

分块拼接望远镜的数值仿真

廖 周^{1,2,3,4} 邱 琪² 张雨东^{1,3}

¹ 中国科学院光电技术研究所自适应光学实验室, 四川 成都 610209
² 电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054
³ 中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209
⁴ 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了更好地了解拼接望远镜光学系统的光学性能,对拼接主镜中分块镜的各种误差对望远镜光学系统的影响进行有效的分析计算。从几何光学入手,采用光线追迹方法,建立了拼接望远镜光学系统的数值仿真模型。利用该模型,可以模拟不同口径和分块镜数拼接望远镜的光学系统;可仿真分析拼接主镜中分块镜由于轴向平移、倾斜、旋转和径向平移等各种误差引起的波像差以及对远场图像的影响。并计算了不同误差项对光学系统斯特雷尔比的影响,为发展大口径望远镜提供技术支持。

关键词 几何光学;分块拼接望远镜;光线追迹;数值仿真

中图分类号 TH751 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0722002

Numerical Simulation of Segmented Telescope

Liao Zhou^{1,2,3,4} Qiu Qi² Zhang Yudong^{1,3}

¹ *Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China*
² *School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China*
³ *Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China*
⁴ *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract In order to have a better understanding of the optical properties of segmented telescope system and conduct an effective analysis of the impacts of various errors induced by single segmented mirror of primary mirror, this article aims at building a model of segmented telescope system from the perspective of geometry optical with optical raying tracing. This model enables to simulate the segmented telescope of different sizes, and can get the wavefront aberration and the far-field image of the segmented telescope with the piston error, tip-tilt and rotation error ect. Strehl ratio of segmented telescope with different errors is calculated. The work is expected to provide technological support for the further development of large diameter telescopes.

Key words geometric optics; segmented telescope; ray tracing; numerical simulation

OCIS codes 220.2740; 220.4830; 120.4640; 200.1130

1 引言

分块拼接主镜是建造大口径望远镜的一个有效途径,其成本控制、镜面加工以及运输安装等方面的

优点十分显著。10 m 以及更大口径的望远镜,采用分块拼接主镜方法更为合适,凯克望远镜(Keck)、三十米望远镜(TMT)、詹姆斯·韦伯空间望远镜

收稿日期: 2013-12-20; **收到修改稿日期**: 2014-02-20

作者简介: 廖 周(1976—),男,博士研究生,副研究员,主要从事自适应光学与光学检查等方面研究。

E-mail: ioelz@163.com

导师简介: 张雨东(1964—),男,博士,研究员,主要从事新型自适应光学研究与系统研制等方面的研究。

E-mail: dangban@ioe.ac.cn

(JWST)、大天区面积多目标光纤光谱望远镜(LAMOST)等巨型望远镜均采用了拼接方法。但是由于用于拼接的每一分块镜都有6个自由度,在望远镜的观测使用时带来了共相问题^[1],由多块子镜拼接产生的共相误差会影响望远镜系统的远场光束质量或成像质量,因此对拼接主镜的共相误差的研究非常重要。国外有部分科研工作者做了相关的研究工作^[1-6]。如 Gary 等^[1]研究了 Keck 望远镜的共相问题, Natalya 等^[3-6]对巨型望远镜的共相进行研究,从衍射理论出发,对巨型望远镜的轴上平移和倾斜误差分析做了大量研究,由于方法限制而在别的误差方面的工作就无从涉及,并且没法考虑由于分块镜误差带来系统的离焦和像散等问题; Manhart 等^[7]利用 Fortran 得到拼接主镜的镜面误差并用 CodeV 软件对拼接主镜的各种误差进行了比较详细的仿真研究,只考虑了拼接主镜误差,没考虑包括次镜在内的系统误差问题。国内同行对稀疏孔径望远镜的共相问题做了大量工作^[8-11],但很少对拼接望远镜开展比较详细的工作。

本课题组在对拼接望远镜进行理论分析和仿真实验时发现,从衍射理论对拼接望远镜进行分析时,分块镜需简化为平面镜,实际工作为拼接孔径的相干合成,而且也只能分析其平移误差和倾斜误差。而拼接望远镜系统的特点为拼接主镜和共次镜,每一

分块镜为离轴抛物镜,其平移误差和倾斜误差将引入离焦量和像散,同时分块镜还有位置以及旋转等误差,对于这些误差的分析需要整个拼接望远镜系统的仿真建模,因此建立包含多块子镜拼接成的主镜和次镜的望远镜系统的数值仿真模型是必要的,从而实现对接望远镜系统的误差进行全面分析。

