

高分辨率红外成像仪五反无焦主系统设计

胡 斌, 黄 颖, 马永利, 李 岩

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘 要: 为提高多通道红外成像仪的空间分辨率, 同时确保系统结构紧凑, 具有良好的轴对称性, 设计了应用于像方扫描主系统的主镜轴对称的五反无焦系统。论述了基于初级像差理论的五反无焦系统设计方法, 由各镜面之间的放大率和遮拦比求解出了结构参数, 利用初级像差系数求解出了反射面二次曲面参数, 并且编制了初始结构计算程序。设计了一个入瞳直径 1 m、视场 $5^\circ \times 0.1^\circ$ 、工作谱段 8~10 μm 、口径压缩倍率 10 \times 的五反无焦系统。设计结果表明: 光学系统最大波前差 RMS 值优于 0.065λ ($\lambda=9 \mu\text{m}$), 最大光程差优于 $\lambda/4$ ($\lambda=8\sim 10 \mu\text{m}$), 各视场的 MTF 曲线接近衍射限。该设计方法可广泛应用于高分辨率多通道成像仪的光学系统设计。

关键词: 光学设计; 无焦系统; 五反射镜; 红外成像

中图分类号: O453; TH703 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0518001

Design of five-mirror afocal principal system for high spatial resolution infrared imager

Hu Bin, Huang Ying, Ma Yongli, Li Yan

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: In order to increase spatial resolution, five-mirror afocal optical system with axial-symmetric primary mirror was designed, which was used for principal system of image space scanning system. The system was well compact and axial-symmetrical. The method of five mirror afocal system design based on primary aberration was explored. The structural parameters were calculated according to magnification and obscuration ratio of each mirror. The conic parameters were calculated according to primary aberration coefficient. The procedure for calculating initial structural parameters was programmed. Then a five-mirror afocal system was designed with an entrance pupil diameter of 1 m, a field of view of $5^\circ \times 0.1^\circ$, the operating wave band of 8–10 μm , compression ratio of 10 times. The results indicate that the maximum root mean square (RMS) wavefront error is less than 0.065λ ($\lambda=9 \mu\text{m}$), the maximum optical path difference (OPD) is less than $\lambda/4$ ($\lambda=8\sim 10 \mu\text{m}$). It has high imaging quality and the modulation transfer function (MTF) is approached to the diffraction limit. The method of afocal system design can be widely used for high spatial resolution multichannel imaging.

Key words: optical design; afocal system; five-mirror system; infrared imaging

收稿日期: 2015-09-25; 修订日期: 2015-10-18

基金项目: 国家自然科学基金(11304012)

作者简介: 胡斌(1985-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事空间光学遥感器设计与仿真分析等方面的研究。Email: hubin.bisme@139.com

0 引言

空间分辨率是空间遥感信息获取重要指标,为了获得足够的分辨率,通常采用大口径长焦距的光学系统^[1-2]。

高分辨率可见光遥感器多采用推扫成像模式,系统主要可分为同轴三反系统和离轴三反系统。同轴三反系统,具有良好的轴对称性,系统结构紧凑,但视场通常不超过 2°^[3],典型应用为美国商用卫星 WorldView-3^[4];离轴三反系统可以实现更大的视场,但受到外形尺寸的限制,系统的焦距较同轴系统短,典型应用为美国商用卫星 Quickbird^[5]。

由于红外焦平面探测器技术和制冷技术的制约,目前红外遥感器多采用扫描成像模式^[6]。系统主要可分为物方扫描和像方扫描两种方式。物方扫描系统可以实现大视场成像^[7],但是,随着对高分辨率红外遥感器需求的增加,使物方扫描系统的扫描镜尺寸和扫描机构的控制难度均大幅增加。像方扫描系统通过位于无焦系统出瞳位置处的扫描机构将无焦系统压缩口径后不同视场的平行光反射到接收通道,该系统可有效地减小扫描镜和扫描机构的研制难度。

高分辨率红外成像仪主系统通常采用同轴反射系统,确保系统结构紧凑,对称性良好,具有代表性的遥感器为美国的 WISE 空间计划^[8]和日本航天局的 SPICA 空间计划^[9]。文中在同轴三反无焦系统的基础上,将三镜复杂化为离轴三反系统,确保光学系统兼顾同轴系统体积紧凑和离轴系统易于实现更大视场的特点。

