

Golay3 望远镜系统的倾斜误差

范君柳¹ 王 军¹ 吴泉英^{1*} 王福亮² 沈婷婷² 臧涛成¹

(¹苏州科技学院数理学院, 江苏 苏州 215009
²苏州大学信息光学工程研究所, 江苏 苏州 215006)

摘要 阐述了 Golay3 望远镜系统入射光瞳的结构与主镜 F 数的关系, 通过入瞳函数推导出子镜具有倾斜误差的系统点扩展函数 (PSF) 和调制传递函数 (MTF) 表达形式, 利用 Matlab 软件模拟了子镜倾斜误差对系统 PSF 和 MTF 的影响。利用 Zemax 软件设计了 Golay3 望远镜系统, 通过对系统中子镜引入倾斜误差得到了系统的 PSF 和 MTF 并与上述理论模拟结果进行了比较。以标准鉴别率板为物体进行模拟成像, 分析了倾斜误差对望远镜成像性能的影响。设计结果表明: 理论模拟和实例设计的 PSF 和 MTF 对倾斜误差的反应一致且比较敏感; 当倾斜误差引起的波面倾斜峰谷值变化达到一个波长时, PSF 和 MTF 的主瓣和旁瓣均发生较明显的变化, 变化的方向取决于引入倾斜误差的子镜位置; 而当波面倾斜峰谷值变化超过一个波长时, PSF 和 MTF 的变化趋势基本保持不变; 成像结果表明随着水平方向上的子镜倾斜误差的增加, 鉴别率板垂直方向上可分辨的最大线对数变化明显。

关键词 信息光学; 稀疏孔径; Golay3 望远镜; 倾斜误差

中图分类号 TH75 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.111102

Tilt Error of Golay3 Telescope System

Fan Junliu¹ Wang Jun¹ Wu Quanying¹ Wang Fuliang²

Shen Tingting² Zang Taocheng¹

¹ School of Mathematics and Physics, Suzhou University of Science and Technology,
Suzhou, Jiangsu 215009, China

² Institute of Information Optical Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

Abstract The relation between structure of entrance pupil of Golay3 telescope system and F -number of primary mirror is analyzed. Point spread function (PSF) and modulation transfer function (MTF) of telescope system are derived through entrance pupil function which considers the tilt error of one submirror; The effect of tilt error on PSF and MTF is simulated by Matlab program; a example of Golay3 telescope is designed by Zemax software, the PSF and MTF of the system are obtained with tilt error in a submirror, and compared with the theoretical simulation results. Finally, Golay3 telescope's imaging capability is evaluated under different tilt error value with a standard board as the object. According to the result of the Zemax software, the change of both PSF and MTF of Golay3 telescope system because of tilt error is consistent with that of the theoretical simulation. When the peak-to-valley value of tilt wavefront is smaller than one wavelength, both the main lobe and the side lobes of PSF and MTF pattern vary enormously, the direction of the variation depends on the position of the submirror with tilt error. When the peak-to-valley value of tilt wavefront exceeds one wavelength, both the PSF and MTF remain unchanged basically. The imaging results show that with the increase of tilt error of the submirror in x direction, the maximal recognizable line pairs in y direction changes dramatically.

Key words information optics; sparse aperture; Golay3 telescope; tilt error

OCIS codes 110.4100; 110.1200; 110.6770

1 引 言

由于在衍射极限条件下天文望远镜的角分辨率为工作波长 λ 与入射光瞳口径 D 之比, 因此为满足对地

收稿日期: 2012-06-01; 收到修改稿日期: 2012-07-01; 网络出版日期: 2012-09-11

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK2009129)、江苏省“333”人才工程和“六大人才高峰”项目资助课题。

作者简介: 范君柳(1983—), 男, 硕士, 实验师, 主要从事光学设计方面的研究。E-mail: fjl280@163.com

* 通信联系人。E-mail: wqcyh00@yahoo.com.cn

观测和空间探索对图像分辨率越来越高的要求,需要发展大口径的望远系统。然而传统单一大口径望远系统的研制往往面临着光学材料、加工工艺、制造成本和运载能力等诸多限制。为此人们开始寻求新方法来解决上述问题,基于干涉成像原理的光学稀疏孔径成像系统便是其中之一。稀疏孔径是通过将数个较小的光学孔径按照一定的排列规则构成一个大的光学孔径,从而捕获与单个大孔径系统相当的目标信息,它可有效地降低光学镜面的加工难度和制造成本。稀疏孔径望远镜有两种类型即多子镜望远镜系统(MMT)和多子望远镜系统(MTT),各自的代表有美国波音 SVS 公司的 Golay6 稀疏孔径望远镜^[1]和美国麻省理工学院的自适应侦查 Golay-3 光学卫星(ARGOS)^[2]。