本文根据几何光学,采用光线追迹方法,对接望远镜的光学系统(包括拼接主镜和次镜)进行建模,在此基础上,通过参数设定可以实现不同拼接规模望远镜系统的共相误差分析。该模型可以得到包含分块镜各种误差信息的光程差,进而得到望远镜系统的波像差数据,利用波像差数据还可以得到系统的远场衍射图像等,从而实现对接望远镜系统误差特性和总体性能的分析,为大口径拼接望远镜的设计、加工、检测等工作提供有益的支持。

2 拼接望远镜的数学建模

2.1 分块镜孔径函数

如图 1(a)所示,拼接望远镜主镜由多个六边形的离轴抛物分块镜组成。分块镜的个数 M 和拼接圈数 N 的关系为 $M = 3N(N+1) + 1$ 。去掉中心遮拦,实际的分块镜个数为 $M = 3N(N+1)$ 。10 m 级口径的望远镜,分块镜拼接圈数一般为 $N = 3$,分块镜个数 $M = 36$ 。拼接主镜具有 60° 的旋转对称特性。

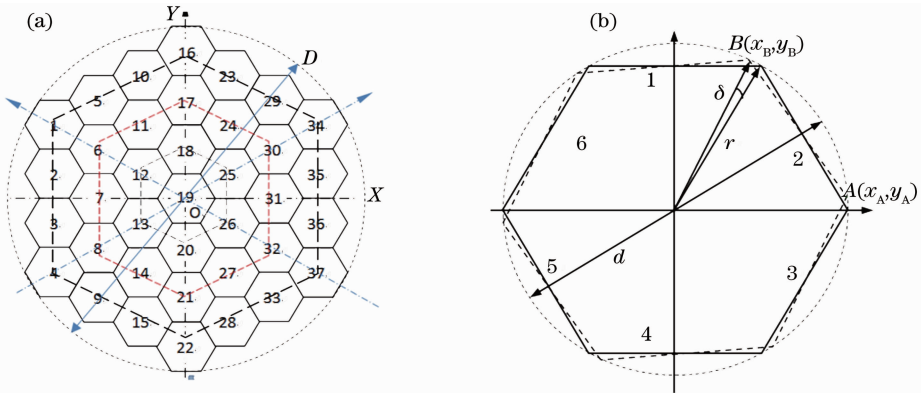


图 1 (a)分块拼接主镜以及(b)分块子镜示意图

Fig. 1 Schematic of (a) segmented primary mirror and (b) single mirror

拼接主镜的外径 D 跟单个分块镜外径 d 的关系为 $D = \sqrt{3}d(2M+1)/2$ 。分块镜中心间隔分别为 $\sqrt{3}d/2$ 和 $3d/4$ 。表 1 为分块镜与拼接主镜的尺寸关系。

表 1 拼接主镜与分块镜尺寸关系

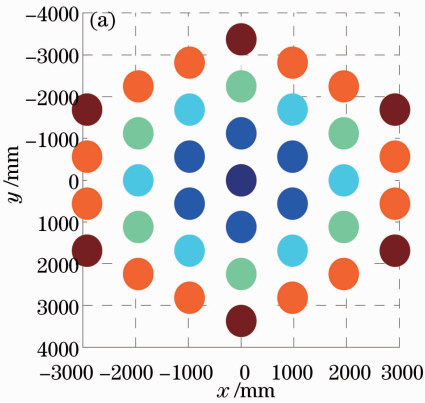
Table 1 Relationship between primary mirror and single segmented mirror

d/m	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
D/m	7.9	8.5	9.1	9.7	10.3	10.9

单个分块镜形状如图 1(b)所示。外接圆直径为 d 的六边形离轴抛物镜。为了建模方便,选择两个特征点: A 和 B , A 和 B 的坐标分别为 $[(x_A = r \cos \delta, y_A = r \sin \delta)]$; $[(x_B = r \cos(\pi/3 + \delta), y_B = r \sin(\pi/3 + \delta))]$ 。可得到每条边线的直线方程为

$$\begin{cases} y_1 = y_B + (x - x_B) \tan \delta \\ y_2 = y_A - (x - x_A) \tan(\pi/3 - \delta) \\ y_3 = y_A + (x - x_A) \tan(\pi/3 + \delta) \\ y_4 = -y_B + (x + x_B) \tan \delta \\ y_5 = -y_A - (x + x_A) \tan(\pi/3 - \delta) \\ y_6 = -y_A - (x + x_A) \tan(\pi/3 + \delta) \end{cases} \quad (1)$$

如图 1(b) 所示, (1) 式中 r 为外接圆的半径, δ 为整个分块镜的旋转量, 在 (x_A, y_A) 和 (x_B, y_B) 中



引入分块镜的中心坐标值, 可以得到任意分块镜的边线方程。

从图 1(a) 的拼接主镜示意图中可以看出, 如果拼接主镜的圈数为 N , 分块镜有 $2N + 1$ 列, 两边分块镜个数为 $N + 1$, 每相隔一列增加一块, 中间个数为 $2N + 1$ 个。其间隔为 y 方向 $\sqrt{3}d/2$ 和 x 方向 $3d/4$ 。图 2(a) 所示为每分块镜中心位置坐标图以及图 2(b) 所示为单个分块镜面型图。