根据初级像差理论,研究了用于高分辨率红外成像仪的五反无焦系统的设计问题,解算了结构参数和二次曲面参数,编制了初始结构计算程序,并对初始结构进行优化设计。设计了工作谱段 8~10 μm、

入瞳口径 1 m、视场 5°×0.1°、压缩倍率为 10×、出瞳距 700 mm 的五反无焦光学系统,并对系统进行像质评价。

1 初始结构求解

五反无焦光学系统初始结构如图 1 所示,其中主镜 M₁、次镜 M₂、三镜 M₃、四镜 M₄ 和五镜 M₅ 的二次曲面参数分别为 e₁²、e₂²、e₃²、e₄²、e₅²。α_i 为镜面的遮拦比;β_i 为镜面的放大率;R_i 为镜面的顶点曲率半径;h_i 为镜面半口径;f_i 为镜面的物方焦距;f'_i 为镜面的像方焦距;l_i 为镜面的物距;l'_i 为镜面的像距;x_i 为镜面的焦物距;y_i 为主光线入射高度。

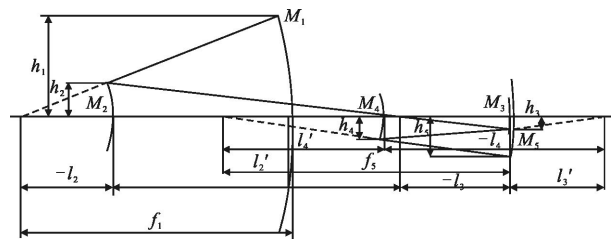


图 1 五反无焦系统初始结构

Fig.1 Initial structure of the five-mirror afocal system

对于五反无焦系统,且光阑位于主镜上,有 l₁=∞, u₁=0, l'₅=∞, u₅'=0; 即 x₁=0, y₁=0。

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{l_2}{f_1'} \approx \frac{h_2}{h_1}; \beta_1 = \frac{l_2'}{l_2} \approx \frac{u_2}{u_2'} \\ \alpha_2 = \frac{l_3}{l_2'} \approx \frac{h_3}{h_2}; \beta_2 = \frac{l_3'}{l_3} \approx \frac{u_3}{u_3'} \\ \alpha_3 = \frac{l_4}{l_3'} \approx \frac{h_4}{h_3}; \beta_3 = \frac{l_4'}{l_4} \approx \frac{u_4}{u_4'} \\ \alpha_4 = \frac{l_5}{l_4'} \approx \frac{h_5}{h_4} \end{cases} \quad (1)$$

光学系统单色像差一共有五种:球差、彗差、像散、像面弯曲及畸变,其初级像差系数分别为 S_I、S_{II}、S_{III}、S_{IV} 及 S_V。由初级像差理论给出单色像差表达式^[10]:

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

其中

$$P = \left(\frac{\Delta u}{\Delta \frac{1}{n}} \right)^2 \Delta \frac{u}{n} \quad (3)$$

$$W = \frac{\Delta u}{\Delta \frac{1}{n}} \Delta \frac{u}{n} \quad (4)$$

$$\Pi = \frac{\Delta(nu)}{nm'} \quad (5)$$

$$\phi = \frac{1}{h} \Delta \frac{u}{n} \quad (6)$$

$$K = -\frac{e^2}{R^3} \Delta n \quad (7)$$

式中： n 为物方折射率； n' 为像方折射率； u 为物方孔径角； Δn 为折射率变化； Δu 为孔径角变化； h 为镜面半口径； e 为二次曲面的偏心率； R 为顶点曲率半径。 K 为归一化非球面系数； P 为球差系数； W 为彗差系数；口径压缩比为 Γ 。

