

doi:10.3788/gzxb20144311.1122004

拼接望远镜成像系统的理论模型分析及仿真研究

廖周^{1,2,3,4}, 刘超^{1,2}, 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, 成都 610209)

(2 电子科技大学 光电信息学院, 成都 610054)

(3 中国科学院自适应光学重点实验室, 成都 610209)

(4 中国科学院大学, 北京 10049)

摘 要: 拼接主镜是建设大型天文望远镜最有效的技术途径, 尤其是对 10 m 及更大口径的望远镜. 本文从光学衍射理论出发, 以 10 m 左右口径望远镜为例, 推导出了拼接望远镜光学系统点扩展函数的解析表达式, 建立了数学仿真模型, 并对影响望远镜系统远场像质的因素进行了计算分析. 理论分析和仿真结果表明: 拼接望远镜的点扩展函数是分块镜的位置干涉函数和分块镜的点扩展函数的乘积; 分块镜间的间距会引起分块镜的衍射光斑展宽, 使远场峰值能量下降; 分块镜的平移误差会严重影响望远镜点扩展函数中的位置干涉函数, 从而降低望远镜系统的斯特列尔比; 分块镜的倾斜误差会在每个分块镜的点扩展函数引入频移, 因而影响拼接望远镜光学系统的点扩展函数, 降低望远镜系统的斯特列尔比.

关键词: 拼接望远镜; 远场图像; 点扩展函数; 斯特列尔比; 平移误差; 倾斜误差

中图分类号: TH751

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)11-1122004-8

The Theoretical Analysis and Simulation Research of Segmented Telescope Image Systems

LIAO Zhou^{1,2,3,4}, LIU Chao^{1,3}, QIU Qi², ZHANG Yu-dong^{1,3}

(1 *The Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)

(2 *School of Optoelectronic Information, Univ of Electron, Sci. & Tech of China, Chengdu 610054, China*)

(3 *The Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)

(4 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The Segmented Telescope is the most effective way to build a giant telescope. 10 meter and larger telescopes are needed to be carried out further for our country. The analytical expression of the Point Spread Function (PSF) for 10 meter Segmented telescope was derived, based on optical diffraction theory. A numerical simulation model was established. The Gaps of Sub-segmented mirrors and Piston error, which affect far-field image quality, were analyzed. Both theoretical analysis and simulation results demonstrated the following: PSF of Segmented telescope can be obtained by multiply coherence function (GF) of Sub-segmented mirrors' center position with single Sub-segmented mirror's PSF. Gaps between Sub-segmented mirrors could blur diffraction spot and decrease the peak energy. Piston error of the Sub-segmented mirror could affect the GF of the PSF seriously. Thereby, Strehl Ratio of the system could be decreased and the frequency of GF is not changed. Tip-Tilt error of Sub-segmented mirrors would cause frequency shift in every PSFs and the whole PSF could be affected and the Strehl Ratio would be decreased.

Key words: Segmented telescope; Far-field image; PSF; Strehl ratio; Piston error; Tip-tilt error

OCIS Codes: 220.4830; 110.4850; 260.1960

0 引言

为了满足天文观测的需求, 望远镜需要更强的探

测能力和更高的分辨力, 既能看得更清、又能看得更远, 因此要求望远镜的口径足够大, 目前在建或将要建设的巨型望远镜口径已经达到 30 m 以上. 我国自主研

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61308082)资助

第一作者: 廖周(1976—), 男, 博士研究生, 副研究员, 主要研究方向为自适应光学, 光学检查等. Email: ioelz@163.com

导师(通讯作者): 张雨东(1964—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为新型自适应光学研究与系统研制. Email: dangban@ioe.ac.cn

收稿日期: 2014-03-26; 录用日期: 2014-06-04

<http://www.photon.ac.cn>

制并已建成的望远镜除开巡天应用的LAMOST外,最大口径为2.16 m^[1],严重不满足我国天文观测需求,因此研发10 m级口径望远镜是我国天文发展最为迫切的需求,对其进行性能分析也十分必要。

目前大型望远镜主要采用分块拼接主镜(KeckI, KeckII, TMT等)和整体成型(SUBRUA, VLT等)两种技术途径.考虑加工、运输、安装、性价比等因素,10 m及更大口径望远镜采用分块拼接主镜技术是必要的.由于六边形子镜具有外型尺寸一致、可以无缝拼接等优点,目前国际上的巨型望远镜均采用六边形分块子镜拼接主镜技术。

美国的Glenn W. Zeiders^[2]和欧南台的N. Yaitskova等人对大型分块拼接望远镜的性能分析做了大量工作^[3-8],Glenn W. Zeiders分析了拼接望远镜的衍射效应,N. Yaitskova的工作主要是针对50 m~100 m口径的巨型望远镜.我国科技工作者在稀疏光学合成孔径和拼接镜的单元技术方面做了大量工作^[9-12],但对分块拼接望远镜系统鲜有工作展开。

本文针对10 m级拼接望远镜特点,先从衍射理论出发,利用光瞳的结构函数,推导了36块拼接主镜的点扩散函数(Point Spread Function, PSF),并建立了数值仿真模型,然后对拼接主镜的点扩散函数、分块镜的间隔(Gaps)、系统的平移误差(Piston error)以及倾斜误差(Tip-tilt error)等进行了详细的理论分析和仿真计算,其仿真结果与理论分析一致。

1 拼接望远镜光学系统的点扩散函数

1.1 拼接望远镜的衍射理论分析

如图1(a)所示,拼接望远镜的主镜由多块六边

形分块镜组成,分块镜的个数 N 和分块镜圈数 M 的关系为 $N=3M(M+1)+1$,由于中心遮拦,实际的分块镜个数为 $N=3M(M+1)$.对于10 m级口径的望远镜系统,主镜一般由36块分块镜拼接而成($M=3, N=36$).