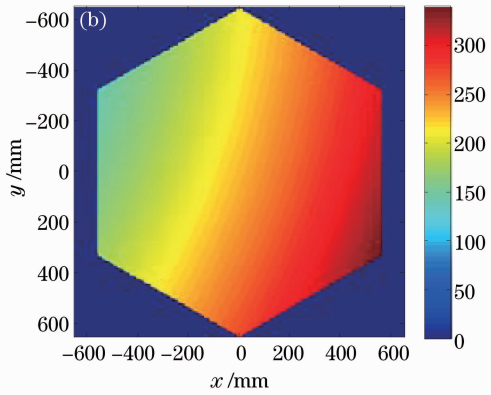


图 2 (a) 分块位置坐标以及 (b) 分块子镜面型

Fig. 2 (a) Position of segmented mirror and (b) surface shape of single mirror

2.2 拼接主镜公式

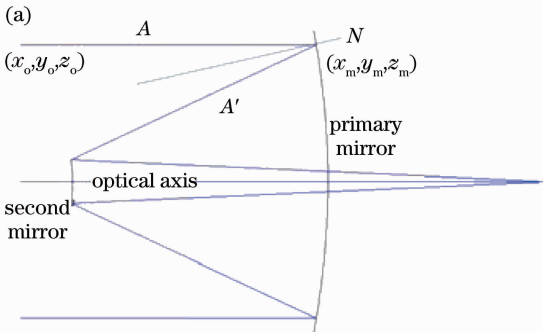
非球面反射镜的面型公式为^[12]

$$z = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (1 - k)c^2(x^2 + y^2)}}, \quad (2)$$

式中 k 为非球面的偏心率, c 为非球面顶点处的曲率, 且有 $c = 1/(2DF)$ (其中 D 为拼接主镜口径, F 为主镜 F 数), 可以得到抛物面 ($k = -1$) 的反射镜主镜公式为

$$z_{\text{asp}} = \frac{x^2 + y^2}{4DF}. \quad (3)$$

在数值建模时候可先用 Zemax 对整个望远镜系统进行设计, 并利用这些设计参数进行分块拼接望远镜系统的数值仿真。结合 2.1 节和 2.2 节内



容, 得到分块镜的镜面面形[如图 2(b) 所示]。

2.3 光线追迹

在进行光线追迹时候, 为了计算的方便和准确性, 采用矢量方法实现系统的光线追迹^[13]。如图 3(a) 所示, 从点 (x_o, y_o, z_o) 发出与光轴平行的入射光线 A 到达主镜上的点 (x_m, y_m, z_m) , 经主镜后反射光线 A' 再与次镜反射, 最后在远端成像。

设入射光线的位置为 (x_o, y_o, z_o) , 将 (x_o, y_o) 代入到 (3) 式得到光线在主镜上的坐标 (x_m, y_m, z_m) , 从而得到入射光线矢量 $\mathbf{A}(x_o, y_o, z_o - z_m)$ 。

根据曲面的法线公式^[14], 对 (3) 式求偏导, 可以得到点 (x_m, y_m, z_m) 的法线方程为

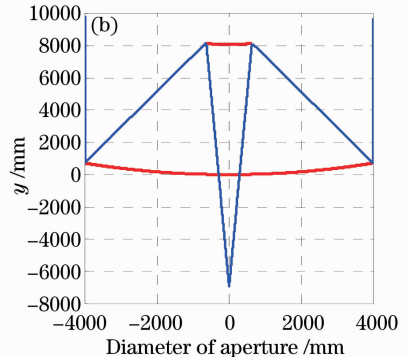


图 3 (a) 望远镜系统示意图以及 (b) 光线追迹结果

Fig. 3 (a) Schematic of telescope system and (b) results of ray tracing

$$\frac{x-x_m}{z'_{aspx}(x_m)} = \frac{y-y_m}{z'_{aspy}(y_m)} = \frac{z-z_m}{1} = t, \quad (4)$$

式中 t 为参数量, 求出 t 值可以得到法线上任一点的坐标值, 代入主镜上的位置坐标值, 可以得相应点的法线矢量 \mathbf{N} 。

根据反射光线的矢量公式^[15-16]:

$$\mathbf{A}'' = \mathbf{A} - 2(\mathbf{A} \cdot \mathbf{N})\mathbf{N}, \quad (5)$$

$$f = \frac{c[(x_m + K_x t)^2 + (y_m + K_y t)^2]}{1 + \sqrt{1 - (1-k)c^2[(x_m + K_x t)^2 + (y_m + K_y t)^2]}} - (z_m + K_z t), \quad (7)$$