对于五反无焦系统， $n_1=n_2'=n_3=n_4'=n_5=1$ ， $n_1'=n_2=n_3'=n_4=n_5'=-1$ 。令 $h_1=1$ ， $f_1'=1$ ， $h_5=1/\Gamma$ ，可以得到 $f_1'=1/\beta_1$ ， $u_1'=u_2=\beta_1$ ， $u_2'=u_3=1$ ， $u_3'=u_4=1/\beta_2$ ， $u_4'=u_5=1/\beta_2\beta_3$ ， $f_5'=\beta_4$ ， $\beta_1\beta_2\beta_3\beta_4=1/\Gamma$ ， $J=1$ 。将公式(1)代入公式(3)~(7)，得到公式(8)：

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= -\frac{\beta_1^3}{4}, P_2 = \frac{(1-\beta_1)^2(1+\beta_1)}{4}, P_3 = -\frac{(1-\beta_2)^2(1+\beta_2)}{4\beta_2^3}, P_4 = \frac{(\beta_2-1)^3}{\beta_2^3\beta_3^3}, P_5 = -\frac{1}{4\beta_2^3\beta_3^3} \\ W_1 &= \frac{\beta_1^2}{2}, W_2 = \frac{1-\beta_1^2}{2}, W_3 = \frac{1-\beta_2^2}{2\beta_2^2}, W_4 = -\frac{(1-\beta_3)^3}{2\beta_2^2\beta_3^2}, W_5 = -\frac{1}{2\beta_2^2\beta_3^2} \\ \Pi_1 &= \beta_1, \Pi_2 = -(1+\beta_1), \Pi_3 = \frac{1+\beta_2}{\beta_2}, \Pi_4 = -\frac{1+\beta_3}{\beta_2\beta_3}, \Pi_5 = \frac{1}{\beta_2\beta_3} \\ \phi_1 &= -\beta_1, \phi_2 = \frac{1+\beta_1}{\alpha_1}, \phi_3 = -\frac{1+\beta_2}{\alpha_1\alpha_2\beta_2}, \phi_4 = \frac{1}{\alpha_4\Gamma} \frac{\beta_3-1}{\beta_2\beta_3}, \phi_5 = -\frac{\Gamma}{\beta_2\beta_3} \\ K_1 &= \frac{e_1^2}{4}\beta_1^3, K_2 = -\frac{e_2^2(1+\beta_1)^3}{4\alpha_1^3}, K_3 = \frac{e_3^2(1+\beta_2)^3}{4\alpha_1^3\alpha_2^3\beta_2^3}, K_4 = -\frac{e_4^2(\beta_3-1)^3}{4\alpha_1^3\Gamma^3\beta_2^3\beta_3^3}, K_5 = -\frac{e_5^2\Gamma^3}{4\beta_2^3\beta_3^3} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

