

文章编号: 0253-2239(2010)11-3300-06

四反射镜光学系统像差分析与设计

梁士通^{1,2} 杨建峰¹ 薛彬¹ 阮萍¹ 王洪伟^{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 100049)

摘要 反射系统具有体积小、重量轻成像性能优良等特点,在航天遥感中具有重要的应用潜力。分析了基于PW方法的四反射镜系统像差理论,推导了由系统遮拦比和放大率表示的系统初级像差表达式,并给出了四反射镜系统的基本设计过程。设计理论和方法适合于同轴四反射镜系统和离轴四反射镜系统的初始结构设计。基于PW方法的设计理论,设计了空间遥感用同轴四反射镜光学系统和一离轴四反射镜系统。两系统成像质量良好,结构紧凑,筒长与焦距之比可达1/6.4,体积和重量均满足技术指标要求,体现了四反射镜系统的优势,证明了理论分析的正确性与实用性。

关键词 像差理论;四反射镜光学系统;遥感;空间相机

中图分类号 TH751 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103011.3300

Aberration Analysis and Design of Four-Mirror Reflective Optical System

Liang Shitong^{1,2} Yang Jianfeng¹ Xue Bin¹ Ruan Ping¹ Wang Hongwei^{1,2}

(¹ Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China)
(² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Reflective optical systems have small size, light weight and excellent imaging performance, which makes it very popular in space remote sensing systems. The third order aberration expression and basic design process of four-mirror system are given by aberration analysis based on PW method. Two space remote sensing systems using coaxial and abaxial four-mirror system is designed under the guidance of the aberration theory. The two systems have excellent imaging performance. The systems have compact structure and the physical length to the EFL ratio is about 1/6.4. Both of the size and weight meet the technical requirements, the correctness and practicality of the theoretical analysis are proved.

Key words aberration theory; four-mirror optical system; remote sensing; space camera

1 引言

空间遥感光学系统正朝着大口径、长焦距、小体积和轻量化方向发展。对于常用的折射式光学系统,大口径和长焦距等要求会带来体积和重量的增加,以及像差校正的困难,使折射式光学系统在空间遥感系统中的应用受到限制。反射式光学系统由于其无色差、光学系统可折叠、便于轻量化等优势在空

间遥感系统中得到广泛使用。

按系统中反射镜个数分类,反射式光学系统主要有两反射光学系统、三反射光学系统和四反射光学系统等^[1~4]。两反射光学系统结构简单,但是系统自由参数较少,能同时校正的像差较少;三反射光学系统是在两反射系统的基础上加入一反射镜组成的,这增加了系统自由变量,可以校正更多的像差。

收稿日期: 2010-01-19; 收到修改稿日期: 2010-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(60808028)资助课题。

作者简介: 梁士通(1984—),男,博士研究生,主要从事光学设计和光学信息处理技术等方面的研究。

E-mail: liangshitong@yahoo.cn

导师简介: 杨建峰(1969—),男,研究员,博士生导师,主要从事光学设计和成像光谱光等方面的研究。

E-mail: yangjf@opt.ac.cn

但是三反射系统的系统长度和焦距的比值不能做的很小^[5,6],导致系统体积较大;四反射光学系统是在三反射系统的基础上再加入一反射镜组成的,系统的自由参数更多,有可能得到成像性能、体积和重量符合要求的设计结果^[6]。在同轴四反射镜的基础上加入一定的离轴量,则可以得到离轴四反射系统^[7,8]。离轴系统因其无中心遮拦,进入光学系统的光通量较大,调制传递函数(MTF)较高,系统长度和焦距可以做得较小而受到重视。国外对此有较多研究,国内也开展了相关研究^[6,8~11]。分析了离轴四反射系统的光学结构型式,推导了基于PW方法的四反射镜光学像差理论,分析了四反射镜的设计过程,并在此理论的基础上设计了两四反射镜光学系统,系统具有体积小,重量轻,成像性能优良等特点,验证了理论分析的正确性。