目前已报道的关于稀疏孔径望远镜的工作集中于理想的稀疏孔径模型^[3~7],然而在望远镜子镜装调以及实际工作过程中,由于受到装调公差和环境扰动的影响都会使得子镜偏离原先的理想位置,导致各子镜成像光束不共相位,从而对望远镜整体成像质量产生严重的影响,稀疏孔径中子镜的误差主要有两种:活塞误差(Piston error)和倾斜误差(Tilt error)^[8~10],本文主要讨论子镜的倾斜误差对 Golay3 望远镜成像性能的影响。理论推导并模拟子镜具有倾斜误差的 Golay3 望远镜的点扩展函数(PSF)和调制传递函数(MTF),并通过设计一个 Golay3 望远镜系统对上述理论加以验证。

2 Golay3 望远镜入射光瞳

2.1 Golay3 望远镜 3 个子镜入瞳面的投影

Golay3 望远镜的主镜是由 3 个子镜取代单一球面主镜组成,因此 3 个子镜具有与原单一球面主镜相同的曲率半径,3 个子镜的面形中心均关于主镜面形中心 120° 旋转对称,且 3 个子镜在入瞳平面内的投影为 3 个椭圆^[11],投影具体方位如图 1 所示。

主镜坐标系如图 2 所示。 z 轴为光线传播方向,根据右手坐标定则, y 轴垂直纸面向内。假设每个子镜的直径均为 d ,球面反射镜曲率半径为 R ,3 个子镜外侧包围口径即入瞳口径的直径为 D ,主镜矢高角为 α ,子镜矢高角为 β 。

根据图 2 中的几何关系可以得到 $\alpha = \arcsin\left(\frac{D}{2R}\right)$, $\beta = \arcsin\left(\frac{d}{2R}\right)$,每个子镜在入瞳平面的投影椭圆的长轴 $2a = d$ 、短轴 $2b = d\cos(\alpha - \beta)$,椭圆短轴 b 的具体表达式可写为

$$\frac{2b}{D} = \left(\frac{2a}{D}\right)^2 \left\{ \left(\frac{D}{2R}\right)^2 + \sqrt{\left(\frac{D}{2R}\right)^4 - \left[\left(\frac{D}{2R}\right)^2 - \left(\frac{D}{2a}\right)^2 + \left(\frac{D}{2R}\right)^2 \left(\frac{D}{2a}\right)^2}\right\}, \quad (1)$$

从(1)式可以看出,在给定 D 和 R (即给定主镜 F 数, $F = f'/D = R/2D$, f' 为主镜焦距)的前提下, b 的大小依赖于 a 的取值。长轴与短轴关系曲线如图 3 所示,可以看出,当 F 增至 0.4 时, b 与 a 几乎成线性关系;随着 F 的增大,该线性关系进一步加强,此时子镜在入瞳面上的投影基本上可以看成是圆形。而当 $R \rightarrow \infty$ 时,主镜面为平面即 $b = a$ 。