将公式(8)代入公式(2)，得到公式(9)：

$$\left. \begin{aligned} S_I &= \frac{\beta_1^3}{4}(e_1^2-1) + \frac{\alpha_1(1+\beta_1)}{4} [(1-\beta_1)^2 + e_2^2(1-\beta_1)^2] + \frac{4e_5^2-1}{4\Gamma\beta_2^3\beta_3^3} + \frac{\alpha_1\alpha_2\alpha_3(\beta_3-1)^3}{\beta_2^3\beta_3^3\Gamma^3} + \frac{\alpha_1\alpha_2(1+\beta_2)^2}{4} \left[\frac{(1+\beta_2)e_3^2}{\alpha_3^3} - \frac{1-\beta_2}{\beta_2^2} \right] \\ S_{II} &= \frac{\beta_3[\alpha_3\beta_3(\alpha_4-1)-(1-\alpha_3)](1+\beta_1)^2}{4\beta_2} [\beta_2-1+(1+\beta_1)e_3^2] + \frac{(\alpha_1-1)(1+\beta_1)^2}{4\beta_1} [1-\beta_1-(1+\beta_1)e_2^2] + \frac{(\alpha_4\Gamma-1)(\beta_3-1)^3}{\beta_2^2\beta_3^2\Gamma} \\ &\quad \left[1 + \frac{\alpha_1^3\alpha_2^3\alpha_3^3e_4^2}{\alpha_4^3\Gamma^3} \right] - \left[\frac{\beta_1^2}{2} + 1 + \beta_1 + \frac{1-\beta_2^2}{4\beta_1} - \frac{(1-\beta_3)^2}{2\beta_2\beta_3} - \frac{1}{2\beta_2^3\beta_3^3} \right] \\ S_{III} &= \frac{(1-\alpha_1)^2(1+\beta_1)^2}{\alpha_1\beta_1^2} \left[\frac{1-\beta_1}{4\alpha_1} - (1+\beta_1)e_2^2 \right] + \frac{[\alpha_3(\alpha_4-1)\beta_3^3 - \beta_3(1-\alpha_3)]^2(1+\beta_1)^2}{4\alpha_1\alpha_2} \left[1 - \beta_2 - \frac{(1+\beta_2)e_3^2}{\beta_2} \right] + \frac{e_3^2}{4\alpha_1\alpha_2} \\ &\quad \left[\frac{1}{\beta_2} + \frac{\alpha_3^2(\alpha_4-1)^2(1+\beta_2)^3\beta_3^4}{\beta_1} \right] - \frac{2\beta_2\beta_3(\alpha_4\Gamma-1)}{\Gamma} - \frac{\Gamma}{\beta_2\beta_3} - \frac{(\alpha_4\Gamma-1)^2(\beta_3-1)^3}{\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2\beta_2\beta_3\Gamma} - \frac{\alpha_1^3\alpha_2^3\alpha_3^3(\alpha_4\Gamma-1)^2(\beta_3-1)^3e_4^2}{\alpha_4^2\beta_2\beta_3\Gamma^4} + \\ &\quad \frac{\beta_2\beta_3}{\alpha_1\alpha_2} [1-\alpha_3-\alpha_3(\alpha_4-1)\beta_3] \\ S_{IV} &= \beta_1 - \frac{1+\beta_1}{\alpha_1} + \frac{1+\beta_2}{\alpha_1\alpha_2\beta_2} - \frac{1+\beta_3}{\alpha_1\alpha_2\alpha_3\beta_2\beta_3} + \frac{1}{\beta_2\beta_3} \\ S_V &= \frac{3\beta_2\beta_3(\alpha_4\Gamma-1)}{\alpha_1\alpha_2\alpha_3\Gamma} \left[\frac{\beta_2\beta_3(\alpha_4\Gamma-1)}{\alpha_1\alpha_2\alpha_3\Gamma} + \frac{\beta_3-1}{\alpha_1\beta_2\beta_3\Gamma} - \frac{1+\beta_3}{3\alpha_1\alpha_2\alpha_3\beta_2\beta_3} \right] + \frac{3\beta_2\beta_3[\alpha_3\beta_3(\alpha_4-1)-1+\alpha_3]}{\alpha_1^2\alpha_2^2} \\ &\quad \left\{ \frac{\beta_2\beta_3[\alpha_3\beta_3(\alpha_4-1)-1+\alpha_3]}{\alpha_1\alpha_2\alpha_3\Gamma} - \frac{2(\beta_2+1)}{3\beta_2} \right\} - \frac{3(1-\alpha_1)}{\alpha_1^2\beta_1} \left[\frac{4(1+\beta_1)}{3} - \frac{1-\alpha_1}{\beta_1} \right] + \frac{\beta_2^3\beta_3^3[\alpha_3\beta_3(\alpha_4-1)-1+\alpha_3]^3(1+\beta_1)^2}{4\alpha_1^2\alpha_2^2} \\ &\quad \left[\frac{1-\beta_1}{\beta_2^2} + \frac{(1+\beta_1)e_3^2}{\beta_1^3} \right] + \frac{(\alpha_4\Gamma-1)^3(\beta_3-1)^3}{\Gamma} \left(\frac{1}{\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2} + \frac{\alpha_1\alpha_2\alpha_3e_4^2}{\alpha_4^2\Gamma} \right) - \frac{(1-\alpha_1)^3}{4\beta_1^3} [(1-\beta_1)^2(1+\beta_1) + \alpha_1\beta_1^3e_1^2] \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

由 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \beta_1, \beta_2$ 以及 β_3 可以求解出与结构参数有关的变量, 利用初级像差系数 $S_I, S_{II}, S_{III}, S_{IV}$ 及 S_V , 可求出系统五反射面的二次曲面参数 $e_1^2, e_2^2, e_3^2, e_4^2, e_5^2$ 。具体实现初始结构参数的求解流程如图 2 所示。

