

共相位望远镜阵列的光束耦合问题研究

王福亮^{1,2} 吴泉英¹ 范君柳¹ 沈婷婷^{1,2} 钱霖³

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
³苏州大学物理科学与技术学院, 江苏 苏州 215006

摘要 研究了共相位望远镜阵列的两种重要光束耦合误差——光瞳面平移(piston)误差和光瞳面倾斜(tilt)误差。设 piston 误差和 tilt 误差都服从均值为零但标准差待定的正态分布,根据中心点亮度判据,通过迭代方法计算了 piston 误差和 tilt 误差所允许的最大标准差,揭示了这两类光束耦合误差所允许的最大标准差与子望远镜个数和遮光比的关系。Piston 误差所允许的最大标准差与子望远镜的遮光比无关,但随着子望远镜个数不断增加,在 $0.11\lambda\sim 0.08\lambda$ 范围内缓慢减小。Tilt 误差所允许的的最大标准差在子望远镜出瞳大小已知的情况下,随遮光比不断增加而逐渐减小,而与子望远镜个数无明显的相关性。

关键词 傅里叶光学;稀疏孔径;光束耦合误差;概率统计;共相位望远镜阵列

中图分类号 O438 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0616003

Study on Beam Combining Errors of Phased Telescope Array

Wang Fuliang^{1,2} Wu Quanying¹ Fan Junliu¹ Shen Tingting^{1,2} Qian Lin³

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

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

³School of Physical Science and Technology, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

Abstract Two important beam combining errors, piston errors and tilt errors are studied. Supposing, both piston errors and tilt errors obey normal distribution with zero-mean but leaving standard deviations to be determined, according to Strehl ratio, the permitted maximal standard deviations of piston errors and tilt errors are calculated based on iterative algorithm, respectively. Relations between the permitted maximal standard deviations of the two beam combining errors and obscuration ratios and numbers of sub-telescopes are revealed. The permitted maximal standard deviations of piston errors have no relationship with obscuration ratios of the sub-telescopes; but they decrease slowly within a narrow range of $0.11\lambda\sim 0.08\lambda$ as the numbers of sub-telescopes increase. In the case of known pupils size, the permitted maximal standard deviations of tilt errors decrease as the obscuration ratios of sub-telescopes increase, while they have no significant correlations with the numbers of sub-telescopes.

Key words Fourier optics; sparse aperture; beam combining errors; probability and statistics; phased telescope array

OCIS codes 220.2740; 070.2465; 070.2580; 080.1005; 080.1753

1 引 言

衍射极限条件下,望远镜的角分辨率随口径的增大而提高,但望远镜的口径往往受其体积、重量、

制造成本和发射难度等因素的限制^[1~7],不能无限增大。为此提出了基于干涉成像原理的光学稀疏孔径成像方法来设计分辨率与单一大口径望远镜相

收稿日期: 2012-01-01; 收到修改稿日期: 2012-02-22

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK2009129)、江苏省“333”人才工程和江苏省六大人才高峰资助课题。

作者简介: 王福亮(1986—),男,硕士研究生,主要从事光学设计与仪器光学方面的研究。E-mail: wflgucheng@126.com

导师简介: 吴泉英(1965—),女,博士,教授,主要从事光学设计与仪器光学等方面的研究。

E-mail: wqcyh00@yahoo.com.cn(通信联系人)

当、而体积和重量却相对较小的光学系统。共相位望远镜阵列是采用稀疏孔径成像方法的光学系统之一,它将来自各子望远镜的光束通过光束组合器耦合到像面,能够在一定视场范围内对目标物直接成像,并可以达到与传统单一大口径望远镜相当的分辨率。

为满足高分辨率需要,共相位望远镜阵列要求通过各子望远镜的光束在共同的像平面上同相位叠加,不满足这一条件时称为相位失调。造成相位失调的误差有两种,一种是光瞳面平移(piston)误差,另一种是光瞳面倾斜(tilt)误差,这两种误差均属于光束耦合误差^[8~10]。美国的 David Miller 和韩国的 Soon-Jo Chung 合作研究加工了 Golay3 型望远镜阵列^[11,12],并给出了这两种光束耦合误差容限。本文同时考虑了所有子望远镜的 piston 误差和 tilt 误差,建立了最为常用和可能的正态分布模型,根据中心点亮度判据设计了计算 piston 误差和 tilt 误差所允许的最大标准差算法,进而讨论了 piston 误差和 tilt 误差所允许的最大标准差与子望远镜个数和遮光比的关系。计算结果表明,得到的光束耦合误差容限与文献^[11,12]的结果相吻合。

