,主次镜间距为 800 mm。根据前述共口径光学系统中成像分系统的初始结构推导方法,综合考虑系统的一次成像位置对系统的遮拦比和畸变的影响,将一次成像位置定为  $l_2'=900\text{ mm}$ ,则系统的零度视场遮拦比为 0.186;因系统的视场不为 0,所以系统的实际遮拦比是 0.225,仍然满足成像和通信对系统遮拦比的要求,此时成像系统的最大畸变为 0.67%,符合成像性能要求。成像光学系统的参数如表 2 所示,结构如图 4 所示。

表 2 成像系统结构参数

Tab.2 Structural parameters of imaging system

|     | 半径 R/mm   | 厚度/mm   | K      |
|-----|-----------|---------|--------|
| 主镜  | -1 965.40 | -800    | -0.974 |
| 次镜  | -458.47   | 1 400   | -2.020 |
| 三镜  | -597.96   | -443.67 | -0.547 |
| 折叠镜 | Infinity  | 300     | 0      |

根据经调制后出射的激光光束发散角确定发射系统的入射数值口径(NA)为 0.22,为了减少能量损失,应努力使发射光束充满整个口径。多模光纤的接收端面为  $62.5\text{ }\mu\text{m}$ ,光纤 NA 也为 0.22。通

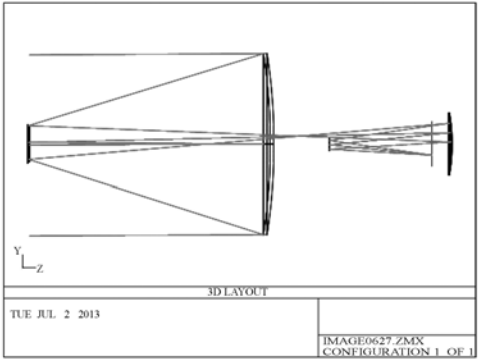


图 4 成像系统光路  
Fig. 4 Layout of imaging system

信系统内部光路采用 1 个分光片完成 2 路分光,完成通信发射和通信接收光路的分离。利用 ZEM-AX-EE 软件实现如图 5 所示的共口径设计。

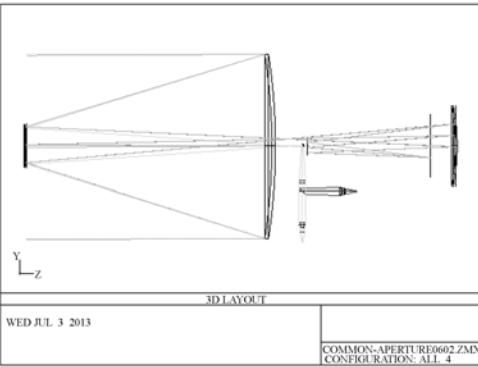


图 5 共口径系统光路  
Fig. 5 Layout of co-aperture optical system

最终系统的成像质量接近衍射极限,如图 5 所示,系统的传递函数在 50 lp/mm 时大于 0.47,且在有效视场内光学系统的畸变量小于 0.7%,如图 6 所示。发射分系统波像差为  $0.009\lambda$ ,远小于  $\lambda/20$ ,发射束散角(半角)最小可达  $4\text{ }\mu\text{rad}$ ,出射光束光强分布如图 8 所示,通过微调出射光源和系统的相对位置,可增大系统发射光束束散角。接收系统波像差为  $0.0022\lambda$ ,通信光接收系统点列如图 9 所示,衍射光斑远小于多模光纤的端面,给系统的装调和光束到达角的起伏留出了一定的余量。

对共口径光学系统分析发现,此系统可替代 3 个光学系统的工作,600 mm 口径成像光学系统、600 mm 口径的激光发射天线和接收天线,可使载荷布局更加紧凑,大大减轻系统的总质量和总体积。