当(7)式 $f=0$ 时, 通过数值方法可以求解出 t 值^[17], 然后代入(6)式, 可以得到光线与镜面的交点坐标, 重复(4)~(7)式可以完成望远镜系统的光线追迹。图 3(b)为两条光线追迹结果。

前面是拼接主镜为理想共相面时的光线追迹, 当分块镜引入位置误差(平移、倾斜和旋转等)后, 由于分块镜的变化, 入射光线的法线矢量也随着变化, 引起反射光线的变化, 下面就是对有误差后的光线追迹。

2.4 分块主镜位置误差的光线追迹

拼接主镜的分块镜的位置误差主要有平移误差(轴向和径向)、倾斜误差和旋转误差(对应于分块镜中心)等。

2.4.1 分块镜的平移误差

每分块镜的平移量误差包括轴向的平移量和径向的平移量(分块镜的离轴偏移量), 设每分块镜的平移量为 δ_i 、离轴偏移量为 $(\Delta x_i, \Delta y_i)$, 则每分块镜的 (x_i, y_i, z_i) 表示为

$$\begin{cases} x' = x + x_i + \Delta x_i \\ y' = y + y_i + \Delta y_i \\ z' = z + z_i + \delta_i \end{cases}, \quad (8)$$

将(8)式代入到(2)或(3)式, 可以得到带有位置平移误差量的镜面方程, 然后进行光线追迹。

2.4.2 分块镜的倾斜误差

分块镜的倾斜误差量可以看作是由于分块镜围绕着分块镜中心的 (x_i, y_i, z_i) 三个坐标轴旋转 (α, β, γ) 引起的, 其中 x 轴为垂直纸面指向读者、 y 轴平行纸面垂直向上、 z 轴为沿着光轴方向。分块镜围绕 x, y 轴的旋转角度 (α, β) 将引入分块镜的倾斜误差。对 z 轴的旋转引起带有倾斜的面形误差。

图 4 所示, 当分块镜绕以中心点 (x_i, y_i, z_i) 绕 x 轴旋转 α 角度时候, 在镜面上的入射点 P_m 经旋转变化为 P'_m 点, 入射光线由 \mathbf{A} 变为 \mathbf{A}_1 , 法线 \mathbf{N} 跟着分

可以得到反射光线矢量 $\mathbf{A}''(K_x, K_y, K_z)$, 计算出反射光线的矢量方程:

$$\frac{x-x_m}{K_x} = \frac{y-y_m}{K_y} = \frac{z-z_m}{K_z} = t, \quad (6)$$

将反射光线的(6)式代入次镜(2)式中就得到镜面与光线交点方程:

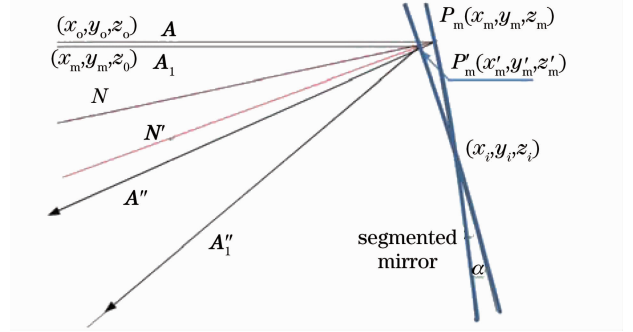


图 4 分块镜的倾斜误差示意图

Fig. 4 Schematic of tilt error of single segmented mirror 块镜旋转 α 变成 \mathbf{N}^1 , 反射光线由 \mathbf{A}'' 变为 \mathbf{A}''_1 。在处理分块镜的旋转倾斜误差时候, 为了减小因为求法线的复杂性, 以镜面上入射点为基准, 先求出分块镜旋转后的位置点和入射点法线的旋转量, 然后再根据(5)式和(6)式可以求出经过分块镜后的出射光线 \mathbf{A}''_1 , 最后再根据(7)式可以得到次镜上的交点。

当分块镜绕 x, y, z 轴分别旋转角度 (α, β, γ) 时候, 得到的矢量变换公式分别如下所示^[18]:

对 x 轴旋转 α :

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{M}_\alpha \mathbf{X}, \quad (9)$$

对 x 轴旋转 β :

$$\begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \mathbf{M}_\beta \mathbf{X}', \quad (10)$$

对 x 轴旋转 γ :

$$\begin{bmatrix} x''' \\ y''' \\ z''' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix} = \mathbf{M}_\gamma \mathbf{X}'', \quad (11)$$

