

文章编号 1004-924X(2011)09-1999-07

空间合成孔径成像光学系统的光瞳对称性

王忠生^{1,2*}, 张学军¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:从对称性的角度分析比较了几种常见光学系统结构对非相干成像的影响。首先,采用了二维点扩散函数和二维空间调制传递函数分析评价复杂光瞳光学系统,通过理论分析得出复杂光瞳分布的对称性影响着点扩散函数和调制传递函数的对称性的结论。最后,利用二维评价手段,针对几种常见的合成孔径光学系统结构, Golay3、Golay4、JWST 和 Giant Magellan Telescope,的光瞳分布,通过光学设计软件 Zemax 和 Matlab 综合给出它们实际的二维点扩散函数和二维调制传递函数,并结合 MTF 的空间分布特性对光瞳分布的对称性进行了对比。对比结果表明,近期的 JWST 和 GMT 合成孔径光学系统分别具有 30 个和 9 个 MTF 对称轴,明显多于早期的 Golay3 系统的 3 个 MTF 对称轴,其 MTF 的分布也更加合理。因此,对于复杂光瞳非相干成像光学系统而言,好的光瞳分布对称性具有更好的空间成像特性。

关键词:合成孔径;光学成像系统;非相干成像;复杂光瞳;对称性

中图分类号:TH743;P111.21 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111909.1999

Symmetry of pupil in spatial synthetic aperture imaging optical system

WANG ZHong-sheng^{1,2*}, ZHANG Xue-jun¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

* Corresponding author, E-mail: ciompwzs@gmail.com

Abstract: On the basis of symmetry of optical systems, the effects of several kinds of complex pupil constructions on an incoherent synthetic aperture imaging optical system were analyzed and compared. Firstly, the two-dimensional Point Spread Function (PSF) and two-dimensional Modulation Transfer Function (MTF) were used to analyze the complex pupil optical system, and it is concluded that the symmetry of complex pupil distribution has effects on the symmetries of PSF and MTF. Then, for practical pupil distribution, the two-dimensional PSFs and MTFs of the common synthetic aperture optical systems as follows, Golay3, Golay4, JWST and GMT, were given by optical design software Zemax and Matlab, and the symmetry of the systems was compared by combining the spatial distribution of MTF. Obtained results indicate that JWST and GMT synthetic aperture systems developed recently show 30 and 9 MTF symmetric axes, respectively, which is obvious higher than 3 MTF sym-

收稿日期:2010-10-27;修订日期:2011-01-29.

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(No. 61036015)

metric axis of a common Golay3 construction. Moreover, their MTF distribution is more reasonable. These results demonstrate that the good symmetry of pupil distribution has a better imaging for the incoherent imaging optical system with a complex pupil.

Key words: synthetic aperture; optical imaging system; incoherent imaging; complex pupil; symmetry

1 引言

小卫星、天基检测技术的发展加速了对空间高分辨力光学系统的要求,目前,高分辨力成像光学系统已成为空间光学领域的制高点。角分辨率的极限为 $1.22\lambda/D$,这表明大口径的光学系统才会有高的角分辨率。近年来,美欧许多国家都致力于更大口径的天基和地基空间探测光学系统的研究,大口径光学望远镜已成为望远镜的发展趋势^[1-4]。目前单个大口径光学系统的代表是美国的哈勃望远镜,其角分辨率为 $0.07''$,主镜直径为 2.4 m ,总质量为 11.5 t ,已接近目前美国飞行器的空间运载能力极限。按经验和统计规律,望远镜系统的制造成本与口径的 2.76 次方成正比,同时体积和质量的增加也增大了研制和发射的成本。

为了使用小孔径合成系统来获得大口径的分辨率,人们提出了光学合成孔径成像技术,由此来降低光学元件的加工难度,满足光学系统的轻量化,折叠式设计要求,并降低发射体积和重量,从而节约发射费用。新一代太空望远镜的代表 JWST 主镜就是由 18 片六边形子镜片组成中心遮拦的六边形结构,其大镜片主镜达到 25 m^2 ,采用折叠发射,重约 6.2 t ,分辨率比哈勃高 6 倍,能够探测到亮度很低的天体,是哈勃的 $1/400$,计划于 2013 年升空。目前光学合成孔径技术在天基和地基望远镜上应用得已经越来越多,但在对地观测光学系统中仍处于试验尝试阶段^[5-9]。