2 四反射镜光学系统的像差分析

离轴四反射系统是在同轴四反射系统的基础上加入一定的孔径或视场离轴量得到的,在未给系统各面加入光轴倾斜量时,对同轴四反射系统的像差分析也适用于离轴四反射系统。同轴四反射镜光学系统的基本结构如图1所示,M1,M2,M3和M4分别为主镜、次镜、三镜和四镜, F 为系统焦点, f_1 为主镜焦距,设系统孔径光阑位于主镜上。 l_2, l_3, l_4 和 l'_2, l'_3, l'_4 分别次镜、三镜和四镜的物距和像距,设四个反射镜的半径分别为 r_1, r_2, r_3 和 r_4 ,二次非球面系数分别为 e_1^2, e_2^2, e_3^2 和 e_4^2 。

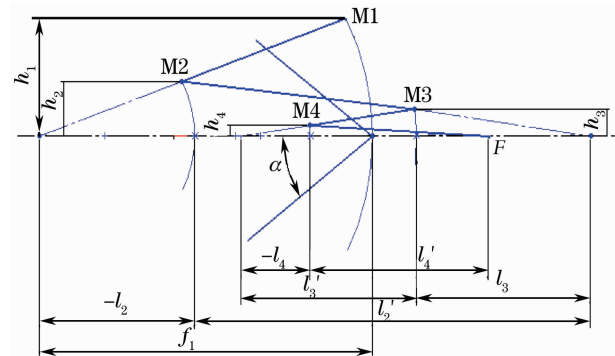


图1 同轴四反射镜光学系统示意图

Fig. 1 Diagram of the coaxial four-mirror optical system

反射系统中的遮拦比 α 反映了镜面对其前一镜面的挡光程度,是反射系统应予以控制的一个参数。放大率 β 反映了系统对物的放大程度。自第二反射镜开始,各反射镜对其前一反射镜的遮拦比和放大率为

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{l_2}{f_1} \approx \frac{h_2}{h_1}, & \beta_1 = \frac{l'_2}{l_2} = \frac{u_2}{u_1}, \\ \alpha_2 = \frac{l_3}{l_2} \approx \frac{h_3}{h_2}, & \beta_2 = \frac{l'_3}{l_3} = \frac{u_3}{u_2}, \\ \alpha_3 = \frac{l_4}{l_3} \approx \frac{h_4}{h_3}, & \beta_3 = \frac{l'_4}{l_4} = \frac{u_4}{u_3}, \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\beta = \beta_1 \beta_2 \beta_3$ 。

对于四反射系统,各个反射镜的物空间和像空间的折射率分别为

$$\begin{cases} n_1 = n'_1 = n_3 = n'_3 = 1, \\ n'_2 = n_2 = n'_4 = n_4 = -1. \end{cases} \quad (2)$$

根据PW方法,反射系统的三级像差表达式为^[1]

$$\begin{cases} S_I = \sum hP + \sum h^4 K = A_1 + \sum h^4 K, \\ S_{II} = \sum yP - J \sum W + \sum h^3 yK = \\ \quad A_2 + \sum h^3 yK, \\ S_{III} = \sum \frac{y^2}{h} P - 2J \sum \frac{y}{h} W + J^2 \sum \varphi + \\ \quad \sum h^2 y^2 K = A_3 + \sum h^2 y^2 K, \\ S_{IV} = \sum \frac{\Pi}{h}, \\ S_V = \sum \frac{y^3}{h^2} P - 3J \sum \frac{y^2}{h^2} W + \\ \quad J^2 \sum \frac{y}{h} (3\varphi + \frac{\Pi}{h}) - J^3 \sum \frac{1}{h^2} \Delta \left(\frac{1}{n^2} \right) + \\ \quad \sum h y^3 K = A_4 + \sum h y^3 K, \end{cases} \quad (3)$$