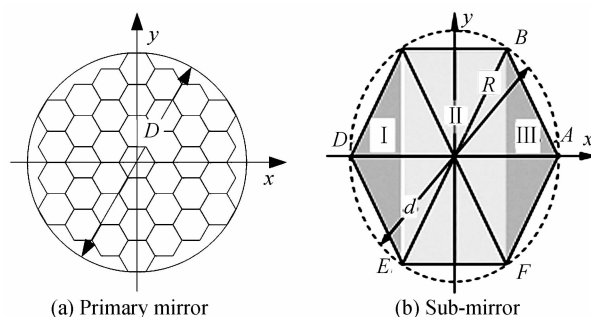


图1 分块拼接主镜以及分块镜示意图

Fig. 1 Schematic of Segmented primary mirror and sub-mirror

根据图1所示,可计算出拼接主镜的外径 D (外接圆)与分块镜外径 d (外接圆)的关系为 $D = \sqrt{3}d(2M+1)/2$ 。

根据衍射理论^[13],得望远镜的光瞳函数为

$$F(x, y) = \sum_{j=1}^N f_j(x-x_j, y-y_j) = \sum_{j=1}^N \theta_j(x-x_j, y-y_j) \exp[i\varphi_j(x-x_j, y-y_j)] \quad (1)$$

(x, y) 是望远镜口径坐标, j 是分块镜编号, N 是分块镜个数, (x_j, y_j) 是第 j 块分块镜的中心位置坐标, f_j 是分块镜的孔径函数, θ_j 和 φ_j 分别是第 j 块分块镜的光瞳函数和相位函数。

$$\theta_j(x-x_j, y-y_j) = \begin{cases} 1, & \text{分块镜内} \\ 0, & \text{分块镜外} \end{cases} \quad (2)$$

根据物理光学,可以得到像面的复振幅为

$$U(\zeta, \eta) = \frac{1}{\lambda z} \int F(x, y) \exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda z}(x\zeta + y\eta)\right] dx dy = \frac{1}{\lambda z} \sum_{j=1}^N \exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda z}(x_j\zeta + y_j\eta)\right] \int \theta_j(x-x_j, y-y_j) \exp[i\varphi_j(x-x_j, y-y_j)] \exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda z}((x-x_j)\zeta + (y-y_j)\eta)\right] dx dy = \frac{AN}{\lambda z} \sum_j \left\{ \exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda z}(x_j\zeta + y_j\eta)\right] \frac{A_j}{A} \frac{1}{A_j} \int \theta_j(x-x_j, y-y_j) \exp[i\varphi_j(x-x_j, y-y_j)] \exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda z}((x-x_j)\zeta + (y-y_j)\eta)\right] dx dy \right\} \quad (3)$$

(ζ, η) 是像面的位置坐标, z 是焦距, λ 是波长, A_j 是第 j 块分块镜的面积。

设六边形外接圆的半径为 R ,分块镜两边之间距离为 $\sqrt{3}R$,分块镜的面积为 $A=3\sqrt{3}R^2/2$ 。

拼接望远镜系统的点扩散函数PSF为

$$\text{PSF}(\zeta, \eta) = |U(\zeta, \eta)|^2 = \left(\frac{AN}{\lambda z}\right)^2 \cdot \left| \sum_{j=1}^N \left\{ \exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda z}(x_j\zeta + y_j\eta)\right] \times \frac{A_j}{A} \frac{1}{A_j} \int \theta_j(x-x_j, y-y_j) \exp[i\varphi_j(x-x_j, y-y_j)] \right\} \right|^2$$

$$\exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda z}((x-x_j)\zeta + (y-y_j)\eta)\right] dx dy \right|^2 \quad (4)$$

设拼接望远镜的主镜是由大小一致的分块镜共拼接而成 $A_j=A, \varphi_j=0$,其拼接望远镜的PSF函数为

$$\text{PSF}(\zeta, \eta) = \left(\frac{AN}{\lambda z}\right)^2 \left| \sum_{j=1}^N \exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda z}(x_j\zeta + y_j\eta)\right] \right|^2 \times \left| \frac{1}{A} \int \theta_j(x-x_j, y-y_j) \exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda z}((x-x_j)\zeta + (y-y_j)\eta)\right] dx dy \right|^2 = \left(\frac{AN}{\lambda z}\right)^2 GF(\zeta, \eta) \text{PSFs}(\zeta, \eta) \quad (5)$$

由式(5)可知,拼接望远镜的点扩散函数(PSF)由

两部分组成,分块镜的中心位置坐标的傅里叶变换后模的平方(为一周期的干涉函数 GF)和分块镜的点扩散函数(PSFs)组成.

$$GF = |U_{gf}(\zeta, \eta)|^2 = \left| \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left\{ \exp \left(i \frac{2\pi}{\lambda z} (x_j \zeta + y_j \eta) \right) \right\} \right|^2 \quad (6)$$

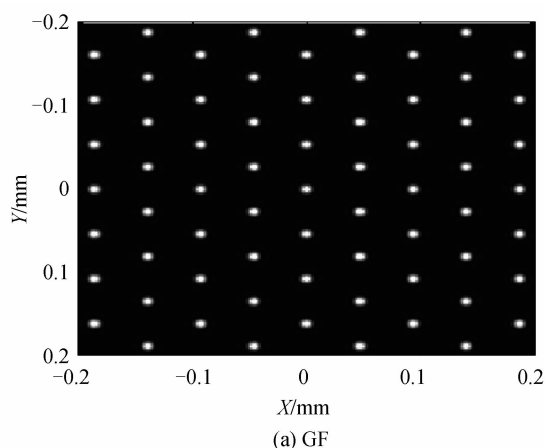
$$PSFs = |U_s(\zeta, \eta)|^2 = \left| \frac{1}{A} \int \theta_j(x - x_j, y - y_j) \cdot \exp \left(i \frac{2\pi}{\lambda z} ((x - x_j)\zeta + (y - y_j)\eta) \right) dx dy \right|^2 \quad (7)$$