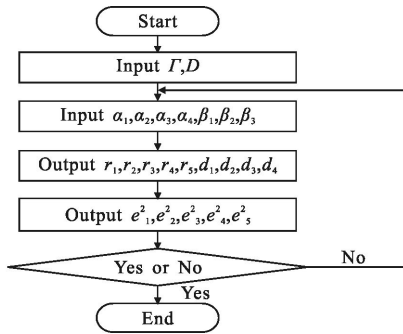


图 2 初始结构参量求解流程图

Fig.2 Program block diagram for initial structure parameters

2 设计实例

以下通过一个具体的五反无焦系统设计实例来说明设计过程。

2.1 技术指标要求

光学系统设计参数如表 1 所示。

表 1 光学系统设计参数

Tab.1 Design parameters of the optical system

Parameter	Value
Work spectrum/ μm	8-10
FOV/ $(^\circ)$	5 \times 0.1
Entrance pupil diameter/mm	1 000
Compression ratio	10

2.2 设计结果

编制五反无焦系统初始结构求解程序。在完成初始结构求解的基础上, 采用光学设计软件进行视场倾斜和元件离轴, 以消除中心遮拦并增加优化变量, 优化后系统光路如图 3 所示。光学系统的孔径光阑位于主镜, 与同轴三反无焦系统相比, 该系统的次镜进行了倾斜, 有利于减小非对称像差和消除遮拦; 视场光阑位于次镜和三镜之间, 可有效抑制杂散辐射; 出瞳位于五镜的后方, 用以放置扫描机构, 实现像方扫描成像。光学系统结构参数如表 2 所示, 系统

出瞳距为 700 mm。主镜为轴对称元件, 次镜、三镜、四镜和五镜为离轴元件。

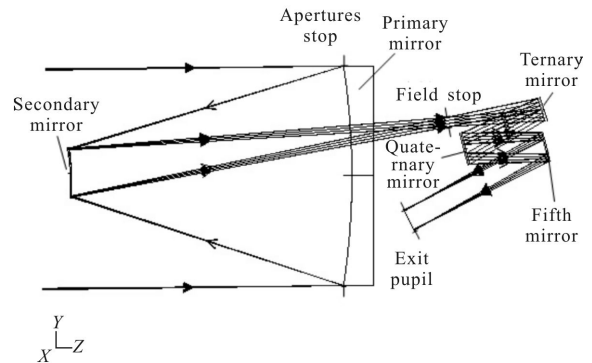


图 3 五反无焦系统光路图

Fig.3 Layout of the five-mirror afocal system

表 2 光学系统结构参数

Tab.2 Structure parameters of the optical system

Element	Radius of curvature/mm	Conic type	Range interval /mm
Primary mirror (apertures stop)	-3 002	Ellipsoid	-1 166
Secondary mirror	-824.5	Hyperbolic	1 979
Field stop	-	-	450
Ternary mirror	-4 472	Ellipsoid	-365
Quaternary mirror	-1 002	Hyperbolic	384.9
Fifth mirror	-5 283	Ellipsoid	-700
Exit pupil	-	-	-

2.3 像质评价

图 4 分别给出了 $(0^\circ, 0.5^\circ)$ 和 $(2.5^\circ, 0.6^\circ)$ 两个典型视场的波前图, 光学系统最大波前差 RMS 值优于

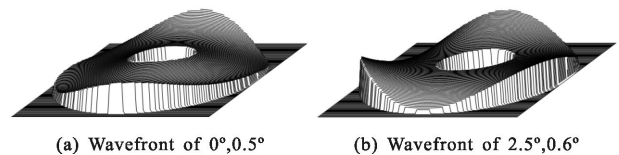


图 4 五反无焦系统典型视场波前图

Fig.4 Wavefronts of typical fields of the five-mirror afocal system

$0.065\lambda (\lambda=9 \mu\text{m})$ 。图 5 给出了五反无焦系统各个视场的波前差 RMS 值, 波前差 RMS 值随着视场的增大而增大, 未出现异常跳变视场。图 6 给出了各个视场