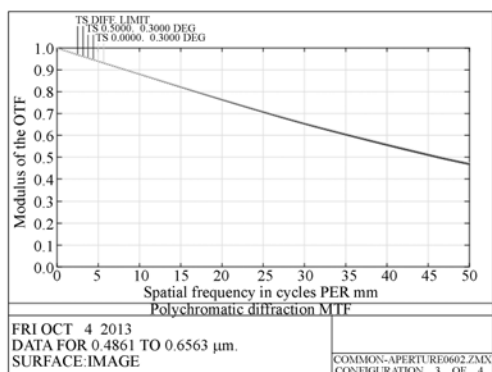


图 6 成像系统传递函数曲线

Fig. 6 MTF curves of imaging system

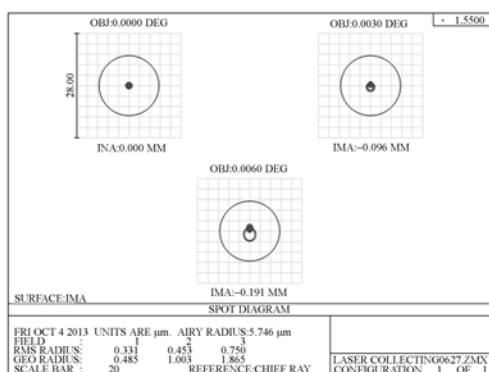


图 9 通信光接收点列图

Fig. 9 Spot diagram of laser receiving system

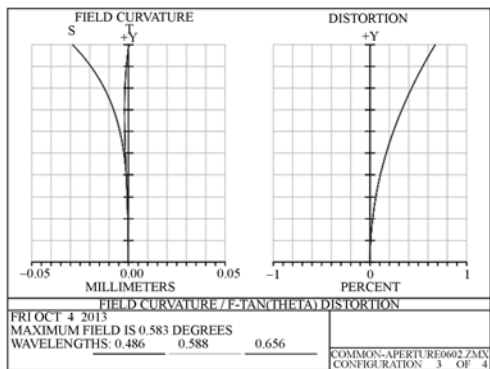


图 7 成像分系统的场曲和畸变曲线

Fig. 7 Field curvature and distortion curves of imaging system

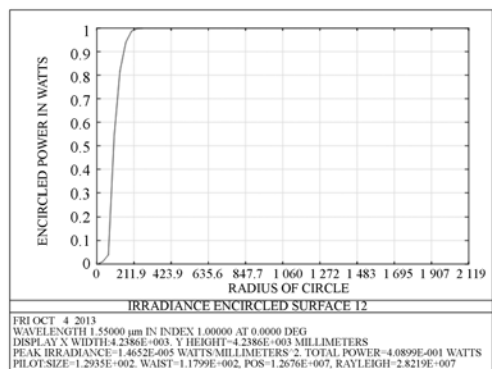


图 8 激光发射光束能量分布

Fig. 8 Encircled energy of transmitting laser

当成像系统的分辨率要求提高时,系统的口径增大,以上设计方式依然适用,同时发射束散角可以更小、激光接收天线收集的能量更多,通信天线增益更高,但也对系统的装调和通信的捕获跟踪精度等提出了更高的要求。

## 4.2 系统公差考虑

在后续共口径光学系统的加工、装调中,需要合理地进行公差分配。运用 ZEMAX 软件中的公差计算与分析程序分别对成像系统、接收系统、发射系统的公差敏感度进行分析<sup>[13]</sup>,并与目前常用的非共口径光学系统进行了对比。系统的公差参数包括:各面反射镜的曲率半径、面型系数、镜面间距、偏心、倾斜;透镜组中光学元件厚度、空气间隔、偏心、折射率、阿贝数和玻璃不均匀性等。考虑每个公差参数对相应光学性能的影响情况,对敏感的光学元件给出了较严格的公差,对于非敏感的光学元件放松了要求,对共用部分的公差取各分系统相应公差中较严格的公差取值。通过灵敏度分析、反灵敏度分析及蒙特卡罗分析得到合理的公差分配及对光学系统性能的预算结果。

传统的同轴三反成像系统的装调技术已经较为成熟,利用计算机辅助装调技术,先粗调好主镜与次镜,再进行三镜的安装<sup>[14]</sup>。在本共口径系统的装调中,利用同样的方法进行主次镜的装调,然后进行成像三镜和通信透镜组的安装和精调。从与常规系统的对比结果看,虽然共口径系统中通信系统对装调精度要求较高,但是本文共口径系统总的装调难度并没有随共口径设计而增加。