对 x, y, z 轴分别旋转角度 (α, β, γ) 的综合影响为

$$\begin{bmatrix} x''' \\ y''' \\ z''' \end{bmatrix} = \mathbf{M}_\alpha \mathbf{M}_\beta \mathbf{M}_\gamma \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & -\cos \alpha \sin \gamma - \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma & \sin \alpha \sin \gamma - \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma \\ \cos \beta \sin \gamma & \cos \alpha \cos \gamma - \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & -\sin \alpha \cos \gamma - \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma \\ \sin \beta & \sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}. \quad (12)$$

根据(12)式计算出分块镜围绕其中心点 (x_i, y_i, z_i) 旋转角度 (α, β, γ) 后得到入射点 P_m 的坐标变换以及其点法线的旋转量, 再利用(5)~(7)式可以计算出有分块镜误差的光线追迹量, 然后再根据计算所得的理想光线和误差光线得到拼接望远镜的光程差为

$$d_{OP} = (W_{\text{error}} - W_{\text{ideal}}) / \lambda. \quad (13)$$

式中 W_{error} 是拼接主镜有误差时望远镜系统的光程, W_{ideal} 是拼接望远镜理想光学系统的光程, 有望远镜系统的光程差后就可以得到望远镜系统的远场图像、斯特雷尔比和调制传输函数(MTF)等拼接望远镜系统的光学特性。

3 仿真结果

根据前一节的光线追迹理论对分块拼接望远镜光学系统进行了仿真建模。图5是对单个分块镜倾斜误差进行仿真结算并和 Zemax 的计算结果进行比较, 分块镜中心位置为 $(3375 \text{ mm}, 0)$, 外径 d 为 1300 mm , 倾斜角度都为 0.01° 。图5(a)是有 x 方向的倾斜误差的数值仿真结果, 图5(c)是有 y 方向倾斜误差的数值仿真结果; 图5(b)是对应于图5(a)的 Zemax 软件计算结果, 图5(d)是对应于图5(c)的 Zemax 计算结果。去掉倾斜后, 数值仿真计算的波面误差为均方根(RMS) $(0.350 \mu\text{m}, 0.202 \mu\text{m})$, Zemax 计算的值为 RMS $(0.354 \mu\text{m}, 0.212 \mu\text{m})$, 可

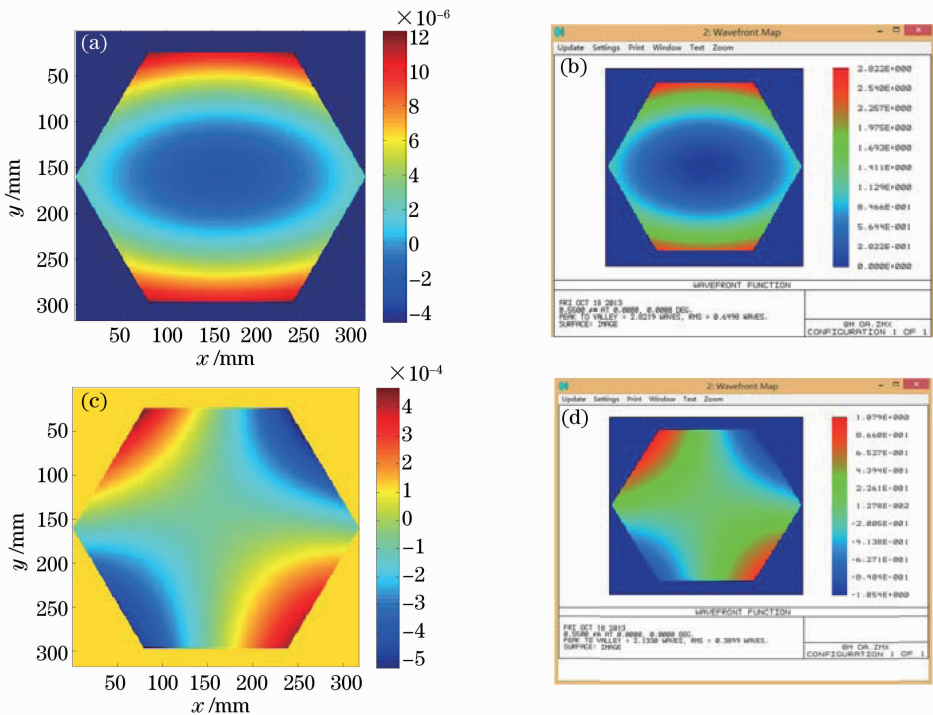


图5 分块镜的倾斜计算结果。(a)单个分块镜有 x 向倾斜误差的波像差; (b)与(a)图对应的 Zemax 计算结果; (c)单个分块镜有 y 向倾斜误差的波像差; (d)与(c)图参数对应的 Zemax 结果