式中 P, W, Π, K, J ,为

$$\begin{cases} P = \left[\frac{\Delta u}{\Delta \left(\frac{1}{n} \right)} \right]^2 \Delta \left(\frac{u}{n} \right), & W = \frac{\Delta u}{\Delta \left(\frac{1}{n} \right)} \Delta \left(\frac{u}{n} \right), \\ \Pi = \frac{\Delta(mu)}{m'}, & \varphi = \frac{1}{h} \Delta \left(\frac{u}{n} \right), \\ K = -\frac{e^2}{R^3} \Delta n, & J = 1. \end{cases} \quad (4)$$

式中 h 为第一近轴光线在各面上的投射高度, u 为各面入射光线与光轴的夹角, n 为各面后折射率, e^2 为各面的二次非球面系数。对系统进行光线追迹,即可求各面的 h, u, n ,带入(3)式和(4)式便可得到系统的初级像差系数。根据PW方法,首先对系统进行归一化,设系统焦距为1,然后对系统的第一近轴光线和第二近轴光线进行追迹。

对于第一近轴光线,其初始条件为

$$l_1 = \infty, u_1 = 0, h_1 = 1, \quad (5)$$

(1)式和(2)式及 $u_i = u'_{i-1}$ 可以得到第一近轴光线在各反射镜上的投射高度和出射角为

$$\begin{cases} h_1 = 1, & u'_1 = \beta_1 \beta_2 \beta_3, \\ h_2 = \alpha_1, & u'_2 = \beta_2 \beta_3, \\ h_3 = \alpha_1 \alpha_2, & u'_3 = \beta_3, \\ h_4 = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3, & u'_4 = 1. \end{cases} \quad (6)$$

由于 $u_1 = 0$, 且 $f = f_1 \beta = 1$, 则主镜焦距为

$$f_1 = 1/\beta, \quad (7)$$

根据(2)式和(6)式可以求得

$$\begin{cases} [\Delta(nu)]_1 = -\beta_1 \beta_2 \beta_3, \left[\Delta\left(\frac{u}{n}\right)\right]_1 = -\beta_1 \beta_2 \beta_3 \\ [\Delta(nu)]_2 = \beta_2 \beta_3 (1 + \beta_1), \\ \left[\Delta\left(\frac{u}{n}\right)\right]_2 = \beta_2 \beta_3 (1 + \beta_3) \\ [\Delta(nu)]_3 = -\beta_3 (1 + \beta_2), \\ \left[\Delta\left(\frac{u}{n}\right)\right]_3 = -\beta_3 (1 + \beta_2) \\ [\Delta(nu)]_4 = 1 + \beta_3, \left[\Delta\left(\frac{u}{n}\right)\right]_4 = 1 + \beta_3 \end{cases} \quad (8)$$

对于反射系统, PW 方法中根据 P, W 和 Π 的定义, 将(2)式, (6)式和(8)式代入(4)式, 即可求得各反射面的 P, W, Π 和 φ 值。

在进行第一主光线追迹时, 可以得到由遮拦比和放大率表示的各面焦距和间隔:

$$\begin{cases} f'_1 = \frac{1}{\beta_1 \beta_2 \beta_3}, & d_1 = \frac{1 - \alpha_1}{\beta_1 \beta_2 \beta_3}, \\ f'_2 = \frac{\alpha_1}{(1 + \beta_1) \beta_2 \beta_3}, & d_2 = \frac{\alpha_1 (1 - \alpha_2)}{\beta_2 \beta_3}, \\ f'_3 = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{(1 + \beta_2) \beta_3}, & d_3 = \frac{\alpha_1 \alpha_2 (1 - \alpha_3)}{\beta_3}, \\ f'_4 = \frac{\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3}{1 + \beta_3}, & d_4 = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3, \end{cases} \quad (9)$$

以上公式推导过程对第一近轴光线进行了追迹。在归一化 PW 方法中, 对一条以入射角 $\alpha = -1$ 、通过孔径光阑中心的第二近轴光线进行追迹, 可以得到主光线在各反射面上的高度 y_i :

$$\begin{cases} y_1 = 0 \\ y_2 = \frac{\alpha_1 - 1}{\beta_1 \beta_2 \beta_3} \\ y_3 = \frac{\alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \beta_1 (1 - \alpha_2)}{\beta_1 \beta_2 \beta_3}, \\ y_4 = \frac{\eta}{\beta_1 \beta_2 \beta_3} \end{cases} \quad (10)$$