1.2 GF 函数和 PSFs 函数的计算

1.2.1 GF 函数的计算

将分块镜的位置坐标代入式(6),并化简可得到望远镜的干涉函数 GF 为

$$GF = |U(\zeta, \eta)|^2 = \left\{ 2[\cos(\beta) + \cos(2\beta) + \cos(3\beta)] + 4\cos\left(\frac{\sqrt{3}\alpha}{2}\right) \left[\cos\left(\frac{\beta}{2}\right) + \cos\left(\frac{3\beta}{2}\right) + \cos\left(\frac{5\beta}{2}\right) \right] + 4\cos(\sqrt{3}\alpha) \left[\frac{1}{2} + \cos(\beta) + \cos(2\beta) \right] + \right.$$



$$4\cos\left(\frac{3\sqrt{3}\alpha}{2}\right) \left[\cos\left(\frac{\beta}{2}\right) + \cos\left(\frac{3\beta}{2}\right) \right] \right\}^2 \quad (8)$$

式中 $\alpha = \frac{2\pi d}{\lambda z} \zeta, \beta = \frac{2\pi d}{\lambda z} \eta$.

GF 函数的衍射图像如图 2(a) 所示,可以看出其干涉图像与图 1(a 图)位置坐标一致,其干涉的频率间隔为: x 方向是以 $4\lambda f/3R$ 为周期, y 方向为 $\lambda f/\sqrt{3}R$ 为周期,图中光斑的间隔取决于各分块镜中心位置之间的距离,光斑直径的大小决定于拼接主镜的外径.

PSFs 函数的计算:

根据图 1(b)可以得到分块镜的积分区域为

$$\begin{aligned} BA: & y = -\sqrt{3}x + \sqrt{3}R \\ AF: & y = +\sqrt{3}x - \sqrt{3}R \\ BC: & y = +\sqrt{3}R/2 \\ EF: & y = -\sqrt{3}R/2 \\ ED: & y = -\sqrt{3}x - \sqrt{3}R \\ CD: & y = +\sqrt{3}x + \sqrt{3}R \end{aligned} \quad (9)$$

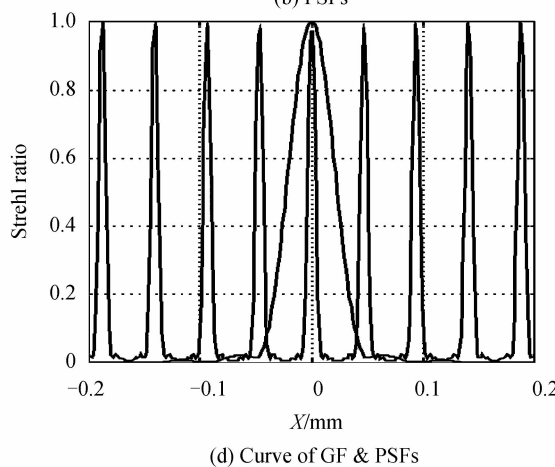
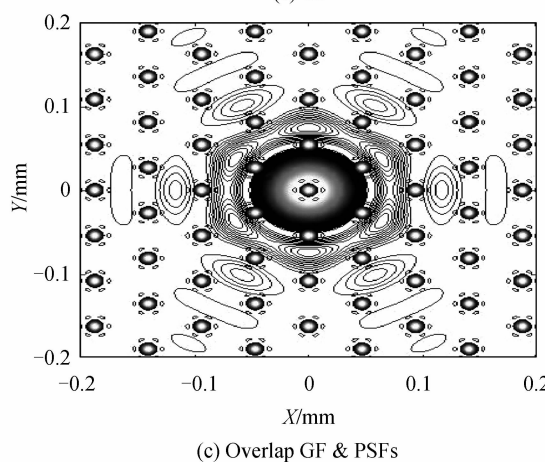
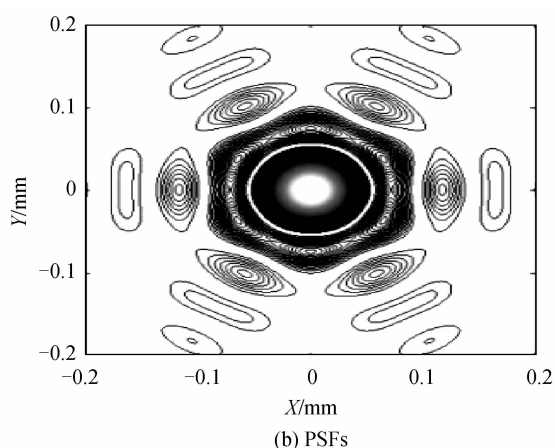


图 2 GF 和 PSFs 衍射图像

Fig. 2 Diffraction image of GF and PSFs

为了方便计算,将六边形分为 3 个积分区域 I、II、III(图 1b),设 $kp = \alpha, kq = \beta$,式(7)的积分形式可以写为

$$U(\xi, \eta) = A \int_{-R}^{-R/2} dx \int_{-\sqrt{3}x - \sqrt{3}R}^{\sqrt{3}x + \sqrt{3}R} e^{-i(2\pi/\lambda z)(\xi x + \eta y)} dy +$$

$$\int_{R/2}^{R/2} dx \int_{-\frac{\alpha R}{2}}^{\frac{\alpha R}{2}} e^{-i(2\pi/\lambda z)(\xi x + \eta y)} dy + \int_{R/2}^{R/2} dx \int_{\frac{\alpha R}{2}}^{\frac{\alpha R}{2}} e^{-i(2\pi/\lambda z)(\xi x + \eta y)} dy \quad (10)$$