Fig.5 Calculated results of tilt error of single segmented mirror. (a) Wavefront error induced by tilt-error of x -direction; (b) results of Zemax corresponding to (a); (c) wavefront error induced by tilt-error of y -direction; (d) results of Zemax corresponding to parameters of (c)

以看出两者结果吻合很好。

图 6 和图 7 分别为在接主镜的分块镜中引入倾斜误差和平移量误差后整个望远镜光学系统波面误差图。图 6(a)是拼接主镜的分块镜引入倾斜误差时候的系统的波像差;图 6(b)是去掉波像差中各倾斜量后的剩余误差。从图 6(b)中可以看出,由于分块

镜与次镜共同作用,除去倾斜量后还有像散等误差。

图 7(a)是拼接主镜的分块镜引入平移误差量后望远镜系统的波像差;(b)是去掉波像差中各平移后的波像差。从图 7(b)中可以看出,由于主次镜的作用,分块镜的平移误差不仅在波像差中引入平移量,而且还引入离焦量。

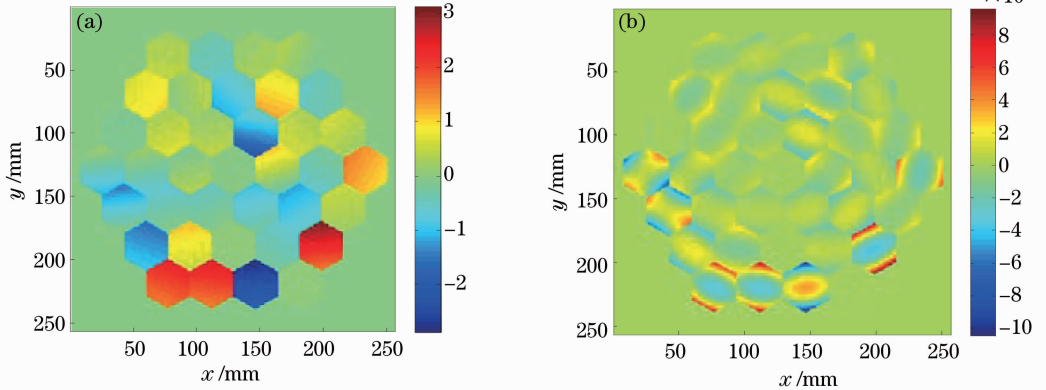


图 6 分块镜倾斜引起的波面误差。(a)分块镜倾斜误差引起的望远镜系统的波像差;
(b)去掉波面误差的平移量后的波像差

Fig. 6 Wavefront distortion induced by tilt error of segmented mirror. (a) Wavefront distortion of telescope system induced by tilt error of segmented mirror; (b) wavefront distortion after the piston removed

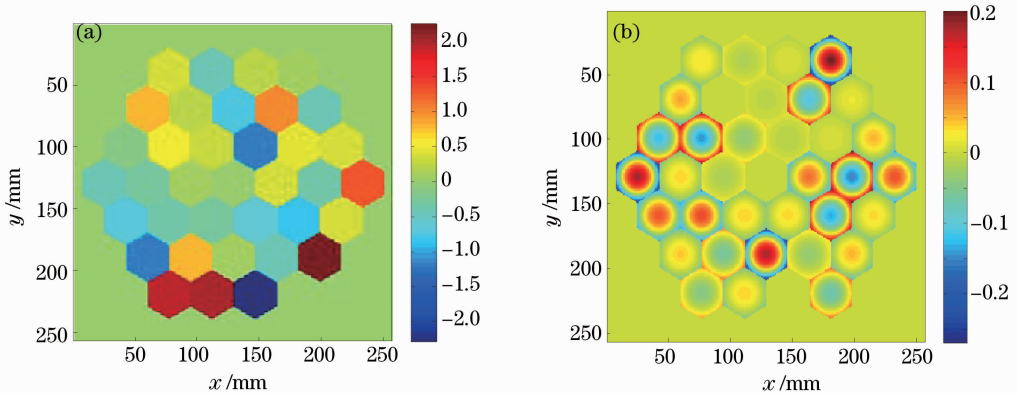


图 7 分块镜平移引起的波面误差。(a)分块镜平移误差引起的望远镜系统的波像差;(b)去掉波面误差的平移量后的波像差
Fig. 7 Wavefront distortion induced by piston error of segmented mirror. (a) Wavefront distortion of telescope system induced by piston error of segmented mirror; (b) wavefront distortion after the piston removed