由于中心点亮度为一相对值,不能反映望远镜阵列对光能的绝对收集能力,为便于讨论和分析,本文假定望远镜阵列的工作 F 数能够使得像面光能满足探测器的感光要求。

2 衍射受限的共相位望远镜阵列的成像原理

共相位望远镜阵列的子望远镜多为同轴反射结构,具有一定的中心遮拦。因此共相位望远镜阵列的出瞳多由若干个圆环状子出瞳组成。设子出瞳外半径为 a ,所有子出瞳的外接圆半径为 r ,遮光比为 $\epsilon^2, 0 < \epsilon < 1$,第 n 个圆环中心坐标为 (x_n, y_n) 。则共相位望远镜阵列的光瞳函数为

$$P(x, y) = \sum_{n=1}^N \left[\text{circ} \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{a} \right) - \text{circ} \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\epsilon a} \right) \right] \times \delta(x - x_n, y - y_n), \quad (1)$$

式中 $\delta(x - x_n, y - y_n)$ 为位于 (x_n, y_n) 的脉冲函数。共相位望远镜阵列的点扩展函数(PSF)可由光瞳函数的傅里叶变换并取模方得到^[13]

$$h_I(x_i, y_i) = \left| F \{ P(x, y) \}_{\xi=x_i/(\lambda f), \eta=y_i/(\lambda f)} \right|^2 \times \left| \sum_{n=1}^N \left[\frac{a J_1(2\pi a \sqrt{\xi^2 + \eta^2})}{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} - \frac{\epsilon a J_1(2\pi \epsilon a \sqrt{\xi^2 + \eta^2})}{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \right] \exp[-j2\pi(\xi x_n + \eta y_n)] \right|^2, \quad (2)$$

式中 (x_i, y_i) 为像面坐标, λ 为望远镜阵列的工作波长, f 为共相位望远镜阵列的焦距, J_1 为 1 阶第一类贝塞尔函数。

设物体的几何光学理想像光强为 $f(x_i, y_i)$, 经共相位望远镜阵列所成的实际像光强为 $g(x_i, y_i)$, 则

$$g(x_i, y_i) = f(x_i, y_i) * h_I(x_i, y_i), \quad (3)$$

由(3)式可知,由于不同共相位望远镜阵列具有不同

的点扩展函数,相同物体经不同共相位望远镜阵列所成的像也不同,因此点扩展函数和基于点扩展函数的判据可以衡量共相位望远镜阵列的成像性能。

图 1 表示遮光比 $\epsilon^2 = 0.25$ 、子出瞳外半径与所有子出瞳外接圆半径之比 $a : r = 1 : 5$ 时 Y4, Cornwell5 和 Golay6 结构的共相位望远镜阵列对应的光瞳结构和点扩展函数。

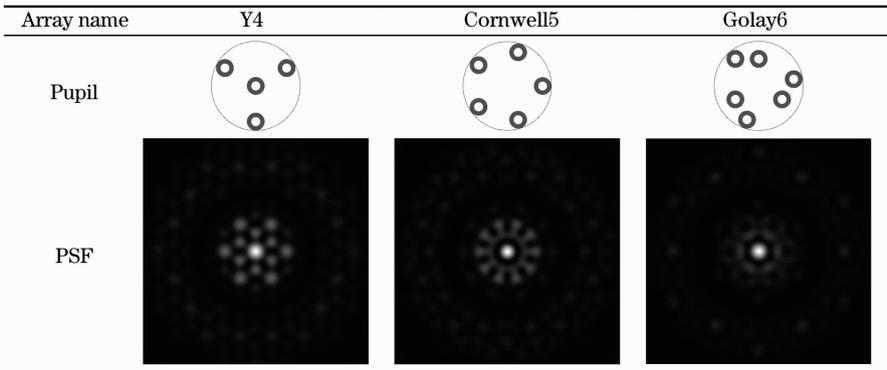


图 1 Y4、Cornwell5 和 Golay6 共相位望远镜阵列的光瞳结构和点扩展函数

Fig. 1 Pupil function and PSF of Y4, Cornwell5 and Golay6 phased telescope arrays