## 5 结 论

本文提出了成像和通信共用光学系统口径的设计思想,对系统参数和设计方法进行了分析,同时应用三级像差理论给出了共口径光学系统初始结构推导方法。通过对共口径系统的实例设计以及对该实例成像质量和通信性能的分析,证明了

此种设计方法的可行性。此外,对该系统的公差进行了分析,提出了该形式共口径系统的装调方法。设计、仿真结果表明:本文提出的共口径初始

结构设计方法可行有效,该形式系统可以满足成像和通信要求,且没有因共口径设计而增加加工、装调难度。

## 参考文献:

- [1] 姜会林. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京:国防工业出版社,2010.  
JIANG H L. *The Technologies and Systems of Space Laser Communication*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [2] HENNIGER H, WILFERT O. An introduction to free-space optical communications [J]. *Radioengineering*, 2010, 19(2):203-212.
- [3] SUN X L, SKILLMAN D R, HOFFMAN E D. Free space laser communication experiments from Earth to the Lunar reconnaissance Orbiter in lunar orbit [J]. *Optics Express*, 2013, 21(2):1865-1871.
- [4] 陈纯毅, 杨华民, 姜会林, 等. 大气光通信中大孔径接收性能分析与孔径尺寸选择 [J]. 中国激光, 2009, 36(11): 2957-2961  
CHEN CH Y, YANG H M, JIANG H L, *et al.*. Performance analysis of large-aperture receiving and selection of aperture size in atmospheric optical communications [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(11): 2957-2961. (in Chinese)
- [5] 魏群, 艾兴乔. 小型可见光双视场光学系统的研制 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(4):739-744.  
WEI Q, AI X Q. Development of small-scale and dual-field visible light optical system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4): 739-744. (in Chinese)
- [6] 钟兴, 张元, 金光. 大视场光学系统像面照度均匀性优化[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 209-214.  
ZHONG X, ZHANG Y, JIN G. Illumination uniformity optimization of wide-viewing-field optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3):209-214. (in Chinese)
- [7] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004.  
PAN J H. *The Design, Manufacture and Test of The Aspherical Optical Surfaces* [M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004. (in Chinese)
- [8] 李旭阳, 李英才, 马臻, 等. 大F数长焦距空间相机光学系统设计[J]. 光学学报, 2010 (7): 2093-2097.  
LI X Y, LI Y C, MA ZH, *et al.*. Optical system design of space camera with large F number and long focal length [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(7): 2093-2097.
- [9] 钟兴, 金光. 超广角短波红外成像光谱仪前置光学系统设计[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 226-231.  
ZHONG X, JIN G. Design of extra wide short wave infrared spectral imager's fore-optics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10):226-231. (in Chinese)
- [10] 俞建杰. 卫星光通信光学系统优化设计及性能评测方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学博士论文, 2009.  
YU J J. *Research on the optimal design and performance evaluation methods of the optical system in intersatellite optical communication* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
- [11] 刘宏展, 纪越峰, 刘立人. 像差对星间相干光通信接收系统误码性能的影响[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 38-43.  
LIU H ZH, JI Y F, LIU L R. Effect of aberration on performance of the bit error rate in an inter-satellite coherent optical communication receiving system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 38-43. (in Chinese)
- [12] 向劲松. 采用光纤耦合及光放大接收的星地光通信系统及关键技术[D]. 成都: 电子科技大学, 2007.  
XAING J S. *Fiber coupled and optically preamplified satellite-to-ground bidirectional laser communication systems and its key technologies* [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2007. (in Chinese)
- [13] 王红, 田铁印. 三线阵测绘相机光学系统的设计和公差分析[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7):

1444-1450.

WANG H, TIAN T Y. Design of three line array mapping camera and its tolerance analysis [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19 (7): 1444-1450. (in Chinese)

[14] 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.

WEI X X, XU F, YU J J. 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)

#### 作者简介:



**金 光**(1958—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要研究方向为天基空间光学成像技术。E-mail: jing@ciomp.ac.cn



**李艳杰**(1988—),女,山东济宁人,博士研究生,2010年于山东大学取得学士学位,主要从事光学系统设计、激光通信等方面的研究。E-mail: liyan-jiework@126.com

(本栏目编辑:曹 金)

(版权所有 未经许可 不得转载)