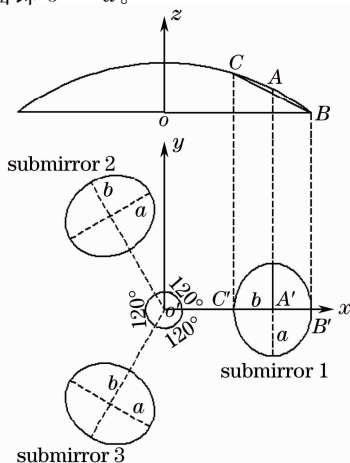


图 1 子镜在入射光瞳上的投影

Fig. 1 Submirrors' projection onto the entrance pupil

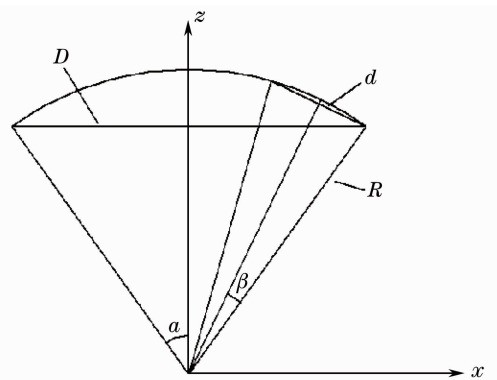


图 2 Golay3 主镜的坐标系

Fig. 2 Coordinate system for the Golay3 primary mirror

2.2 Golay3 望远镜系统的光瞳函数

由图 1 可以得到 3 个椭圆中心的坐标 (x_n, y_n) ($n=1, 2, 3$) 分别为

$$\begin{cases} x_n = \rho \cos \theta_n \\ y_n = \rho \sin \theta_n \end{cases}, \quad (2)$$

其中,
$$\begin{cases} \rho = \sqrt{R^2 - d^2/4} \sin(\alpha - \beta) \\ \theta_n = \frac{(n-1)2\pi}{3} \end{cases}; n = 1, 2, 3.$$

3 个椭圆的方程均可由位于入瞳中心的正椭圆经过旋转和平移变换得到:

$$P_n = \frac{[(x - x_n) \cos \theta_n + (y - y_n) \sin \theta_n]^2}{b^2} + \frac{[-(x - x_n) \sin \theta_n + (y - y_n) \cos \theta_n]^2}{a^2}, \quad (3)$$

在椭圆区域内, $P_n = 1$; 在椭圆区域外, $P_n = 0$ 。

因此, 衍射受限的 Golay3 稀疏孔径望远镜的光瞳函数可写为

$$P(x, y) = \left[1 - \text{circ} \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{r} \right) \right] \sum_{n=1}^3 P_n(x, y), \quad (4)$$

式中 r 为次镜的口径, 如果次镜对于 3 个子镜无遮拦, 则上式中第一个因子可以去掉。

假设此时第 n 个子镜引入倾斜误差, 如图 4 所示, 该子镜绕 x, y 平面内过原点的某个方向转动了角度 θ_n , 且该方向与 x 轴夹角为 ω , 则该子镜的倾斜可以分解为绕 x 轴的转动和 y 轴的转动, 转角分别为 $\theta_{nx} = \arctan(\tan \theta_n \cos \omega)$, $\theta_{ny} = \arctan(\tan \theta_n \sin \omega)$ 。

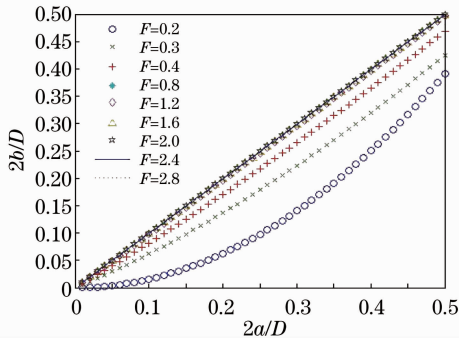


图 3 不同主镜 F 数下椭圆长轴 a 与短轴 b 的关系

Fig. 3 Relations between major semi-axis a and minor semi-axis b of ellipse with different F -number

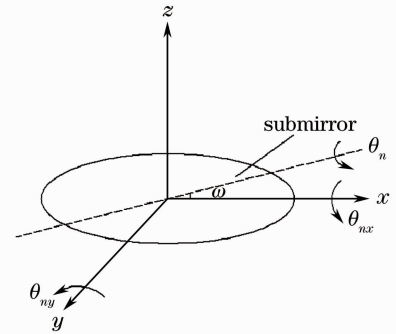


图 4 子镜的倾斜误差

Fig. 4 Tilt error of submirror

倾斜的子镜将产生附加波像差 W_n , 假设子镜位于理想位置时的波像差为零, 则此时光瞳函数应修正为

$$P(x, y) = \sum_{n=1}^3 P_n(x, y) \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} W_n(x - x_n, y - y_n) \right], \quad (5)$$

式中 $W_n(x, y) = x \tan \theta_{ny} + y \tan \theta_{nx}$, 当 θ 足够小时, 上式可以写为: $W_n(x - x_n, y - y_n) = x \theta_{ny} + y \theta_{nx}$, (5) 式则可写成:

$$P(x, y) = \sum_{n=1}^3 P_n(x, y) \exp \left\{ j \frac{2\pi}{\lambda} [\theta_y(x - x_n) + \theta_x(y - y_n)] \right\}. \quad (6)$$