的 MTF 曲线,表明大口径的像差消除到衍射限的水平。图 7 给出了各个视场的光程差曲线,最大光程差优于 $\lambda/4$ ($\lambda=8\sim 10\ \mu\text{m}$),可以认为系统各种像差得到良好校正。

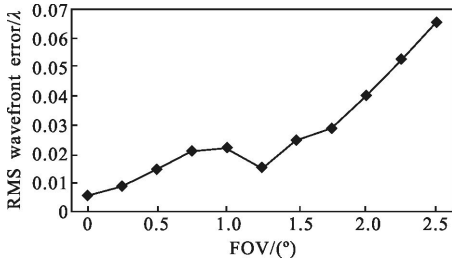


图 5 五反无焦系统波前差 RMS

Fig.5 RMS wavefront error of the five-mirror afocal system

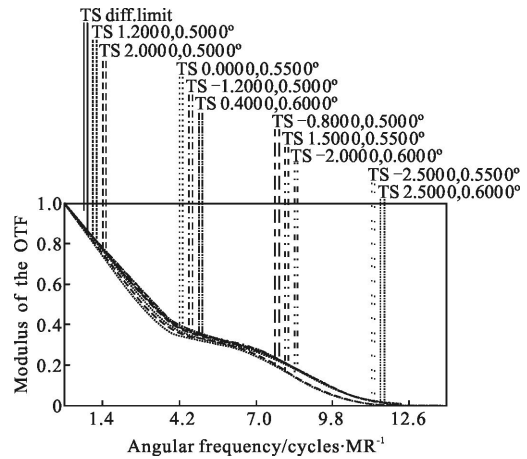


图 6 五反无焦系统 MTF 曲线

Fig.6 MTF of the five-mirror afocal system

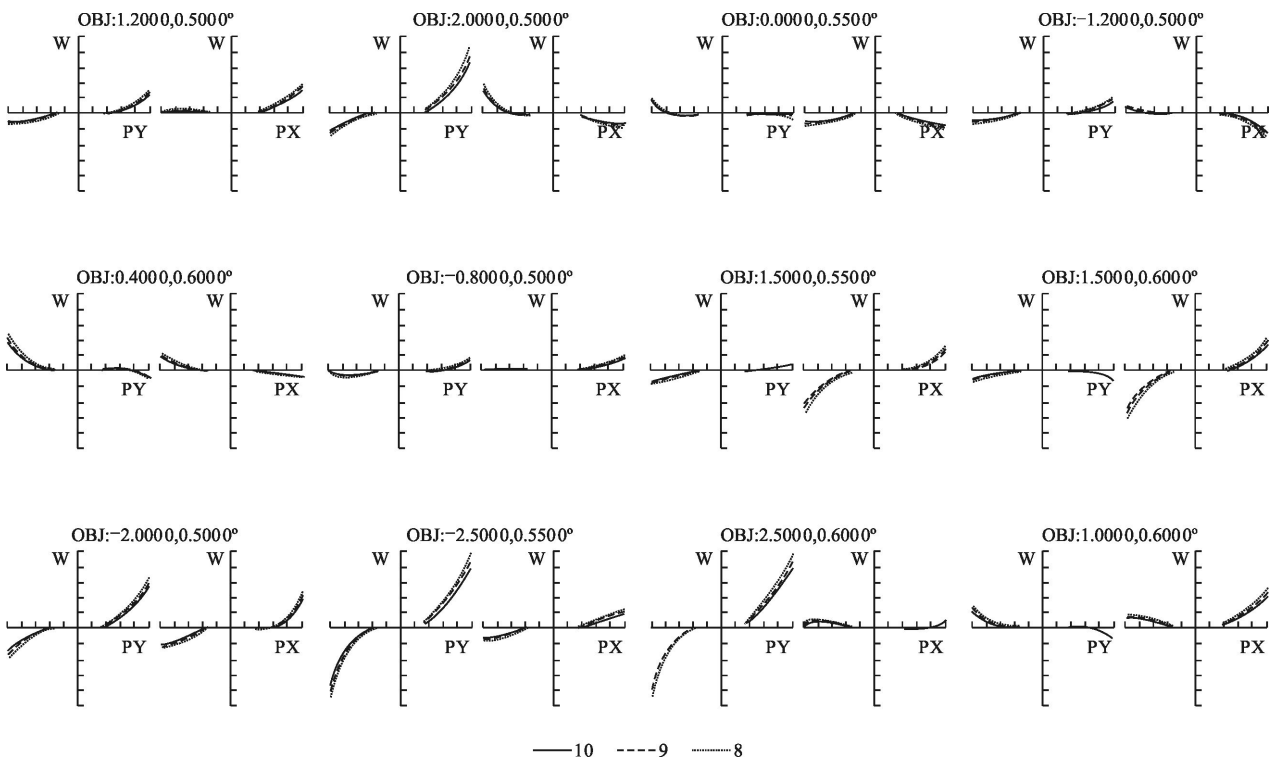


图 7 五反无焦系统光程差图

Fig.7 OPD of the five-mirror afocal system

3 结论

文中以高分辨率红外多通道的遥感器需求为应用背景,研究在同轴三反无焦系统的基础上复杂化的五反射镜无焦光学系统。提出基于初级像差理论的五反无焦光学系统设计方法,解算了结构参数和二次曲面参数,编制了初始结构计算程序。设计结果

表明,光学系统入瞳口径 1 m、视场 $5^\circ\times 0.1^\circ$ 、压缩倍率为 10 \times 、出瞳距 700 mm,全视场的最大波前差 RMS 值优于 0.065λ ($\lambda=9\ \mu\text{m}$),各视场光程差优于 $\lambda/4$ ($\lambda=8\sim 10\ \mu\text{m}$),系统成像质量良好。该系统兼顾同轴系统体积紧凑和离轴系统易于实现更大视场的特点。由于采用全反射镜,文中的无焦系统设计方法在高分辨率宽波段多通道成像遥感器光学系统设计中具有

广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] Conrad W, Matthew C. Opto-mechanical integration and alignment verification of the James Webb Space Telescope (JWST) optical telescope element[C]//SPIE, 2009, 7433: 743303.
- [2] 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.
- [3] Liu Zhaojun, Zhou Feng, Hu Bin, et al. Study on coaxial three-mirror-anastigmat space camera with long focal length [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2011, 32(6): 46–52. (in Chinese)
刘兆军, 周峰, 胡斌, 等. 长焦距同轴三反空间相机光学系统研究[J]. *航天返回与遥感*, 2011, 32(6): 46–52.
- [4] Li Tieli. The commercial satellite with the highest spatial resolution all over the world "Worldview-3 Satellite" [J]. *Satellite & Network*, 2014(7): 65. (in Chinese)