经过积分化简后得到分块镜的点扩散函数 PSFs 为

$$I = |U(\zeta, \eta)|^2 = A \left[\frac{2}{(\alpha + \sqrt{3}\beta)\beta} [\cos(\alpha R) - \cos\left(\frac{(\alpha - \sqrt{3}\beta)R}{2}\right)] + \frac{2}{(\alpha - \sqrt{3}\beta)\beta} [-\cos(\alpha R) + \cos\left(\frac{(\alpha + \sqrt{3}\beta)R}{2}\right)] + \frac{4\sin\left(\frac{\alpha R}{2}\right)\sin\left(\frac{\sqrt{3}R\beta}{2}\right)}{\alpha\beta} \right]^2 \quad (11)$$

式中 $\alpha = (2\pi d/\lambda z)\xi$ 和 $\alpha = (2\pi d/\lambda z)\eta$, 其衍射图像如图 2(b), 可以看出由于分块镜是六边形, 其衍射图像一级环接近为圆, 但对于衍射次级以上峰值, 由于边缘的衍射效应, 成 60° 发射状的均匀分布. 在图 2(c)、(d) 是 GF 函数和 PSFs 函数二维和一维叠加图像, 可看出, 如果分块镜间的间距为零时, 由于形状关系, 除开主极大值, PSFs 的极次峰值跟 GF 的峰值并不相对应.

1.2.2 PSF 函数计算

得到 GF 函数和 PSFs 函数后, 带入式(5)可以得到望远镜系统的点扩散函数 PSF, 由于拼接主镜的 PSF 函数为位置干涉函数 GF 与分块镜 PSFs 的乘积, 其衍射极限的大小由干涉函数 GF 确定, 其结果如图 3(b).

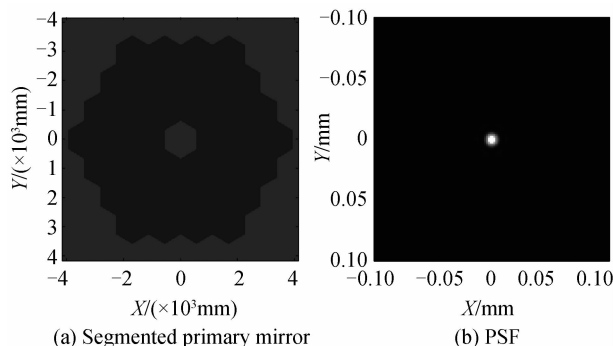


图 3 拼接主镜以及 PSF 衍射图像
Fig. 3 Simulated Segmented primary mirror and PSF

2 数值仿真

仿真中, 选择望远镜外径为 8 m(对应分块镜外径 1.3 m), 望远镜 $F\#$ 为 12. 由于 GF 函数是根据 $N=36$ 推导的, 为了建模的有效性和通用性, 将式(4)写为

$$PSF(\zeta, \eta) = |U(\zeta, \eta)|^2 = \left(\frac{AN}{\lambda z}\right)^2 \cdot \left| \sum_{j=1}^N \left\{ \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda z}(x_j\zeta + y_j\eta)\right) \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda z}\delta_j\right) \times \frac{1}{A}\theta_j(x-x_j, y-y_j) \exp[i\varphi_j(x-x_j, y-y_j)] \cdot \exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda z}((x-x_j)\zeta + (y-y_j)\eta + \Delta_j)\right] dx dy \right\} \right|^2 \quad (12)$$

式中, (x_j, y_j) 为每分块镜的位置坐标, δ_j 为各分块镜

的平移误差, Δ_j 为倾斜误差. 在式中将不参与积分的平移误差 δ_j 和位置坐标 (x_j, y_j) 形成新的位置干涉函数 GF' , 即

$$GF' = |Ugf(\zeta, \eta)|^2 = \left| \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda z}(x_j\zeta + y_j\eta + \delta_j)\right) \right|^2 \quad (13)$$

根据傅里叶变换的频移特性^[13-14], 可得到有拼接主镜误差信息的望远镜系统 PSF 函数的表达式为

$$PSF(\zeta, \eta) = \left(\frac{AN}{\lambda z}\right)^2 \left| \sum_{j=1}^N \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda z}(x_j\zeta + y_j\eta)\right) \cdot \exp(i\delta_j) \times U_s(\zeta + \Delta\zeta_j, \eta + \Delta\eta_j) \right|^2 \quad (14)$$

式中 $(\Delta\zeta_j, \Delta\eta_j)$ 是第 j 块分块镜由于倾斜误差 Δ_j 在像面引起的频移. 仿真结果如图 3 所示, 图 3(a) 是拼接望远镜的主镜面的图像, 图 3(b) 是拼接望远镜系统的点扩散函数图像, 可以看出由于拼接主镜为六边形, 所以拼接主镜的 PSF 函数的远场衍射图像跟单个分块镜的衍射图像相似.

3 仿真结果分析

3.1 分块镜间隔对望远镜系统斯特列尔比 (Strehl ratio) 的影响

分块镜的间隔有两种产生方式: 1) 分块镜的尺寸不变, 分块镜的位置间距增加——图 4(a); 2) 分块镜的位置不变, 改变分块镜的尺寸——图 4(b). 这两种情况作用分别影响到分块镜位置干涉函数 GF 和分块镜的 PSFs 函数, 其结果如图 5 所示, 接下来分别对两种情况进行详细分析.