2.3 具有倾斜误差的 Golay3 望远镜的 PSF 和 MTF

根据光瞳函数、PSF 和 MTF 的关系, 可以分别得到 PSF 和 MTF 的表达形式:

$$F_{\text{PS}}(x, y) = |\mathcal{F}\{P(x, y)\}|^2 = \left| \sum_{n=1}^3 \mathcal{F} \left\{ P_n(x, y) \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} \theta_y(x - x_n) + \theta_x(y - y_n) \right] \right\} \right|^2, \quad (7)$$

$$F_{\text{MTF}} = \left| \frac{P(\lambda z \xi, \lambda z \eta) * P(\lambda z \xi, \lambda z \eta)}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} P(x, y) dx dy} \right| =$$

$$\left. \frac{\sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^3 P_m(\lambda z \xi, \lambda z \eta) \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} \theta_y (x - x_m) + \theta_x (y - y_m) \right] * P_n(\lambda z \xi, \lambda z \eta) \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} \theta_y (x - x_n) + \theta_x (y - y_n) \right]}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} P(x, y) dx dy} \right|_{\xi = x/(\lambda z), \eta = y/(\lambda z)} \quad (8)$$

式中 $\xi = \frac{x}{\lambda z}$, $\eta = \frac{y}{\lambda z}$ 分别表示频率域坐标, 对应于空间坐标 x 和 y 方向; z 为焦距; $*$ 是自相关符号, 其中

$$\mathcal{F}\{P_n(x, y)\} = ab \frac{J_1(2\pi l)}{l} \exp[-j2\pi(\xi x_n + \eta y_n)], \quad (9)$$

$$l = \sqrt{a^2(\xi \cos \theta_n + \eta \sin \varphi_n)^2 + b^2(-\xi \sin \theta_n + \eta \cos \varphi_n)^2}. \quad (10)$$

3 理论模拟

用 d_{PV} 表示倾斜误差引起的波面倾斜峰谷值, 其中 $d_{PV} = 2a \sqrt{\theta_x^2 + \theta_y^2}$, 假设引入倾斜误差的子镜为图 1 中的子镜 1, 并且设该子镜仅绕 x 轴倾斜。利用 Matlab 软件模拟分别得出倾斜误差对填充因子为 48% 的 Golay3 望远镜 PSF 和 MTF 的影响, 结果如图 5 和图 6 所示。