3 平均值为零的正态分布的 piston 误差所允许的最大标准差

由于自身和周围环境的影响^[14],子望远镜往往存在随时间快速变化的 piston 误差 $\varphi_n(t)$,对应的波像差为

$$W_{npiston}(x, y, t) = \varphi_n(t). \quad (4)$$

一般而言, $\varphi_n(t)$ 服从概率分布。当影响 piston 误差

的因素较多时, $\varphi_n(t)$ 服从正态分布。设各子望远镜的 piston 误差相互独立并且平权,则各 piston 误差服从相同的正态分布,即: $\varphi_n(t) \sim N(0, \sigma_p)$, 其中 σ_p 为 piston 误差的标准差。

受 piston 误差影响的共相位望远镜阵列的广义光瞳函数为

$$P_{piston}(x, y, t) = \sum_{n=1}^N \left[\text{circ}\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{a}\right) - \text{circ}\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\epsilon a}\right) \right] \exp\left[j \frac{2\pi}{\lambda} \varphi_n(t)\right] \times \delta(x - x_n, y - y_n). \quad (5)$$

点扩展函数为

$$h_{Ipiston}(x_i, y_i, t) = \left| \sum_{n=1}^N \left[\frac{a J_1(2\pi a \sqrt{\xi^2 + \eta^2})}{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} - \frac{\epsilon a J_1(2\pi \epsilon a \sqrt{\xi^2 + \eta^2})}{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \right] \times \exp\left\{-j2\pi \left[\xi x_n + \eta y_n - \frac{\varphi_n(t)}{\lambda}\right]\right\} \right|^2. \quad (6)$$

用中心点亮度评价 piston 误差对共相位望远镜阵列成像性能的影响,其定义为

$S_{Dpiston} =$

$$\frac{h_{Ipiston}(0, 0)}{h_I(0, 0)} = \frac{1}{N^2} \left| \sum_{n=1}^N \exp\left(j2\pi \frac{\varphi_n(t)}{\lambda}\right) \right|^2. \quad (7)$$

斯特涅尔指出,当 $S_D(\lambda) \geq 0.81$ 时,光学系统被认为是完善的,该评价标准称为斯特涅尔判据,也称为中心点亮度判据。

为使受 piston 误差影响的中心点亮度的统计平均值满足中心点亮度判据,需要确定 piston 误差的标准差 σ_p 的最大值 σ_{pmax} 。计算 σ_{pmax} 值的过程可由以下算法实现:

1) 给出 piston 误差的标准差 σ_p 接近于 0 的初始值;

2) 根据 σ_p 得到 piston 误差 $\varphi_n(t)$ 的概率分布,生成 $\varphi_n(t)$ 的随机值,并计算 $S_{Dpiston}$;

3) 多次重复步骤 2), 并计算 $S_{Dpiston}$ 的平均值 $\bar{S}_{Dpiston}$, 本文重复了 500 次;

4) 如果 $\bar{S}_{Dpiston} > 0.81$, 则令 σ_p 增加一小量 $\Delta\sigma_p$, 并转步骤 2), 否则转步骤 5);

5) 输出 σ_p , 此时 $\sigma_{pmax} = \sigma_p$ 。

表 1 给出了子望远镜个数 $N=2\sim 9$ 时共相位望远镜阵列的 piston 误差的最大标准差 σ_{pmax} 的值。

表 1 不同子望远镜个数下 piston 误差所允许的最大标准差

Table 1 Permitted maximal standard deviations of piston error for different numbers of sub-telescopes

N	2	3	4	5	6	7	8	9
σ_{pmax}/λ	0.108	0.092	0.089	0.082	0.081	0.081	0.080	0.080

由表 1 中 piston 误差的最大标准差 σ_{pmax} 的值可以看出,望远镜阵列所允许的 piston 误差值非常小,需要高精密的伺服系统来控制^[15]。为验证表 1 中的数据,以遮光比 $\epsilon^2=0.25$ 、子出瞳外半径与所有子出瞳外接圆半径之比 $a:r=1:5$ 的 Y4、Cornwell5 和 Golay6 结构的共相位望远镜阵列为例给出了受 piston 误差影响的点扩散函数,如图 2 所示。3 个阵列 piston 误差的标准差均取最大值 σ_{pmax} , 根据表 1, 其值分别为 0.089λ 、 0.082λ 和 0.081λ , 图中是 10 次计算的平均结果。