李铁骊. 全球最高分辨率商业遥感卫星--世界观测-3 卫星[J]. *卫星应用*, 2014(7): 65.
- [5] Zhang Yongsheng, Gong Danchao, Liu Jun. Application of High-resolution Remote Sensing-imaging Model, Algorithm And Application [M]. Beijing: Science Press, 2004: 1–8. (in Chinese)
张永生, 巩丹超, 刘军. 高分辨率遥感卫星应用-图像模型、处理算法及应用技术[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 1–8.
- [6] Chen Shiping, Yang Bingxin, Wang Huaiyi, et al. Design and Experiment of Space Camera [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2003: 193–203. (in Chinese)
陈世平, 杨秉新, 王怀义, 等. 空间相机设计与试验[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2003: 193–203.
- [7] Qiu Mingpu. Optical design of wide FOV infrared scanning imaging system [J]. *Infrared Technology*, 2012, 32 (11): 648–651. (in Chinese)
邱民朴. 大视场红外扫描成像光学系统设计[J]. *红外技术*, 2012, 32(11): 648–651.
- [8] Tony H, Mark S. Spaceborne telescopes on a budget: paradigms for producing high-reliability telescopes, scanners, and EO assemblies using heritage building blocks. *Sensors and Systems for Space Applications IV* [C]//SPIE, 2011, 8044: 804401.
- [9] Yasuhiro Kawakatsu, Hideo Matsuhara, Takao Nakagawa. The next-generation infrared space telescope SPICA [C]//SPIE, 2012, 8442: 844200.
- [10] Pan Junhua. The Design Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces [M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004: 11–14, 131–134. (in Chinese)
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: 11–14, 131–134.