1) 当分块镜的尺寸不变时候, 在不考虑像差因素条件下改变分块镜的位置坐标, 这时单个分块镜的 PSFs 函数不变, 分块镜的 GF 函数改变. 当分块镜中心点之间距离增大时候(相当于望远镜合成口径增大), 由图 2(a) 可得, GF 函数的变得密集, 干涉光斑的宽度减小, 当分块镜之间的距离增至无穷大时候(相当于无穷远的镜面干涉), 所有峰值就集中到一块, 衍射光斑的尺寸缩小于一个点, 就等于无穷大孔径系统的远场衍射; 当分块镜中心点之间的距离减小时候, GF 函数峰值间隔将增加, 峰值宽度也展宽, 当所有位置坐标靠拢重叠在一个点时候, GF 函数就为常量 1, 这就是平

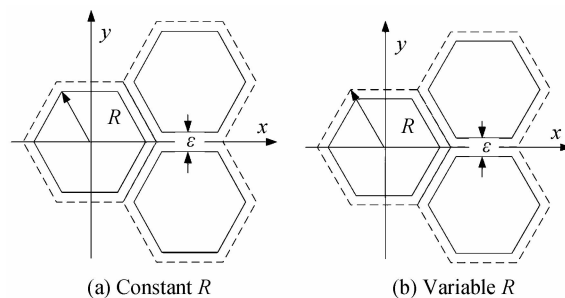


图 4 分块镜之间间隔示意图
Fig. 4 Schematic of gaps

常看见的单个有效口径的远场衍射图像.适当增加分块镜位置间隔量,远场图像如图5所示,这也是一般的稀疏光学合成孔径的远场图像.

2)当分块镜的位置坐标固定,改变分块镜尺寸大小时,干涉函数GF不变,分块镜衍射函数PSFs出现展宽,峰值下降现象如图5(c).

设分块镜的间隔宽度为 ϵ (图4),根据式(4)则有

$$\text{PSF}(\zeta, \eta) = \left(\frac{A_\epsilon N}{\lambda Z} \right)^2 \text{GF}(\zeta, \eta) \text{PSFs}(\zeta, \eta) \quad (15)$$

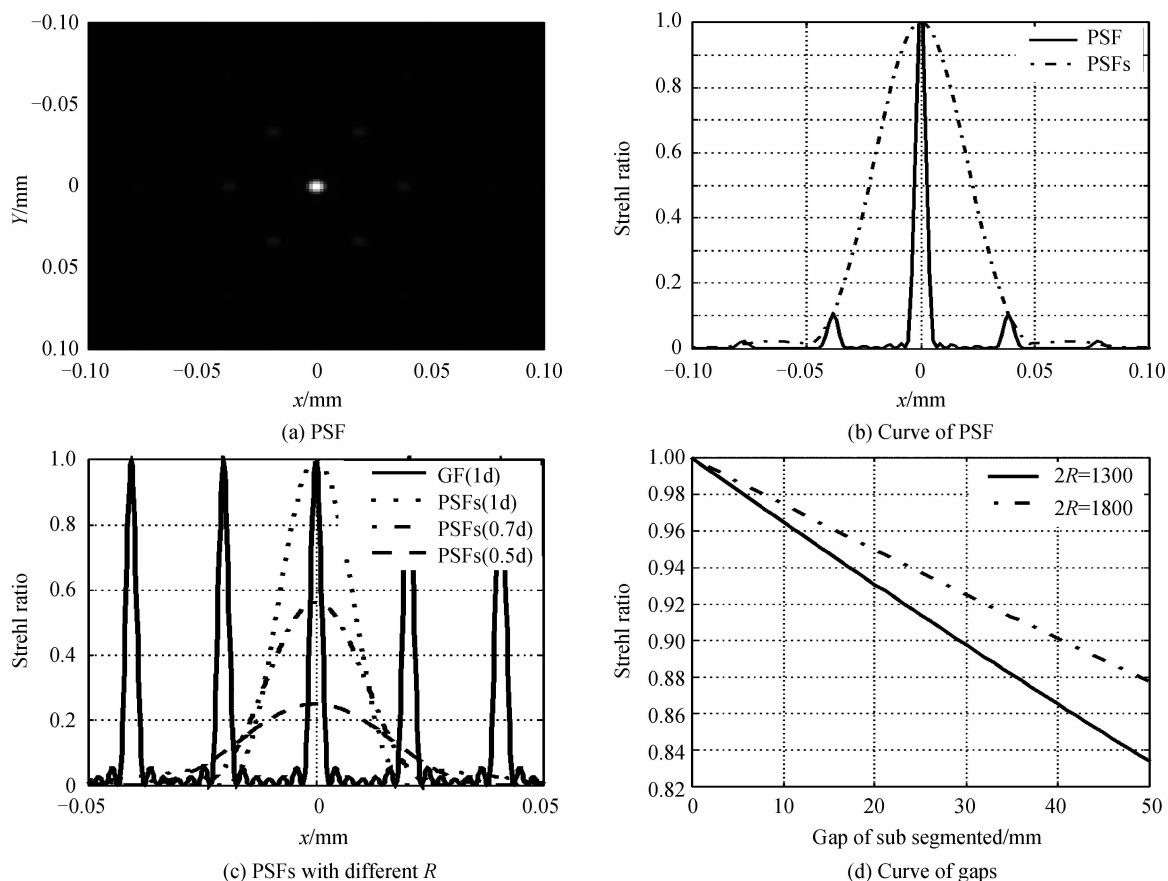


图5 分块镜间隔对PSF和SR的影响

Fig. 5 Point-spread function of segmented telescope with gaps

3.2 分块镜平移误差对系统SR的影响

当拼接主镜没有平移误差($\delta_j=0$),式(14)可写为

$$\text{PSF}(\zeta, \eta) = \left(\frac{AN}{\lambda z} \right)^2 \left| \sum_{j=1}^N \exp \left(i \frac{2\pi}{\lambda z} (x_j \zeta + y_j \eta) \right) \right| \cdot U_s(\zeta, \eta) \quad (17)$$