比较图 1 和图 2 可知,受 piston 误差影响,上述 3 个阵列的点扩展函数的中心点亮度有所降低,形

状也有所变化;但由于 piston 误差的标准差未超过中心点亮度判据所允许的最大标准差,因此点扩展函数的变化在可接受的范围内。由于计算次数较少,图中 3 个阵列的中心点亮度与 0.81 有所偏差,其值分别为 0.805、0.809 和 0.803。

4 平均值为零的正态分布的 tilt 误差所允许的最大标准差

除 piston 误差外,子望远镜往往还会存在随时间快速变化的 tilt 误差 $\theta_{nx}(t)$ 和 $\theta_{ny}(t)$, 对应波像差函数可以表示为

$$W_{ntilt}(x, y, t) = x \tan \theta_{nx}(t) + y \tan \theta_{ny}(t), \quad (8)$$

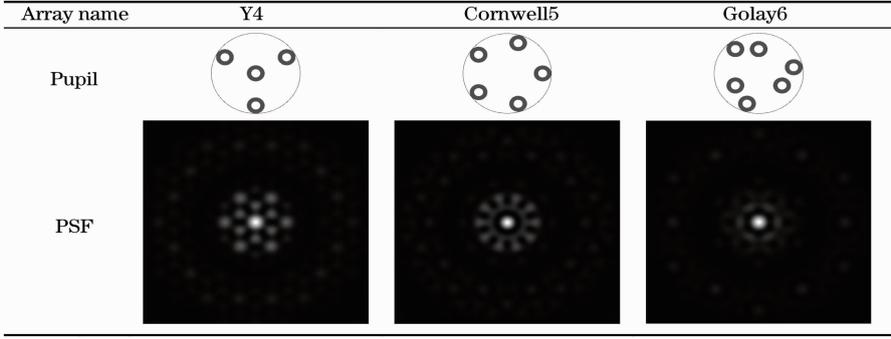


图 2 受 piston 误差影响的 Y4、Cornwell5 和 Golay6 共相位望远镜阵列的点扩展函数, piston 误差的标准差分别为 0.089λ 、 0.082λ 和 0.081λ

Fig. 2 PSF of Y4, Cornwell5 and Golay6 phased telescope arrays affected by piston error, the standard deviations of piston errors are 0.089λ , 0.082λ and 0.081λ , respectively

式中 $\theta_{nx}(t)$ 和 $\theta_{ny}(t)$ 分别为 t 时刻第 n 个子出瞳绕 x 轴和 y 轴的倾斜角度。

由于 $\theta_{nx}(t)$ 和 $\theta_{ny}(t)$ 很小, 有

$$W_{ntilt}(x, y, t) = x\theta_{nx}(t) + y\theta_{ny}(t). \quad (9)$$

受 tilt 误差影响的共相位望远镜阵列的广义光瞳函数为

$$P_{tilt}(x, y, t) = \sum_{n=1}^N \left[\text{circ}\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{a}\right) - \text{circ}\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\epsilon a}\right) \right] \exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda}W_{ntilt}(x, y, t)\right] \times \delta(x - x_n, y - y_n), \quad (10)$$

点扩展函数为

$$h_{I_{tilt}}(x, y, t) = \left| \sum_{n=1}^N \left\{ \left[\frac{aJ_1(2\pi a \sqrt{\xi^2 + \eta^2})}{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} - \frac{\epsilon a J_1(2\pi \epsilon a \sqrt{\xi^2 + \eta^2})}{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \right] \times \delta\left[\xi - \frac{\theta_{nx}(t)}{\lambda}, \eta - \frac{\theta_{ny}(t)}{\lambda}\right] \right\} \exp[-j2\pi(\xi x_n + \eta y_n)] \right|_{\xi=x_i/(\lambda f), \eta=y_i/(\lambda f)}^2. \quad (11)$$