式中 $\eta = \alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \beta_1 (1 - \alpha_2) - (1 - \alpha_3) (\alpha_1 - 1) (1 + \beta_2) - (1 - \alpha_3) (\alpha_1 - \beta_1 - 1) (1 - \alpha_2 + \beta_2)$ 。

非球面部分的推导结果如下:

$$\begin{cases} K_1 = \frac{e_1^2}{4} \beta_1^3 \beta_2^3 \beta_3^3, & K_2 = -\frac{e_2^2}{4} \frac{\beta_2^3 \beta_3^3 (1 + \beta_1)^3}{\alpha_1^3}, \\ K_3 = \frac{e_3^2}{4} \frac{\beta_3^3 (1 + \beta_2)^3}{\alpha_1^3 \alpha_2^3}, & K_4 = -\frac{e_4^2}{4} \frac{(1 + \beta_3)^3}{\alpha_1^3 \alpha_2^3 \alpha_3^3}, \end{cases} \quad (11)$$

将各参数代入(3)式, 即可得到由各反射镜遮拦比、放大率和二次非球面系数表示的像差表达式。由(3)式可知, 四反射镜系统的场曲 S_{IV} 与非球面系数无关, 为满足平像场条件, 需满足

$$\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} = 0. \quad (12)$$

在系统各反射面的遮拦比、放大率确定后, 可以令 $S_I, S_{II}, S_{III}, S_V$ 为零, 求得各面的二次非球面系数, 达到消除其它像差的目的。

$$\begin{bmatrix} h_1^4 & h_2^4 & h_3^4 & h_4^4 \\ h_1^3 y_1 & h_2^3 y_2 & h_3^3 y_3 & h_4^3 y_4 \\ h_1^2 y_1^2 & h_2^2 y_2^2 & h_3^2 y_3^2 & h_4^2 y_4^2 \\ h_1 y_1^3 & h_2 y_2^3 & h_3 y_3^3 & h_4 y_4^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

式中 $A_i (i=1, 2, 3, 4)$ 可由(4)式求得。求解(13)式的线性方程组并代入(11)式即可得到各反射面的二次非球面系数。

通过以上推导可得出四反射镜系统的基本设计过程^[7~10]

1) 根据技术指标中的系统体积、筒长、伸出量、相对孔径和主镜口径等参数并结合(9)式确定系统中各反射面的遮拦比和放大率等参数;

2) 将遮拦比和放大率等参数代入以上各推导公式, 求解得到四个非球面系数;

3) 根据遮拦比和放大率等参数求解各反射面的曲率半径和间距;

4) 加入一定的孔径离轴量或视场离轴量, 形成离轴四反射镜系统, 从而避免光线遮拦, 提高系统成像质量。

3 设计实例

3.1 实例 1

根据系统整体要求, 光学系统性能指标如表 1 所示。

为了使系统结构更加紧凑, 可以限制各镜间距以减小系统尺寸。设系统尺寸满足(14)式

$$d_1 = c_2 d_2 = c_3 d_3 = c_4 d_4. \quad (14)$$

表 1 系统性能指标

Table 1 Performance of the system

Parameters	Value
Wavelength /nm	360~790
Effective focal length /mm	10000
F	7
Field of view /($^{\circ}$)	0.1
Pixel size / μm^2	13×13
Total axial length /mm	<2000

在初始结构设计中一般对主镜的焦距 f_1 和遮

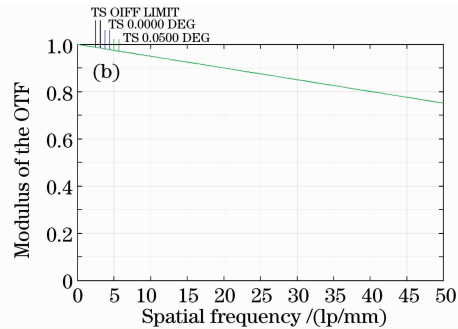
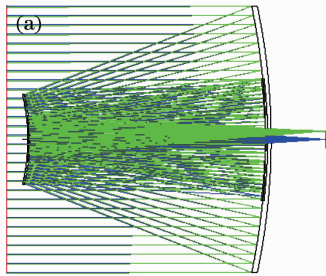