式中 A_0^2 是单个分块镜的积分,当引入平移误差量后($\delta_j \neq 0$),式是位置坐标量(x_j, y_j)和平移误差量 δ_j 的叠加,可改写为

$$\begin{aligned} \text{PSF} &= \left| \sum_{j=1}^N \left[\exp(-i\delta_j) \right] \int \theta(x, y) \cdot \right. \\ &\quad \left. \exp(ik(x\zeta + y\eta)) dx dy \right|^2 = \\ &= \left| \sum_{j=1}^N \left[\exp(-i\delta_j) \right] \times A_0^2 \right|^2 \quad (18) \end{aligned}$$

根据SR的定义,利用式和根据文献[15-17]以得

式中 $A_\epsilon = 3\sqrt{3}(R - 2\epsilon/\sqrt{3})^2/2$,得到Strehl ratio为

$$\text{SR} = A_\epsilon / A_0 = (1 - 2\epsilon/\sqrt{3}R)^4 \quad (16)$$

图5(d)是对块镜外径分别为1.8m和1.3m情况下,不同分块镜间隔对应的Strehl ratio图.结合图2(c)由于在拼接望远镜的高阶峰值能量跟主峰值能量差距很大,达到几个量级,因此在研究地外行星等需要使用星冕仪的情况下,要根据实际需要分析计算间隔宽度.

到拼接望远镜系统的SR为

$$\begin{aligned} \text{SR} &= \left| \sum_{j=1}^N \left[\exp(-i\delta_j) \right] \right|^2 \cdot A_0^2 \cdot \frac{1}{N^2 A_0^2} = \\ &= \frac{1}{N^2} \left(\sum_{j=1}^N |e^{-i\delta_j}|^2 + 2 \sum_{j=1}^N \sum_{l=1, l \neq j}^N e^{-i\delta_j} e^{i\delta_l} \right) = \\ &= \frac{1}{N} \left(N + N(N-1) \sum_{j>1}^N \cos(\delta_j - \delta_l) \right) = \\ &= \frac{1}{N} \left(1 + (N-1) \exp(-(2\pi\sigma)^2) \right) \quad (19) \end{aligned}$$

当 N 足够大时,式(19)可简化为

$$\text{SR} = \exp[-(2\pi\sigma)^2] \quad (20)$$

因为拼接主镜平移误差对望远镜PSF函数的影响主要是影响到干涉函数GF',图6是平移误差对GF'函数影响图,图6误差量依次为 $0, \lambda/10, \lambda/5, 5$ 和 2λ .

可以看出平移误差量改变 GF' 函数峰值, 随着误差量增加, 其峰值能量急剧下降, 但是误差量并不影响到光斑的宽度. 这可以从物理意义上解释: 1) 由于平移误差的增加, 破坏了拼接主镜的共相, 根据衍射理论式 (17), 共相时, 系统的峰值能量为 $N^2 A_0^2$, 当平移误差量增加到破坏拼接主镜的共相时, 又由于平移量误差引入的离焦量, 望远镜系统的峰值能量小于所有分块镜的能量和 NA_0^2 ; 2) 由于干涉函数 GF 的光斑是不同位

置的干涉结果, 光斑宽度是由位置最大宽度决定. 因此在拼接主镜共相没有完全破坏时, 其光斑宽度不变, 但当平移误差增大到足以破坏拼接主镜的共相后, 光学干涉不存在, GF 函数峰值消失, 结果如图 6(d) 所示. 这里需要说明的是, 由于仿真计算时候, 是以波面误差来计算, 而 Piston error 跟波面误差有个 2 倍关系, 因此在图 6 和图 7 中横坐标是使用 2σ .