仍用中心点亮度描述 tilt 误差对共相位望远镜阵列的影响

$$S_{D_{tilt}} = \frac{h_{I_{tilt}}(0, 0)}{h_I(0, 0)} = \frac{1}{N^2 \pi^2 a^4 (1 - \epsilon^2)^2} \left| \sum_{n=1}^N \left[\frac{aJ_1[2\pi a \rho]}{\rho} - \frac{\epsilon a J_1(2\pi \epsilon a \rho)}{\rho} \right] \right|_{\rho = \sqrt{\left(\frac{\tan\theta_{nx}}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\tan\theta_{ny}}{\lambda}\right)^2}}^2 = \frac{4}{N^2 \pi^2 (1 - \epsilon^2)^2} \left| \sum_{n=1}^N \left[\frac{J_1[\pi I_{PV_{tilt}}]}{I_{PV_{tilt}}} - \frac{\epsilon J_1(\pi \epsilon I_{PV_{tilt}})}{I_{PV_{tilt}}} \right] \right|^2, \quad (12)$$

式中 $I_{PV_{tilt}}$ 为 tilt 误差引起的波像差峰谷值, 可表示为

$$I_{PV_{tilt}} = \sqrt{\left[\frac{2a\theta_{nx}(t)}{\lambda}\right]^2 + \left[\frac{2a\theta_{ny}(t)}{\lambda}\right]^2}. \quad (13)$$

设各子望远镜的 tilt 误差相互独立且平权, 当影响 tilt 误差的因素较多时, 各子望远镜的 tilt 误差 $\theta_{nx}(t)$ 和 $\theta_{ny}(t)$ 服从相同的正态分布 $N(0, \sigma_t)$, 其中 σ_t 为 tilt 误差的标准差。为使 $S_{D_{tilt}}$ 的统计平均值满足中心点亮度判据, 可以用与计算 piston 误差的最大标准差 σ_{pmax} 类似的算法计算 tilt 误差最大标准差值 σ_{tmax} 。

表 2 共相位望远镜阵列的 tilt 误差所允许的最大标准差(表中数据已乘以 $2a/\lambda$)

Table 2 Permitted maximal standard deviation of tilt errors (multiplied by $2a/\lambda$)

	$N = 2$	$N = 3$	$N = 4$	$N = 5$	$N = 6$	$N = 7$	$N = 8$	$N = 9$
$\epsilon^2 = 0.00$	0.209	0.210	0.207	0.208	0.209	0.209	0.211	0.210
$\epsilon^2 = 0.05$	0.200	0.201	0.205	0.203	0.205	0.203	0.204	0.203
$\epsilon^2 = 0.10$	0.200	0.200	0.198	0.199	0.197	0.200	0.199	0.198
$\epsilon^2 = 0.15$	0.194	0.194	0.193	0.193	0.196	0.192	0.194	0.194
$\epsilon^2 = 0.20$	0.191	0.189	0.188	0.188	0.188	0.189	0.190	0.189
$\epsilon^2 = 0.25$	0.185	0.188	0.187	0.184	0.188	0.184	0.186	0.186

	$N = 2$	$N = 3$	$N = 4$	$N = 5$	$N = 6$	$N = 7$	$N = 8$	$N = 9$
$\epsilon^2 = 0.30$	0.182	0.182	0.182	0.182	0.182	0.181	0.182	0.183
$\epsilon^2 = 0.35$	0.179	0.177	0.179	0.179	0.180	0.178	0.177	0.180
$\epsilon^2 = 0.40$	0.175	0.174	0.175	0.174	0.174	0.176	0.176	0.177

表 2 为子望远镜个数 $N=2\sim 9$ 、 $\epsilon^2=0\sim 0.4$ 时,共相位望远镜阵列的 $2a\sigma_{\text{tilt}}/\lambda$ 值。将表 2 中数据画成曲线,如图 3 所示。

由表 2 和图 3 可知,随子望远镜个数不断增加,tilt 误差所允许的的最大标准差在小范围内无规则变化,因此其值与子望远镜个数的相关性不大;随着子望远镜遮光比不断增加,tilt 误差所允许的的最大标准差不断减小,在 $0.17\lambda/2a\sim 0.21\lambda/2a$ 之间。