图 2 系统初始结构及其 MTF 曲线

Fig. 2 Initial layout and MTF curve of the system

对其进行缩放满足系统焦距要求后进行多次优化,并适当调整各反射镜面型,可得如图 3 所示的系统。

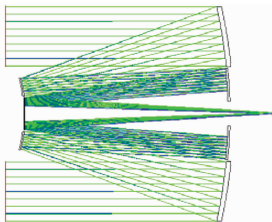


图 3 优化后系统结构图

Fig. 3 Layout of the system after optimization

系统焦距 10^4 mm,轴向总长约 1556 mm,伸出量约 250 mm,筒长与焦距之比约为 1/6.4,结构比较紧凑,满足系统的结构要求。MTF 曲线如图 4 所示。

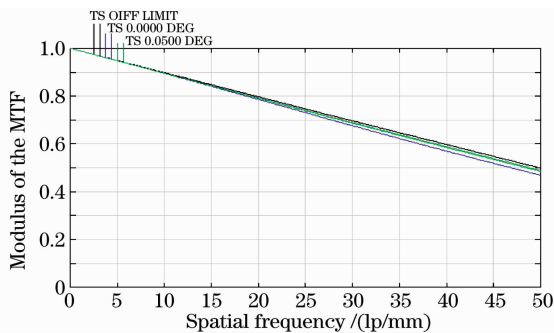


图 4 系统的 MTF 曲线

Fig. 4 MTF curve of the system

拦比 α_1 有所要求。选择主镜相对孔径 1/3,次镜对主镜遮拦比 0.3。为了使系统结构尽可能紧凑,并使系统有合适的伸出量,设(15)式中 c_2, c_3, c_4 的值分别为 1,1,0.8。根据 PW 初始结构公式计算得到系统的各初始结构参数后带入 Zemax 可得下述初始结构,图 2(a)为系统未考虑遮拦比时的初始结构,系统结构紧凑,各镜间距合理,其 MTF 分布如图 2(b)所示,系统 MTF 接近衍射极限,系统初始结构合理。

由于系统遮拦比的存在,使衍射受限 MTF 有所下降,但仍在 0.5 以上,且系统各视场 MTF 接近衍射极限,在 50 lp/mm 处约为 0.5。图 5 为系统点列图。图中各视场光线基本位于艾里斑以内,边缘视场 RMS 半径为 $2.627 \mu\text{m}$,最大几何半径 $5.583 \mu\text{m}$,小于系统单个 $13 \mu\text{m}$ 的像元尺寸,系统各视场光线汇聚情况良好。