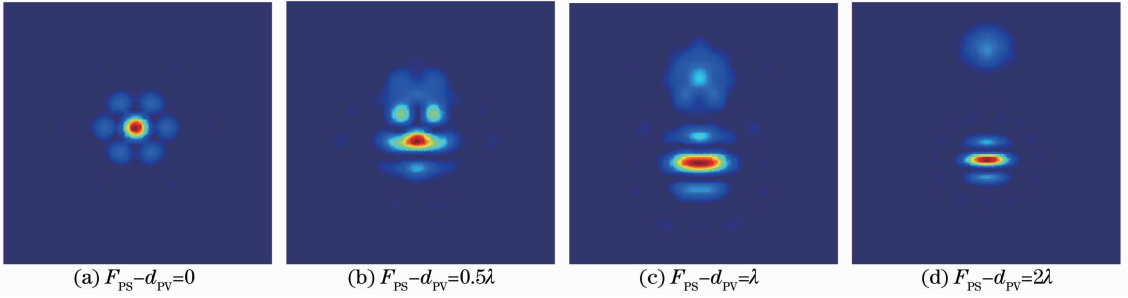


图 5 倾斜误差对 Golay3 望远镜 PSF 的影响

Fig. 5 Effect of tilt error on PSF of Golay3 telescope

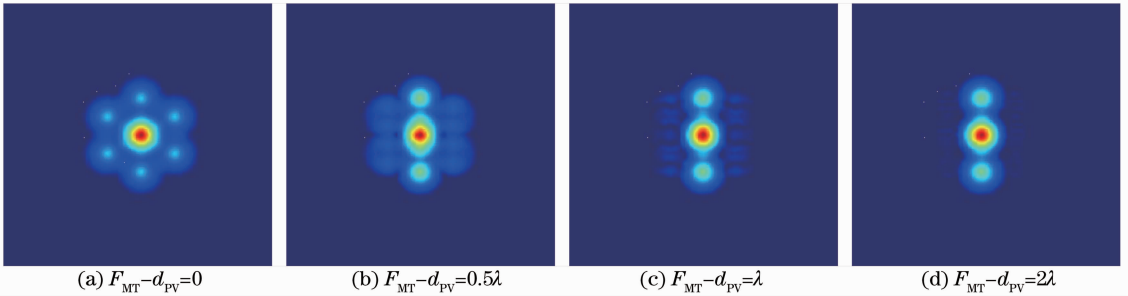


图 6 倾斜误差对 Golay3 望远镜 MTF 的影响

Fig. 6 Effect of tilt error on MTF of Golay3 telescope

由图 5 可得, 随着子镜 1 倾斜误差的逐渐增加, 点扩散函数的主瓣所占能量未发生多大变化, 但是其形状由圆形逐渐变为椭圆形。当倾斜误差引起的波像差达到 0.5λ 时, 这一点已经很明显; 而旁瓣的个数由误差为 0 时的 6 个逐渐变为 2 个, 并且由于子镜倾斜角度的增加, 通过子镜 1 的光束已无法与另外两个子镜的光束共焦, 因此在主瓣与旁瓣附近区域有一个亮度较暗、形状不规则的光斑。

由图 6 可见, 在零误差时 MTF 沿着 $\pi/3$ 整数倍方向具有相同的调制特性, 随子镜 1 倾斜误差增加, 逐渐变化为在 $\pi/2$ 和 $3\pi/2$ 方向上具有相同的调制特性, 而变化的角度与倾斜子镜所在的位置以及倾斜的方向有关。从图 5 和图 6 还可以看出, 当倾斜误差增加到 λ 时, PSF 和 MTF 与误差为零时相比均变化显著; 而当倾斜误差超过 λ 时, PSF 和 MTF 基本保持不变。

4 Golay3 望远镜的设计实例

Golay3 望远镜的设计参数及设计结果如表 1 所示, 在该设计的基础上, 用与图 1 中子镜位置相同的

Golay3 稀疏孔径代替系统主镜,得到如图 7 所示的 Golay3 望远镜结构,由于本文主要考察倾斜误差对于望远镜成像性能的影响,因此望远镜的视场 ω 选择为 0° ,工作波长选择为 $0.55 \mu\text{m}$ 。通过对比 Golay3 望远镜点列图(图 8)中像斑与艾利斑可以看出该望远镜成像质量良好。

表 1 两镜系统结构参数

Table 1 Structural parameters of two-mirror system

Objective parameters		Configuration parameters /mm	
System relative aperture	1:2.6	Aperture diameter	260
Relative aperture of primary mirror	1:1.2	Location of secondary mirror	112
Obscuration ratio	0.359	Distance between two mirrors	200
Magnification of secondary mirror	-2.14	Radius of primary mirror	-624
Conic of primary mirror	0	Radius of secondary mirror	-419.972
Conic of secondary mirror after optimization	10.733	Image position	40

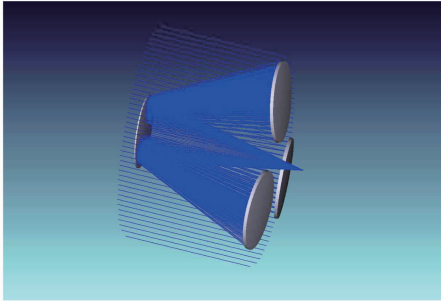


图 7 Golay3 望远镜结构

Fig. 7 Configuration of Golay3 telescope

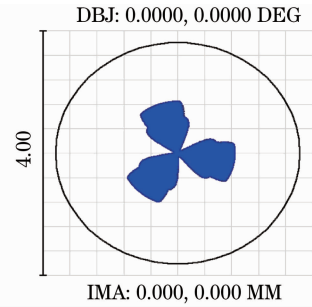


图 8 Golay3 望远镜点列图

Fig. 8 Spot diagram of Golay3 telescope

同样用 d_{PV} 表示倾斜误差引起的波面倾斜峰谷值,假设引入倾斜误差的子镜仍为子镜 1,并且该子镜仅绕 x 轴倾斜。通过 Zemax 光学设计得到不同倾斜误差下 Golay3 望远镜 PSF 图和 MTF 图分别如图 9 和图 10 所示。