图 4 仍以遮光比 $\epsilon^2=0.25$ 、子出瞳外半径与所有子出瞳外接圆半径之比 $a:r=1:5$ 的 Y4、Cornwell5 和 Golay6 结构的共相位望远镜阵列为例,给出受 tilt 误差影响的点扩展函数。3 个阵列的标准差均取最大值,根据表 2,其值应分别为 $0.187\lambda/2a$ 、 $0.184\lambda/2a$ 和 $0.188\lambda/2a$ 。为获得较稳

定的点扩展函数,进行了 10 次计算并取平均。

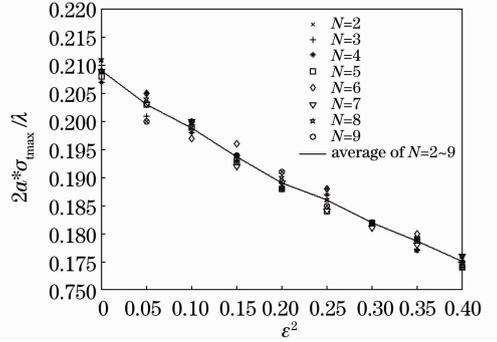


图 3 共相位望远镜阵列零均值正态分布的 tilt 误差所允许的的最大标准差与子望远镜个数和遮光比的关系
Fig. 3 Permitted maximal standard deviations of tilt errors with different numbers and obscuration ratios of sub-telescopes

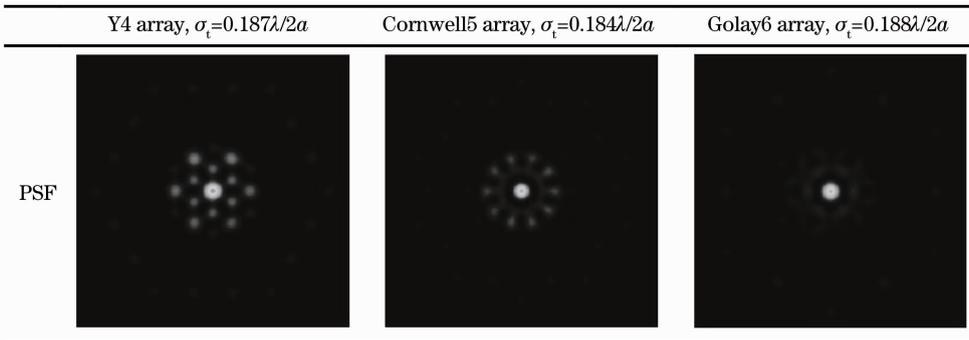


图 4 受 tilt 误差影响的 Y4、Cornwell5 和 Golay6 望远镜阵列的点扩展函数,tilt 误差的标准差分别为 $0.187\lambda/2a$ 、 $0.184\lambda/2a$ 和 $0.188\lambda/2a$

Fig. 4 PSF of Y4, Cornwell5 and Golay6 phased telescope arrays affected by tilt error, the standard deviations of tilt errors are $0.187\lambda/2a$, $0.184\lambda/2a$ and $0.188\lambda/2a$, respectively

比较图 1 和图 4 可知,受 tilt 误差影响,上述 3 个阵列的点扩展函数中心点亮度有所降低;但由于 tilt 误差的标准差未超过中心点亮度判据所允许的最大标准差,因此中心点亮度的变化在可接受的范围内。由于计算次数较少,图中 3 个阵列的中心点亮度与 0.81 有所偏差,其值分别为 0.813、0.807 和 0.804。

5 计算实例

图 5 是 Cornwell5 型望远镜阵列的一个例子,其工作 F 数为 11.7,全视场为 0.0471° 。子出瞳外半径 a 为 0.39 m,遮光比 ϵ^2 为 0.0517,所有子出瞳外接圆半径 r 为 1.09 m, $a:r=1:2.8$ 。

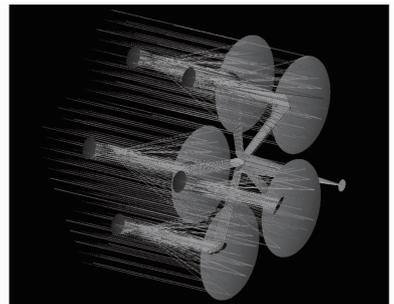


图 5 Cornwell5 望远镜阵列,工作 F 数为 11.7
Fig. 5 Cornwell5 phased telescope array, with F number equaling to 11.7