图 8 为拼接望远镜的远场图像。图 8(a)是拼接望远镜理想光学系统的远场图像,可看出由于主镜呈六边形结构,其远场的主光斑接近于圆孔,而一级环呈六边形发散分布,与衍射理论一致;图 8(b)是在拼接主镜的分块镜引入倾斜误差的远场图像,当分块镜有倾斜误差时,相当于波前引入像差,因此远场衍射图像光斑扩散,而且没有明显的核;图 8(c)是分块镜引入平移误差后的远场图像,可以看出,当引入的平移误差比较小没有破坏拼接镜面的共相时候,远场光斑的能量下降,但是分辨率不改

变(光斑宽度),但是当平移误差超过时,破坏了主镜的共相,远场图像就成为弥散斑。

图 9 为拼接望远镜的分块镜平移误差和倾斜误差对望远镜系统斯特雷尔比的影响。图 9(a)为平移误差的影响,图中蓝色实线是数值仿真结果,红色虚线是理论计算曲线,这里需要指出的是,由于理论计算的是波像差,因此镜面误差 δ_{rms} 跟波像差 σ_{rms} 是二倍关系,即 $2\delta_{\text{rms}} = \sigma_{\text{rms}}$,从图中可以看出,数值仿真和理论计算吻合很好,如果拼接望远镜的 $R_s \geq 90\%$,波像差 $W_e \leq \lambda/20$,镜面平移量误差则为 $P_e \leq$

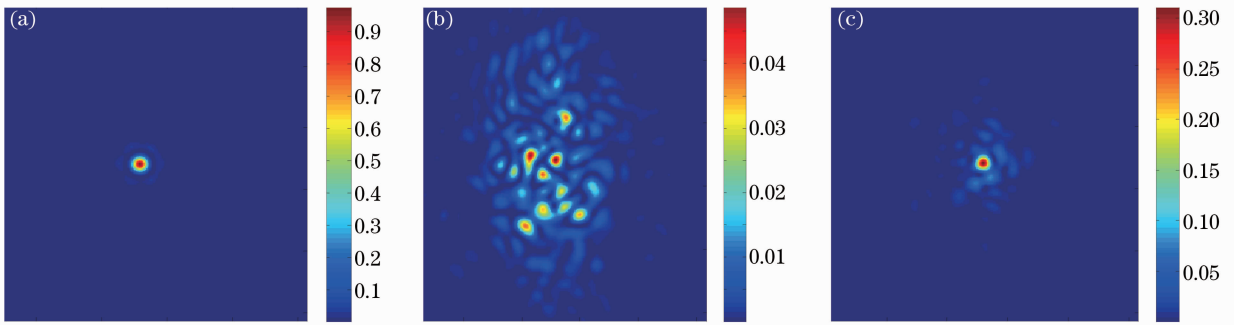


图 8 分块拼接望远镜的远场图像。(a)理想望远镜的远场图像；(b)拼接主镜有倾斜误差后的远场图像；(c)拼接主镜有平移误差的远场图像

Fig. 8 Far-field characteristic of segmented telescope system. (a) Far-field image of ideal telescope system; (b) far-field image with tilt error of segmented mirror; (c) far-field image with piston error of segmented mirror

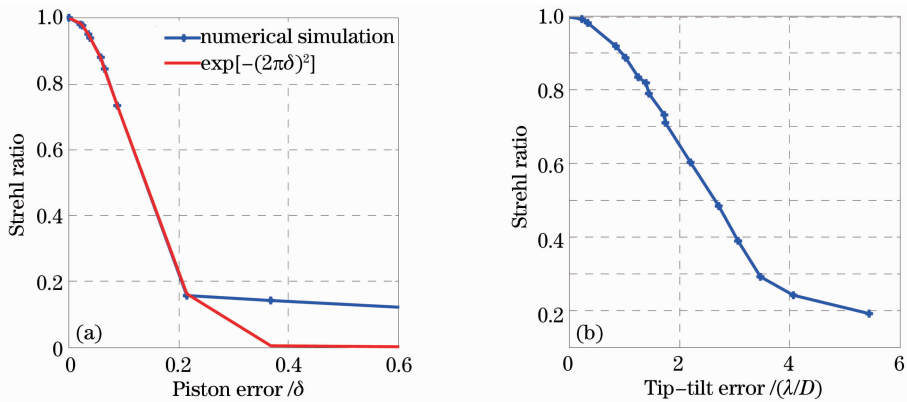


图 9 分块镜的斯特列尔比曲线。(a)平移误差；(b)倾斜误差

Fig. 9 Strehl ratio curve of segmented mirror. (a) Piston error; (b) tilt error

$\lambda/40$ 。

图 9(b)为分块镜倾斜误差与望远镜系统斯特列尔比的关系,横坐标是以望远镜分辨率为单位,从图中可以看出如果拼接望远镜的 $R_s \geq 90\%$,则要求分块镜的倾斜量误差小于望远镜系统的一倍衍射极限 ($T_e \leq \lambda/D$)。