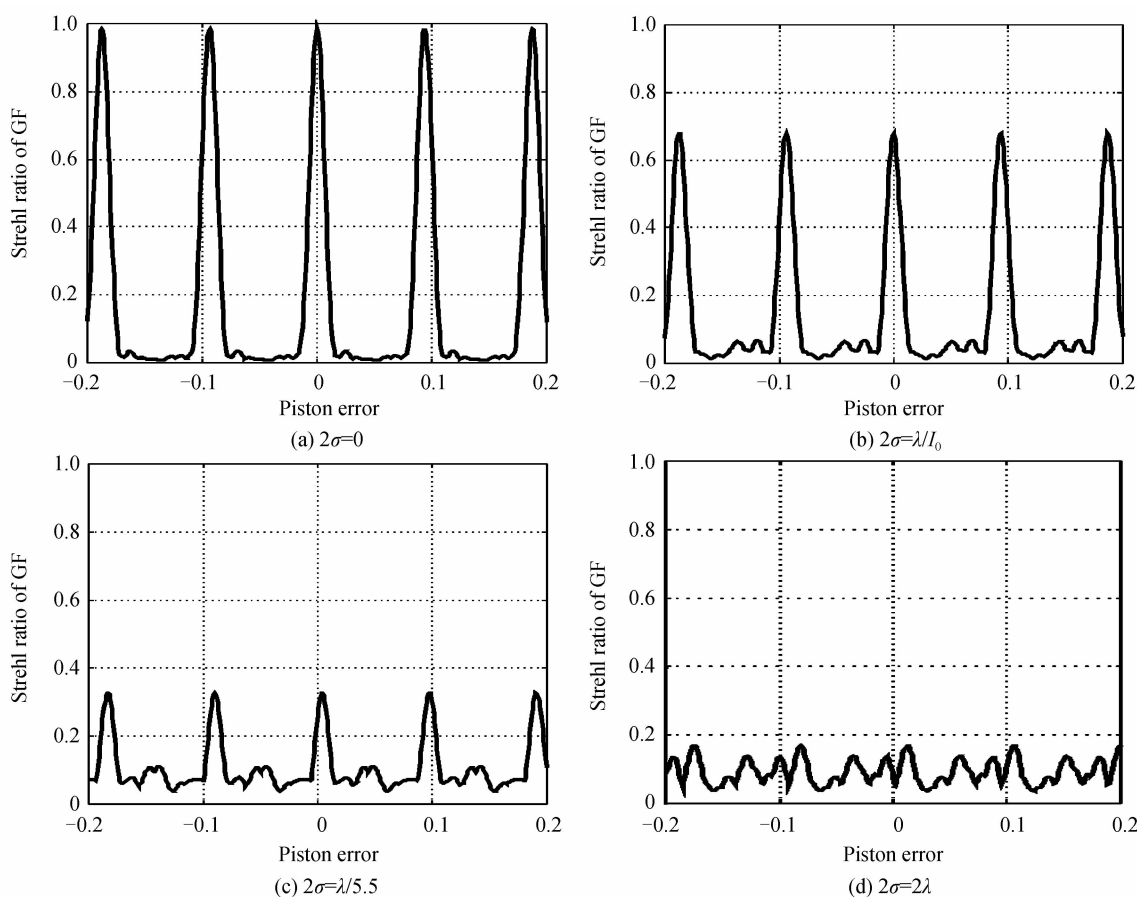


图 6 分块镜平移误差对 GF 函数的影响

Fig. 6 GF function of segmented mirror with piston error

平移误差对拼接望远镜系统 SR 影响的仿真结果如图 7. 图中方块实线为仿真结果, 点实线和虚线分别

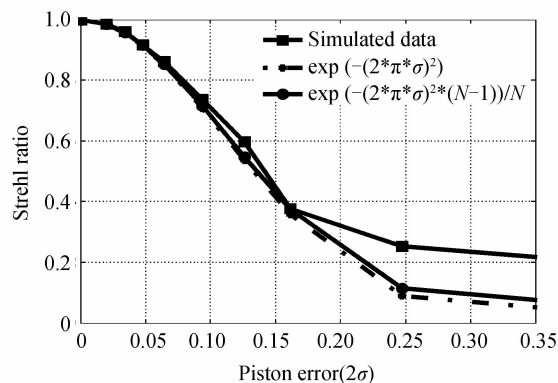


图 7 分块镜平移误差对拼接望远镜 SR 影响的仿真结果
Fig. 7 Strehl ratio curve of piston error of segmented mirror

是式 (19) 和式 (20) 的计算结果. 从仿真结果可以看出, 在共相阶段, 仿真实验数据和理论公式计算吻合很好, 对 36 块拼接主镜的望远镜系统可以直接用经典式 (20) 来计算.

当误差量 $2\sigma = \lambda/15$ 时候, 拼接主镜的共相效果已经很差, SR 下降厉害, 如果需要 $SR > 0.9$, 则平移误差量 $2\sigma < \lambda/20$, 对满足工作要求的平移量误差量为 $\sigma < (\lambda/40 \sim \lambda/30)$, 在可见光波段 ($\lambda = 0.55 \mu\text{m}$) 时候, 对镜面共相要求为 $\sigma_p < (13 \text{ nm} \sim 18 \text{ nm})$, 因此难度很高, 这可能是 Keck 望远镜工作在红外波段的原因.

3.3 分块镜倾斜误差对系统 SR 的影响

在拼接望远镜中, 利用傅里叶变换的频移特性, 拼接主镜有倾斜误差时望远镜系统可用式 (14) 表示. 在仿真计算时, 倾斜误差的输入是以望远镜的分辨率 $\lambda/$

D (D 为拼接主镜的外径)为单位.图8是分块镜的倾斜误差跟拼接望远镜SR关系图.从图中可以看到如果要 $SR > 0.9$,则分块镜的倾斜量不能超过拼接望远镜的一倍分辨率;当 $SR > 80\%$ 时候,分块镜的倾斜量不能大于拼接望远镜分辨率的1.5倍.

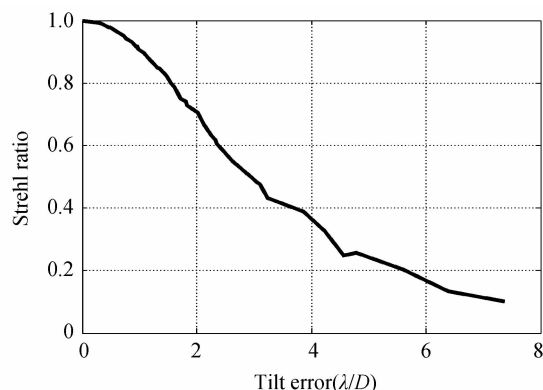


图8 分块镜倾斜误差对拼接望远镜SR影响的仿真结果

Fig.8 Strehl ratio curve of tip-tilt error of segmented mirror

当拼接主镜又有平移误差和倾斜误差的时候,得到表1的仿真实验数据,在表1中从左到右分别是平移误差(E_p)、倾斜误差(E_t)、平移误差的SR(SR_p)、倾斜误差的SR(SR_t)、平移误差和倾斜误差综合作用的SR以及 SR_p 与 SR_t 的乘积.从表最后一列可以看出,平移误差和倾斜误差的综合作用等于各自误差的乘积,其误差不到1%.