由图 9 和图 10 可见,随着倾斜误差的增加,PSF 和 MTF 表现出来的变化趋势与理论模拟中相一致,说明理论分析的正确性。

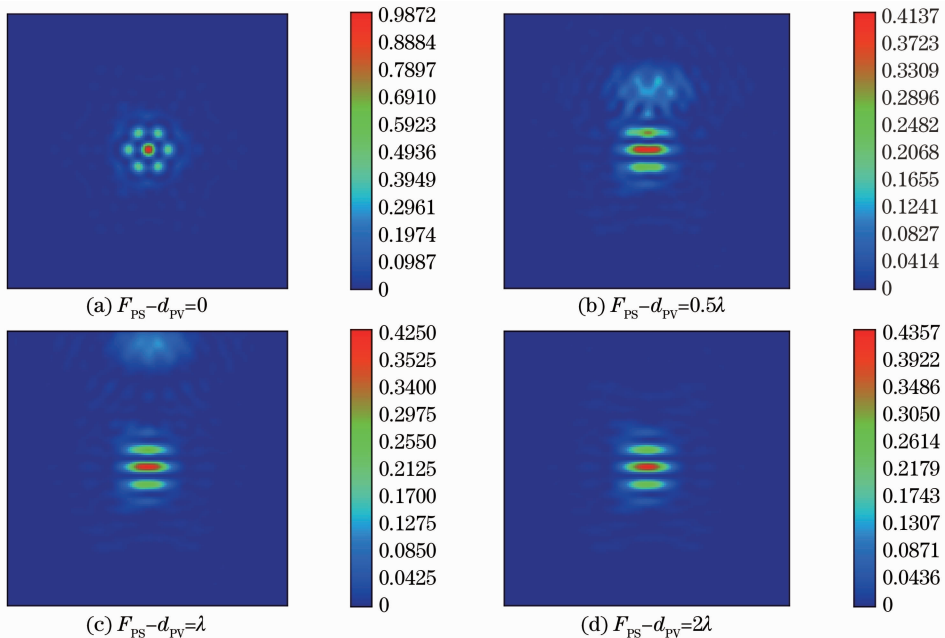


图 9 倾斜误差对 Golay3 望远镜 PSF 的影响

Fig. 9 Effect of tilt error on PSF of Golay3 telescope

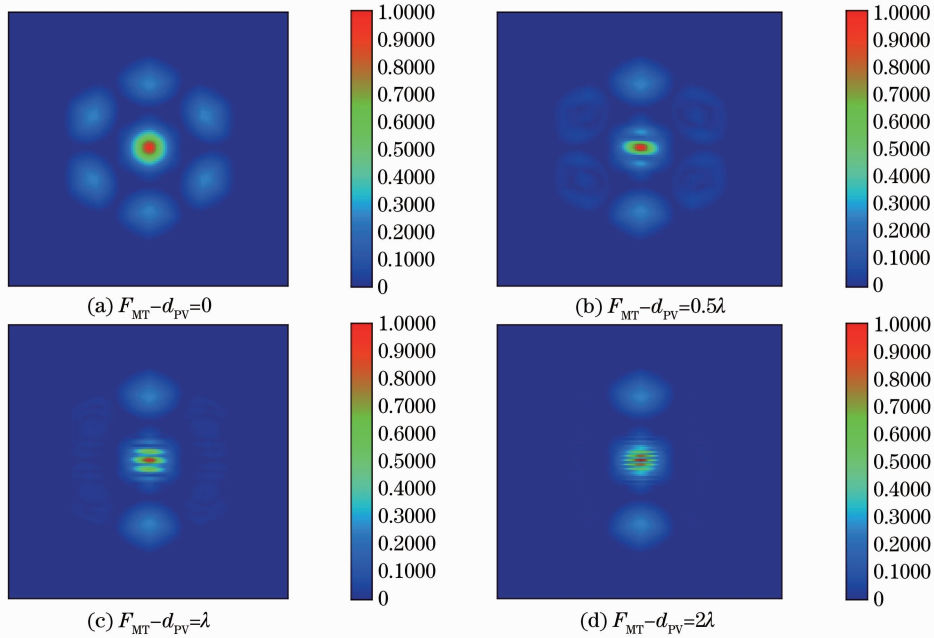


图 10 倾斜误差对 Golay3 望远镜 MTF 的影响

Fig. 10 Effect of tilt error on MTF of Golay3 telescope

5 Golay3 望远镜的成像模拟

以标准鉴别率板为目标物体,通过 Golay3 望远镜进行成像模拟。由于鉴别率板上的线对只有水平和竖直两个方向,且最大线对数为 90 lp/mm,为了更加精确的得到在这两个方向上鉴别率的变化,首先给出了在不同倾斜误差下子午(竖直方向)和弧矢(水平方向)上的 MTF 曲线,并且最大截止频率设置为 100 lp/mm,如图 11 所示。