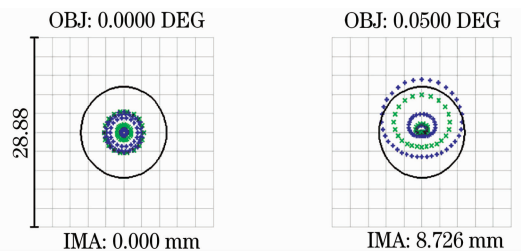


图 5 系统点列图

Fig. 5 Spot diagram of the system

图 6 为系统的场曲和畸变曲线。系统场曲值小于 $0.05 \mu\text{m}$,畸变小于十万分之二。

从系统的 MTF 曲线、点列图、场曲和畸变曲线可以看出,系统的成像质量良好,满足系统指标要求。

3.2 实例 2

针对一个使用线阵 TDICCD 推扫成像的空间相机,设计了离轴四反射镜光学系统。系统性能指标如表 2 所示。

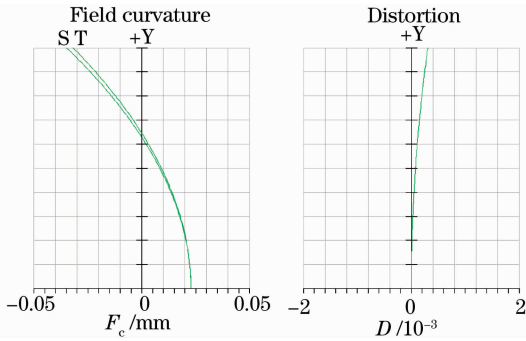


图 6 系统场曲和畸变曲线

Fig. 6 Field curvature and distortion of the system

表 2 系统性能指标

Table 2 Performance of the system

Parameters	Value
Wavelength /nm	360~820
Effective focal length /mm	2000
F	5
Field of view	$0.8^{\circ} \times 0.072^{\circ}$
Pixel size / μm^2	13×13
Total axial length /mm	< 500

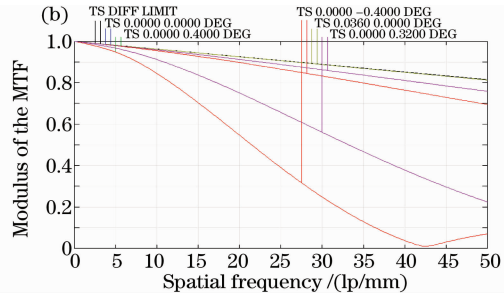
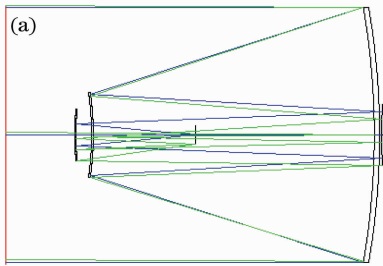


图 7 系统初始结构及其 MTF 曲线

Fig. 7 Layout and MTF curve of the initial system



图 8 系统结构图

Fig. 8 Layout of the final system

系统采用了孔径离轴,避免了反射镜相互遮拦带来的光能损失和 MTF 下降等问题,也在一定程度上减小了系统体积。反射镜 4 采用了球面镜,在一定程度上减小了加工难度。系统轴向长度为 456 mm,系统总长与焦距的比值约为 $1/4$,结构紧凑,满足总长

根据以上技术指标,总体确定系统主镜的焦距和各反射镜间的间距,再结合平像场条件[(12)式],可基本确定一组遮拦比和放大率,将其带入(9)式和(13)式,即可得到系统各反射面的焦距和二次非球面系数。若各项性能符合要求,则可作为同轴四反射镜系统的初始结构使用,设置合适的孔径或视场离轴量,便可得到离轴四反射系统,对该初始结构进行优化,使其满足技术指标。

根据以上分析,经反复计算,得到了系统初始结构如图 7(a)所示。

图 7(b)为系统初始结构的 MTF 曲线。系统各视场的 MTF 分布较好,仅 1 视场的子午方向 MTF 有零值出现。初始结构基本合理,这表明基于 PW 的像差理论的正确性。但系统的初始结构中各反射镜相互遮拦,造成系统光通量的降低和 MTF 的下降,这对系统成像是十分不利的。因此考虑给系统加入一定的孔径离轴量,避免遮拦。加入离轴量并优化后得到了离轴四反射镜系统,孔径光阑位于主镜上,其结构示意图如图 8 所示。

小于 500 mm 的要求。

图 9 为系统各视场的 MTF 图,系统各视场 MTF 在 50 lp/mm 范围内接近衍射极限,仅在 1 视场弧矢方向的 MTF 有所下降,但在 50 lp/mm 内 MTF 也在 0.7 以上。