表1 分块镜平移误差和倾斜误差对望远镜SR的影响

Table 1 Strehl ratio curve due by Piston error and Tip-tilt error of segmented mirror

$E_p(\lambda)$	$E_t(\lambda/D)$	SR_p	SR_t	$SR/ SR_p * SR_t$	
1	0.033	0.525	0.958	0.974	0.934
2	0.041	0.513	0.944	0.975	0.928
3	0.047	0.225	0.920	0.995	0.921
4	0.050	1.064	0.919	0.897	0.825
5	0.054	1.044	0.897	0.901	0.814
6	0.061	0.705	0.875	0.953	0.844
$E_p(\lambda)$	$E_t(\lambda/D)$	SR_p	SR_t	$SR/ SR_p * SR_t$	

4 结论

本文针对10 m左右口径的拼接望远镜系统,利用衍射光学理论,推导了拼接望远镜系统的远场特性——点扩散函数的解析表达式,点扩散函数是分块镜的位置干涉函数和单个分块镜的点扩散函数的乘积.根据该解析表达式,建立了望远镜系统的仿真实验模型,开展了仿真实验,得到了以下结论:

1)在分块镜中心位置确定的情况下,分块镜间的间隔不影响望远镜系统的分辨率,但影响望远镜系统的SR.随着分块镜间的间隔增加(分块镜中心位置不变、分块镜尺寸减小),单个分块镜的远场衍射光斑出现展宽、峰值下降,因此影响望远镜的SR;

2)分块镜的位置干涉函数决定望远镜的分辨率,当分块镜之间存在沿光轴方向的平移误差时,系统的SR会降低.分块镜之间的平移误差会影响望远镜系统的干涉性,在拼接镜面的干涉性没有被完全破坏之前,望远镜系统的分辨率不改变;但随着平移误差量的增加,拼接主镜的干涉性会被完全破坏,此时望远镜的分辨率不再由望远镜口径决定,变成散斑成像.理论计算和仿真实验表明,要使拼接望远镜系统的 $SR \geq 80\%$,分块镜的平移误差(RMS)不能大于 $\lambda/30$;

3)当分块镜存在倾斜误差时,分块镜的远场衍射图像会出现由于频移引起的偏移,导致望远镜的SR下降.仿真实验表明,要使拼接望远镜系统的 $SR \geq 80\%$,分块镜的倾斜误差(RMS)不能大于 $1.5\lambda/D$ (D 为拼接主镜的有效外径);

4)根据仿真实验结果得到,当分块镜有平移误差和倾斜误差时,望远镜系统的SR为两个误差项SR的乘积.

参考文献

- [1] 温学诗,无鑫.观天巨眼-天文望远镜的400年[M].北京:商务印书馆,2008.
- [2] ZEIDERS G, MONTGOMERY IV E E. Diffraction effects with segmented apertures[C]. SPIE, 1998, **3356**: 799-809.
- [3] YAITSKOVA N, DOHLEN K. Simulation of Imaging Performance for extremely large segmented telescope [C], SPIE, 2000, **4003**: 279-290.
- [4] YAITSKOVA N, DOHLEN K. Analytical study of diffraction effects in extremely large segmented telescopes[J]. *Optical Society America*, 2003, **20**: 1563-1574.
- [5] YAITSKOVA N, DOHLEN K. Tip-tilt error for extremely large segmented telescopes; detailed theoretical point-spread-function analysis and numerical simulation results[J]. *Optical Society America*, 2002, **19**(7): 1274-1285.
- [6] YAITSKOVA N, DOHLEN K. Diffraction in OWL: effects of segmentation and segmentes edge misfigure [C]. SPIE, 2013, **4840**: 171-182.
- [7] MANHARTP K, RODERS J M. Segmented mirror, manufacturing and alignment tolerances(SMMAT)[C]. SPIE, 1989, **1114**: 387-405.
- [8] ZEIDER G. Image-based alignment of large segmented telescope[C]. SPIE, 2000, **4003**: 241-249.
- [9] CHEN Rong-li, ZHANG Tao, MA Zhen, et al. Influences of alignment errors on image quality of large segmented mirrors [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(12): 3240-3244. 陈荣利,张涛,马臻,等.拼接误差对拼接式大口径反射镜成像质量的影响[J]. *光子学报*, 2009, **38**(12): 3240-3244.
- [10] CHEN Bao-gang, DONG lei, LIN Xu-dong. Segmented mirror of fourier telescope field experimental system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(1): 87-91. 陈宝刚,董磊,林旭东.傅里叶望远镜外场试验系统拼接主镜[J]. *光子学报*, 2011, **40**(1): 87-91.
- [11] WANG Sheng-qian, RAO Chang-hui, JIANG Wen-han, et al. Analysis of spatial arrangement for optical synthetic aperture imaging system with four sub-apertures[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **28**(4): 692-699. 王胜千,饶长辉,姜文汉,等.四孔径光学合成孔径成像系统空间排布性能分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 692-699.
- [12] LIU Zheng, WANG Sheng-Qian, HUANG Lin-hai. Analysis

- of comprehensive effects of piston error and sub-aperture aberrations on the image quality of sparse-optical - synthetic-aperture system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **10**: 100702.
- 刘政,王胜千,黄林海. 位相平移误差与子孔径自身像差对稀疏光学合成孔径成像系统质量的综合影响分析[J]. *物理学报*, 2011, **10**:100702.
- [13] MAX BORN, EMIL WOLF. Principles of optics[M]. 电子工业出版社 2005:368-373.
- [14] 《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] LEWIS C, ROBERTS J R, PERRIN M D, *et al.* Is that really your Strehl ratio[C]. SPIE, 2004, **5490**: 504-515.
- [16] ROSS T S. Limitations and applicability of the Marechal approximation[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(10): 1812-1818.
- [17] CHANAN G, TROY M. Strehl ratio and modulation transfer function for segmented mirror telescope as functions of segment phase error[J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(31): 6642-6647.