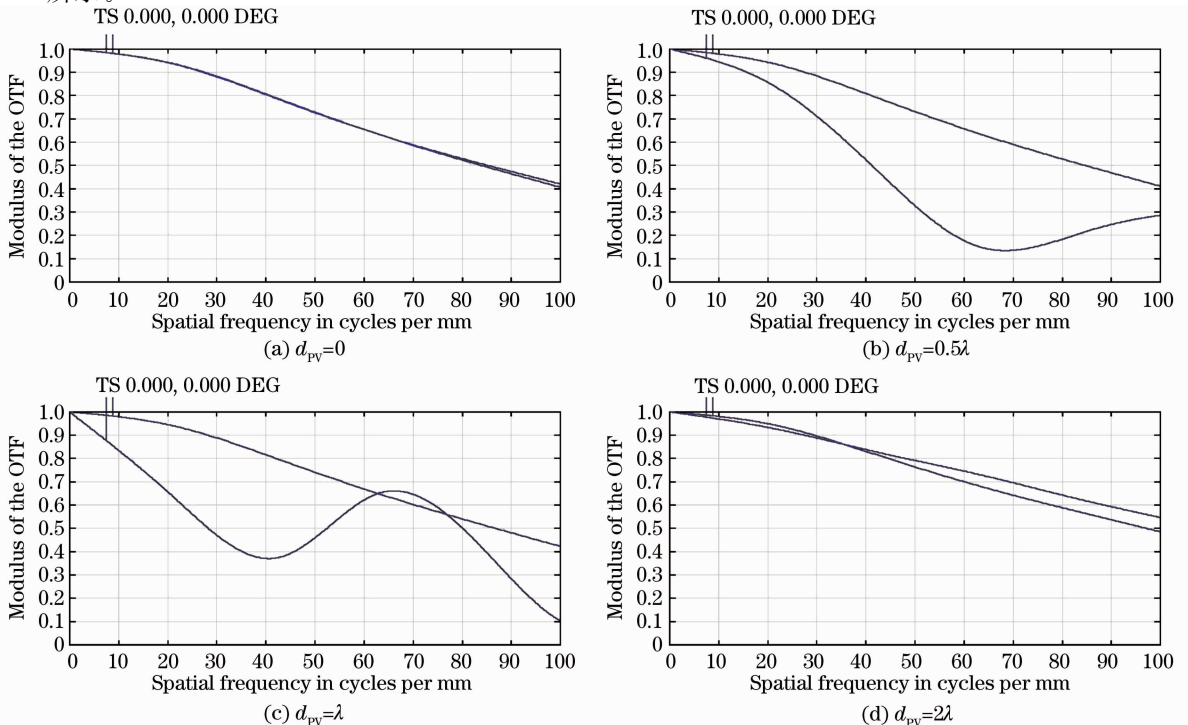


图 11 子午和弧矢方向 MTF

Fig. 11 MTF at tangential and sagittal directions

图 12(a)为鉴别率板原图,图 12(b)~(e)则分别是不同倾斜误差下的成像模拟结果。可以看出随着倾斜误差的增加,鉴别率板水平方向上最大可分辨线对数基本保持不变,而垂直方向上最大可分辨的线对数变化比较明显,变化趋势同图 11 中子午方向 MTF 变化基本一致。