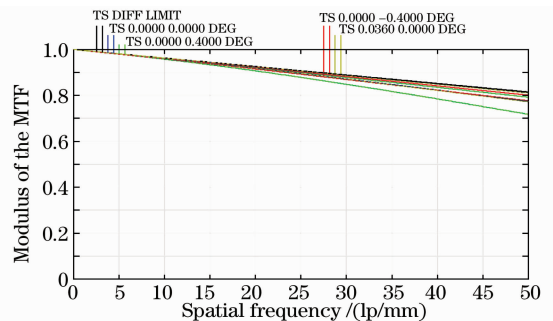


图 9 系统 MTF 分布图

Fig. 9 MTF of the system

图 10 为系统各视场的点列图。各视场光线分布基本位于艾里斑内, 1 视场光线的最大几何半径为 $6.45 \mu\text{m}$, 小于像元尺寸的 $13 \mu\text{m}$ 。

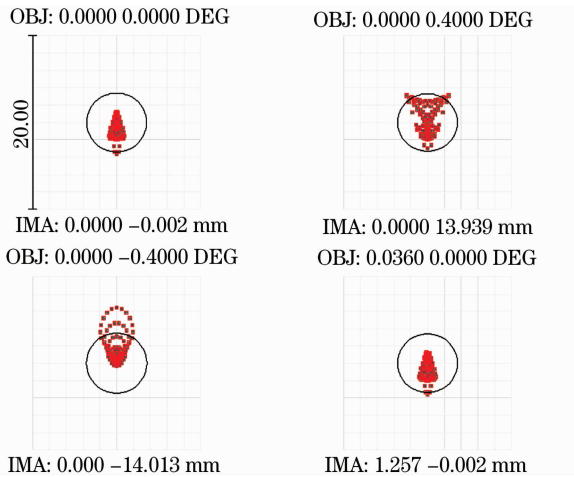


图 10 系统点列图

Fig. 10 Spot diagram of the system

综合以上分析, 系统各项指标性能优异, 满足技术指标要求, 证明了基于 PW 方法的四反射镜初始结构理论的正确性。

4 结 论

四反射镜光学系统的设计参数较多, 可以在减小系统长度的同时较好的矫正各种像差, 达到良好的成像质量。离轴四反射系统没有中心遮拦, 可以进一步提高系统的光通量和 MTF。光学装调技术的发展也使离轴反射系统能够得到更好地应用于空间光学遥感系统中。

参 考 文 献

- 1 Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces [M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004
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
- 2 Yang Jianfeng, An Baoqing, Xue Mingqiu *et al.*. Study on uncoaxial all-reflective system with large field of view[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(3): 277~281
杨建峰, 安葆青, 薛鸣球等. 大视场三反射面非共轴光学系统研究[J]. *光子学报*, 1997, **26**(3): 277~281
- 3 Li Xuyang, Li Yingcai, Ma Zhen *et al.*. Optical design of three-mirror-anastigmat with fold mirror for space camera[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s2): 335~340
李旭阳, 李英才, 马臻等. 用于空间相机的折轴三反系统的光学设计[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s2): 335~340
- 4 Chang Jun, Weng Zhicheng, Jiang Huiling *et al.*. Design on three-reflective-mirror system used in space[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(2): 216~219
常军, 翁志诚, 姜会林等. 用于空间的三反射镜光学系统设计[J]. *光学学报*, 2003, **23**(2): 216~219
- 5 Wu Yu, Xue Mingqiu. Study of long focal length all-reflective optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 1991, **11**(7): 646~650
吴煜, 薛鸣球. 长焦距反射式光学系统研究[J]. *光学学报*, 1991, **11**(7): 646~650
- 6 L. G. Cook. Compact four-mirror anastigmat telescope[P]. US Patent, 6767103B2, 2004
- 7 Ma Hongtao, Han Bing, Zhang Xiaohui *et al.*. Design of hyper long focal length in the short structure optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3503~3505
马洪涛, 韩冰, 张晓辉等. 超长焦距短结构光学系统设计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3503~3505
- 8 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
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
- 9 David R. Shafer. Four-mirror unobscured anastigmatic telescopes with all-spherical surfaces [J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(7): 1072~1074
- 10 J. M. Howard. B. D. Stone. Imaging with four spherical mirrors[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(19): 3232~3242
- 11 A. B. Meinel. Mp. Meiel, D. Q. Su *et al.*. Four-mirror spherical-primary submillimeter telescope design [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(17): 3020~3023