设此望远镜阵列的工作波长为 550 nm,对应 piston 误差的最大标准差仅为 45 nm,tilt 误差的最

大标准差仅为 1.43×10^{-7} rad。

6 结 论

根据中心点亮度判据研究计算了服从平均值为零的正态分布的 piston 误差和 tilt 误差所允许的最大标准差。计算结果表明, piston 误差的最大标准差不超过 0.11λ , tilt 误差的最大标准差不超过 $0.21\lambda/2a$, a 为子望远镜的出瞳外半径。研究表明共相位望远镜阵列对 piston 和 tilt 误差的要求是非常严格的, 往往需要高精度的伺服系统来控制各元件, 以保证进入光束耦合器的各光束的 piston 误差和 tilt 误差的最大标准差满足要求。

参 考 文 献

- 1 D. F. Robert, A. T. Theodore, R. C. Jason *et al.*. Image quality of sparse-aperture designs for remote sensing[J]. *Opt. Eng.*, 2002, **41**(8): 1957~1969
- 2 Nicholas J. Miller, Matthew P. Dierking, Bradley D. Duncan. Optical sparse aperture imaging[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(23): 5933~5943
- 3 Soon-Jo Chung, David W. Miller, Olivier L. de Weck. ARGOS testbed: study of multi-disciplinary challenges of future spaceborne interferometric arrays[J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(9): 2156~2167
- 4 D. B. De Young, J. D. Dillow, S. P. Corcoran *et al.*. Ground demonstration of an optical control system for a space-based sparse-aperture telescope[C]. *SPIE*, 1998, **1156**: 1156~1167
- 5 Wu Quanying, Qian Lin, Shen Weimin. Research on pupil configuration of dual three sub apertures sparse-aperture system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 187~192
吴泉英, 钱霖, 沈伟民. 复合三子镜稀疏孔径光瞳结构的研究 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 187~192
- 6 Wu Quanying, Qian Lin. Pupil configuration of quasi-Golay6 sparse-aperture[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(7): 1453~1459
吴泉英, 钱霖. 类 Golay6 稀疏孔径结构[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(7): 1453~1459
- 7 He Yuntao, Jiang Yuesong, Zhang Yuedong *et al.*. Spatial resolution of passive synthetic aperture photonic imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2130~2135
何云涛, 江月松, 张跃东等. 被动综合孔径光子成像空间分辨率分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2130~2135
- 8 P. Wizinowich, B. McLeod, M. Lloyd-Hart. Adaptive optics for array telescopes using piston-and-tilt wave-front sensing [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(28): 6036~6046
- 9 R. R. Butts. The effects of piston and tilt errors on the performance of multimirror telescopes [R]. U. S. Air force Weapons Laboratory, Kirtland Air Force Base, New Mexico, 1992
- 10 Matthew R. Bolcar, James R. Fienup. Method of phase diversity in multi-aperture systems utilizing individual sub-aperture control [C]. *SPIE*, 2005, **5896**: 126~133
- 11 Soon-Jo Chung. Design, Implementation and Control of a Sparse Aperture Imaging Satellite [D]. Forea, Aerospace Engineering Korea Advanced Institute of Science and Technology, 1998
- 12 Soon-Jo Chung, David W. Miller. Design, implementation and operation of a sparse aperture imaging satellite testbed[C]. 16th Annual/USU Conference on Small Satellites, Logan, Utah, August, 2002
- 13 Lü Naiguang. Fourier Optics [M]. Beijing: China Machine Press, 2007. 156
吕乃光. 傅里叶光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007. 156
- 14 Tang Guomao, He Yumei, Liao Zhou. Radial hartmann method for measuring large optical system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 795~799
汤国茂, 何玉梅, 廖周. 大型光学系统径向哈特曼像质检测方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 795~799
- 15 Yang Ruofu, Yang Ping, Shen Feng. Experimental investigation of laser coherent combing based on active segmented mirror[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 424~427
杨若夫, 杨平, 沈锋. 基于能动反射镜的激光相干合成实验研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 424~427

栏目编辑: 殷建芳