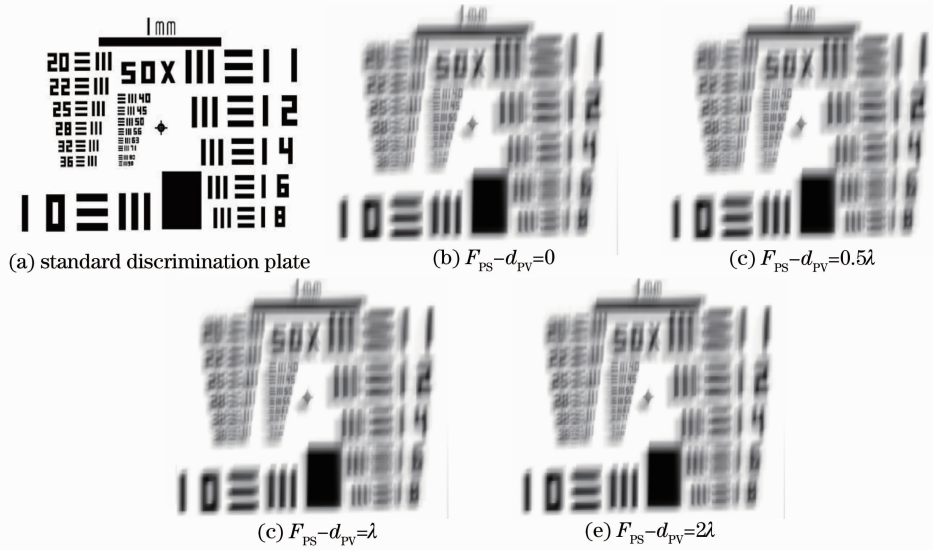


图 12 不同倾斜误差的模拟成像结果

Fig. 12 Simulated imaging results with different tilt errors

6 结 论

本文推导了 Golay3 望远镜的光瞳函数,并由此得出子镜具有倾斜误差的系统 PSF 和 MTF 的表达形式;分别通过 Matlab 和 Zemax 软件设计的 Golay3 望远镜实例进行验证,得出的倾斜误差对 PSF 和 MTF 影响的结果一致。通过设计实例可见,望远镜系统对子镜倾斜误差极其敏感:当倾斜误差引入的波面倾斜峰谷值变化在一个波长范围之内时,PSF 和 MTF 变化明显,且 PSF 和 MTF 具体发生变化的方向与具有倾斜误差的子镜位置有关;当波面倾斜峰谷值变化超过一个波长时,PSF 和 MTF 基本保持不变,这说明对于 Golay3 望远镜子镜需要在波长数量级上控制子镜的倾斜误差,以达到良好的成像目的。采用标准鉴别率板作为物体通过望远镜成像模拟,进一步验证了倾斜误差对系统 MTF 的影响。

参 考 文 献

- 1 D. DeYoung, J. Dillow, S. Corcoran *et al.*. Ground demonstration of an optical control system for a space-based sparse-aperture telescope[C]. *SPIE*, 1998, **3356**: 1156~1167
- 2 S. J. Chung, D. W. Miller, O. L. Weck. ARGOS testbed; study of multidisciplinary challenges of future spaceborne interferometric arrays[J]. *Opt. Engng.*, 2004, **43**(9): 2156~2167
- 3 R. D. Fiete, T. A. Tantalio, J. R. Calus *et al.*. Image quality of sparse-aperture designs for remote sensing[J]. *Opt. Engng.*, 2002, **41**(8): 1957~1968
- 4 Wu Quanying, Qian Lin, Shen Weiming. Imaging research of two kinds of sparse-aperture systems[J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2006, **14**(1): 26~33
- 5 吴泉英, 钱 霖, 沈为民. 两种稀疏孔径系统的成像研究[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(1): 26~33
- 6 N. J. Miller, M. P. Dierking, B. D. Duncan. Optical sparse aperture imaging[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(23): 5933~5943
- 7 Fan Junliu, Wu Quanying, Wang Fuliang *et al.*. Design of Golay3 telescope system[J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2011, **19**(12): 2677~2683
- 8 范君柳, 吴泉英, 王福亮 等. Golay3 望远镜系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(12): 2677~2683
- 9 Zhao Juan, Wang Dayong, Zhang Yaxin *et al.*. Effect of different designs of the multiple-array configuration on imaging of optical sparse aperture systems[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 934~939

- 赵娟,王大勇,张亚新等. 光学稀疏孔径系统符合阵列构造对系统成像的影响[J]. 中国激光, 2009, **36**(4): 934~939
- 8 Natalia 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. Am*, 2002, **19**(7): 1274~1285
- 9 P. Wizinowich, B. McLeod, M. Lloyd-Hart *et al.*. Adaptive optics for array telescopes using piston-and-tilt wave-front sensing[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(28): 6036~6046
- 10 Jorge L. Flores, Marija Strojnik, Gonzalo Paez *et al.*. Effects of misalignment errors on the optical transfer unctions of synthetic aperture telescopes[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(32): 5926~5932
- 11 Wu Feng, Wu Quanying, Qian Lin. Analysis of the characteristics of the Golay3 multiple-mirror telescope[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(3): 643~652