4 结 论

从光线追迹着手,对分块拼接望远镜的光学系统进行了数值仿真。在建模仿真中:实行参数化设计,可对所需规模的拼接望远镜系统进行建模分析;采用光线追迹方法,得到包括拼接主镜以及次镜在内的望远镜光学系统的光程差、波像差、远场图像等结果,利用这些结果可以对拼接望远镜系统的光学性能进行计算分析;对影响拼接望远镜最大的平移和倾斜误差进行了详细的分析,得到结果为,如果要保证望远镜系统的 $R_s \geq 90\%$ 则分块镜的平移误差 $P_e \leq \lambda/40$, 倾斜误差小于一倍望远镜衍射极限 ($T_e \leq \lambda/D$)。

参 考 文 献

- Gary Chanan, Mitchell Troy, Frank Dekens. Phasing the mirror segments of the Keck telescope: the broadband phasing algorithm [J]. J Appl Opt, 1998, 37(1): 140-155.
- Glenn W Zeiders, Edward E Montgomery IV. Diffraction effects with segmented apertures [C]. SPIE, 1998, 3356: 799-809.
- Natalya Yaitskova, Kjetil Dohlen. Simulation of imaging performance for extremely large segmented telescope [C]. SPIE, 2000, 4003: 279-290.
- Natalya Yaitskova, Kjetil Dohlen. Analytical study of diffraction effects in extremely large segmented telescopes [J]. J Opt Soc Am A, 2003, 20(8): 1563-1575.
- Natalya Yaitskova, Kjetil Dohlen. Tip-tilt error for extremely large segmented telescopes: detailed theoretical point-spread-function analysis and numerical simulation results [J]. J Opt Soc, 2002, 19(7): 1274-1285.
- Natalya Yaitskova, Kjetil Dohlen. Diffraction in OWL: effects of segmentation and segments edge misfigure [C]. SPIE, 2013, 4840: 171-182.
- P K Manhart, J Michael Roders. Segmented mirror, manufacturing and alignment tolerances (SMMAT) [C]. SPIE, 1989, 1114: 387-405.
- Long Weijun, Wang Zhile, Zhou Yanping. Imaging analysis and computer simulation of optical synthetic aperture telescope [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(8): 1009-1014.
- 龙伟军, 王治乐, 周彦平. 光学合成孔径望远镜成像分析及计算机仿真 [J]. 光学学报, 2004, 24(8): 1009-1014.
- Wang Shanshan, Zhu Qiudong, Cao Genrui. Cophasing methods of segmented space telescope [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29

- (9); 2435-2440.
王姗姗, 朱秋东, 曹根瑞. 空间拼接主镜望远镜共相位检测方法[J]. 光学学报, 2009, 29(9): 2435-2440.
- 10 Liu Liren. Fresnel telescope full-aperture synthesized imaging ladar: principle [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 0128001.
刘立人. 菲涅耳望远镜全孔径合成成像激光雷达:原理[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0128001.
- 11 Lu Dong, Sun Jianfeng, Zhou Yu, *et al.*. Analysis on detection capability of wide field receiving synthetic aperture imaging ladar [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0728003.
卢 栋, 孙建锋, 周 煜, 等. 大视场接收合成孔径激光成像雷达探测能力分析[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0728003.
- 12 Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces [M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004. 149-155.
潘君华. 非球面光学的设计、加工及检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004. 149-155.
- 13 Born M, Wolf E. Principles of Optics[M]. Yang Jiasun Transl. Beijing: Science Press, 1978. 182-190.
玻 恩, 沃尔夫. 光学原理[M]. 杨葭孙译. 北京: 科学出版社, 1978. 182-190.
- 14 Compiling Group of Handbook of Mathematics, Handbook of Mathematics[M]. Beijing: Higher Education Press, 1979. 235-240.
《数学手册》编写组. 数学手册[M]. 北京: 高等教育出版社, 1979. 235-240.
- 15 Liu Hanchen, Tang Yuanhe. Application of vector analyses on reflection and refraction [J]. J Applied Optics, 2003, 24(2): 46-49.
刘汉臣, 唐远河. 矢量分析在反射和折射中的应用[J]. 应用光学, 2003, 24(2): 46-49.
- 16 G H Spencer, M V R K Murty. Gerneral ray-tracing procedure [J]. Opt Soc, 1951, 41: 672-678.
- 17 Zhong Erjie, Huang Tingzhu. Numerical Analysis[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004. 20-39.
钟尔杰, 黄庭祝. 数值分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004. 20-39.
- 18 Ke Jinpu. The three-dimensional coordinate conversion principle and implementate [J]. Jiangxi Cehui, 2008, 3: 16-20.
柯金朴. 空间三维坐标转换原理及实现[J]. 江西测绘, 2008, 3: 16-20.

栏目编辑: 韩 峰