为了进一步提高合成孔径光学成像系统的性能,本文针对光学波段合成孔径由于离散光瞳分布失去了圆对称性的问题,从对称性的角度分析比较了几种常见光学系统结构对非相干成像的影响,并对得到的结果进行了分析和讨论,最后提出

好的光瞳分布对称性将是合成孔径光学成像系统的发展趋势。

2 非相干成像原理

在考虑点光源成像时,像的结构属于出射光瞳的夫琅和费衍射图样^[10]。

设衍射图振幅(点像)为 $f(u, v)$,即光学系统的振幅点扩散函数,则 $f(u, v)$ 为

$$f(u, v) = \frac{A}{\lambda z_i} \iint P(x, y) \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda z_i}(ux + vy)\right\} dx dy, \quad (1)$$

式中 $P(x, y)$ 为光瞳函数, z_i 为出射光瞳至像面距离, A 是常数。

非相干指物体各单元发射的振动是相互独立的、完全不相干的。因为物体所有点都是不相干的,所以为了得到扩展物体的像,必须求出衍射斑点的强度之和。

衍射图强度(点像)为:

$$I(u, v) = |f(u, v)|^2 = ff^*. \quad (2)$$

设物体几何像中的强度分布为 $O(u, v)$,扩展物体像中的强度分布为 $E(u, v)$,则

$$E(u, v) = \iint O(u_1, v_1) I(u - u_1, v - v_1) du_1 dv_1. \quad (3)$$

积分扩展到物体几何像的照射区,强度由函数 O 和 I 的卷积表示。

非相干截止频率为^[11]:

$$\frac{1}{\lambda f \#} (\text{c/mm}). \quad (4)$$

3 复杂光瞳的成像评价

设定复杂光瞳的子孔径单元相同且关于 x, y 对称,则光瞳函数为

$$P(x, y) = \sum_{n=1}^N p_n(x - x_n, y - y_n) = p(x, y) * \sum_{n=1}^N \delta(x - x_n, y - y_n), \quad (5)$$

非相干成像系统对强度是线性的,衡量非相干成像系统使用光学传递函数(OTF),对于复杂光瞳来说,参照式(1)和式(2)得出复杂光瞳的强度点扩散函数为:

$$MTF = MTF_0 + \frac{1}{N}MTF_0 * \sum_n \sum_m \delta(\xi - \frac{x_n - x_m}{\lambda z_i}, \eta - \frac{y_n - y_m}{\lambda z_i}), \quad (7)$$

其中 MTF_0 为子孔径单元的调制传递函数, $(x_n - x_m, y_n - y_m)$ 表示子孔径相对位置。从式(7)看出光瞳的非连续分布影响到了传递函数的对称性分布。

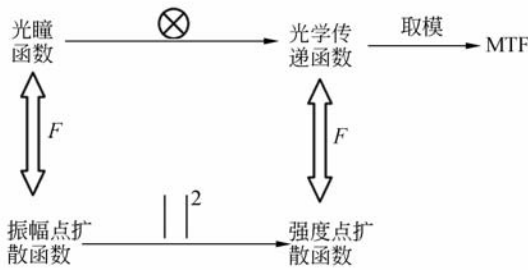


图1 函数间变换关系^[12]

Fig.1 Transfer relation between functions

4 复杂光瞳实例分析

由于光瞳分布的复杂性,以及 Golay 阵列的非冗余自相关特性^[13],选取典型的 Golay3, Golay4, JWST 和 GMT 进行分析。

4.1 光瞳分布的理论分析

4.1.1 Golay3 分布

如图2, Golay3 的子孔径中心为等边三角形分布,光瞳分布具有3个镜像对称轴,由式(7)得 Golay3 的 MTF 为:

$$MTF_0 + \frac{1}{3}MTF_0 * [\delta(\xi \pm \frac{d}{\lambda z_i}, \eta) + \delta(\xi \pm \frac{d}{2\lambda z_i}, \eta - \frac{\sqrt{3}d}{2\lambda z_i}) + \delta(\xi \pm \frac{d}{\lambda z_i}, \eta + \frac{\sqrt{3}d}{2\lambda z_i})]$$

$$MTF_0 + \frac{1}{4}MTF_0 * [\delta(\xi, \eta \pm \frac{d}{\lambda z_i}) + \delta(\xi \pm \frac{\sqrt{3}d}{2\lambda z_i}, \eta - \frac{d}{2\lambda z_i}) + \delta(\xi \pm \frac{\sqrt{3}d}{2\lambda z_i}, \eta + \frac{d}{2\lambda z_i}) + \delta(\xi \pm \frac{\sqrt{3}d}{\lambda z_i}, \eta) + \delta(\xi \pm \frac{\sqrt{3}d}{2\lambda z_i}, \eta - \frac{3d}{2\lambda z_i}) + \delta(\xi \pm \frac{\sqrt{3}d}{2\lambda z_i}, \eta + \frac{d}{2\lambda z_i})]$$

$$PSF = \left| f(u, v) \cdot \sum_{n=1}^N e^{jk(ux_n + vy_n)} \right|^2. \quad (6)$$

光瞳函数与传递函数的变换关系如图1所示,由自相关归一化得到复杂光瞳的调制传递函数:

其 MTF 分布具有3个镜像对称长轴。

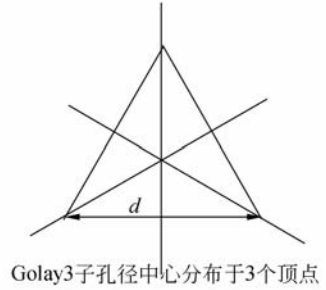


图2 Golay3 子孔径中心分布

Fig.2 Centroid distribution of sub-aperture for Golay3 pupil

4.1.2 Golay4 分布

如图3, Golay4 的子孔径中心为等边三角形

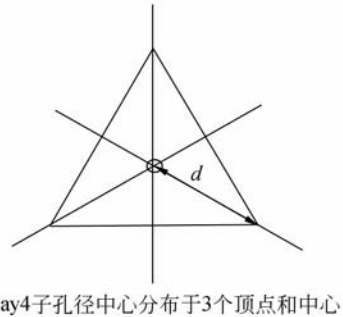


图3 Golay4 子孔径中心分布

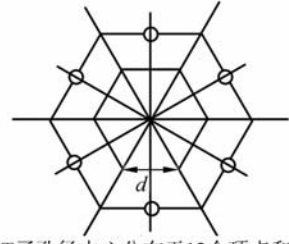
Fig.3 Centroid distribution of sub-aperture for Golay4 pupil

分布,光瞳分布有3个镜像对称轴,得 Golay4 的 MTF 为:

其 MTF 分布具有 3 个镜像对称长轴和 3 个镜像对称短轴。

4.1.3 JWST 分布

如图 4, JWST 的子孔径中心为双环六边形分布, 光瞳分布具有 3 个镜像对称长轴和 3 个镜像对称次长轴:



JWST子孔径中心分布于12个顶点和外环上6点

图 4 JWST 子孔径中心分布

Fig. 4 Sub-aperture centroid distribution of JWST pupil

得 JWST 的 MTF 为:

$$\begin{aligned}
 MTF_0 + \frac{1}{18} MTF_0 * [& 12\delta(\xi, \eta \pm \frac{d}{\lambda z_i}) + 12\delta(\xi \pm \frac{\sqrt{3}d}{2\lambda z_i}, \eta \pm \frac{d}{2\lambda z_i}) + 12\delta(\xi - \frac{\sqrt{3}d}{2\lambda z_i}, \eta \pm \frac{d}{2\lambda z_i}) + \\
 & 8\delta(\xi \pm \frac{\sqrt{3}d}{\lambda z_i}, \eta) + 8\delta(\xi \pm \frac{\sqrt{3}d}{2\lambda z_i}, \eta \pm \frac{3d}{2\lambda z_i}) + 8\delta(\xi - \frac{\sqrt{3}d}{2\lambda z_i}, \eta \pm \frac{3d}{2\lambda z_i}) + 7\delta(\xi, \eta \pm \frac{2d}{\lambda z_i}) + \\
 & 7\delta(\xi - \frac{\sqrt{3}d}{\lambda z_i}, \eta \pm \frac{d}{\lambda z_i}) + 7\delta(\xi + \frac{\sqrt{3}d}{\lambda z_i}, \eta \pm \frac{d}{\lambda z_i}) + 6\delta(\xi + \frac{3\sqrt{3}d}{2\lambda z_i}, \eta \pm \frac{d}{2\lambda z_i}) + 6\delta(\xi - \frac{\sqrt{3}d}{\lambda z_i}, \eta \pm \frac{2d}{\lambda z_i}) + \\
 & 6\delta(\xi + \frac{\sqrt{3}d}{\lambda z_i}, \eta \pm \frac{2d}{\lambda z_i}) + 6\delta(\xi - \frac{3\sqrt{3}d}{2\lambda z_i}, \eta \pm \frac{d}{2\lambda z_i}) + 6\delta(\xi + \frac{\sqrt{3}d}{2\lambda z_i}, \eta \pm \frac{5d}{2\lambda z_i}) + 6\delta(\xi - \frac{\sqrt{3}d}{2\lambda z_i}, \eta \pm \frac{5d}{2\lambda z_i}) + \\
 & 4\delta(\xi + \frac{3\sqrt{3}d}{2\lambda z_i}, \eta \pm \frac{3d}{2\lambda z_i}) + 4\delta(\xi - \frac{3\sqrt{3}d}{2\lambda z_i}, \eta \pm \frac{3d}{2\lambda z_i}) + 4\delta(\xi, \eta \pm \frac{3d}{\lambda z_i}) + \\
 & 3\delta(\xi + \frac{\sqrt{3}d}{\lambda z_i}, \eta \pm \frac{3d}{\lambda z_i}) + 3\delta(\xi - \frac{\sqrt{3}d}{\lambda z_i}, \eta \pm \frac{3d}{\lambda z_i}) + 3\delta(\xi \pm \frac{2\sqrt{3}d}{\lambda z_i}, \eta) + \\
 & 2\delta(\xi + \frac{2\sqrt{3}d}{\lambda z_i}, \eta \pm \frac{d}{\lambda z_i}) + 2\delta(\xi - \frac{2\sqrt{3}d}{2\lambda z_i}, \eta \pm \frac{d}{\lambda z_i}) + 2\delta(\xi + \frac{3\sqrt{3}d}{2\lambda z_i}, \eta \pm \frac{5d}{2\lambda z_i}) + \\
 & 2\delta(\xi - \frac{3\sqrt{3}d}{2\lambda z_i}, \eta \pm \frac{5d}{2\lambda z_i}) + 2\delta(\xi + \frac{\sqrt{3}d}{2\lambda z_i}, \eta \pm \frac{7d}{2\lambda z_i}) + 2\delta(\xi - \frac{\sqrt{3}d}{2\lambda z_i}, \eta \pm \frac{7d}{2\lambda z_i}) + \\
 & \delta(\xi + \frac{2\sqrt{3}d}{\lambda z_i}, \eta \pm \frac{2d}{\lambda z_i}) + \delta(\xi - \frac{2\sqrt{3}d}{\lambda z_i}, \eta \pm \frac{2d}{\lambda z_i}) + \delta(\xi + \eta \pm \frac{4d}{2\lambda z_i})]
 \end{aligned}$$

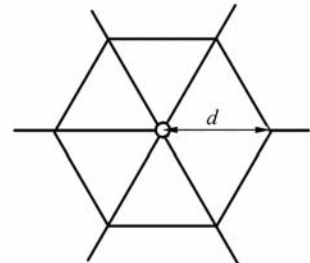
其 MTF 分布具有 8 组镜像对称轴。

4.1.4 GMT 分布

如图 5, GMT 的子孔径中心为(正六边形 + 质心)分布, 光瞳的分布具有 3 个镜像对称长轴和 3 个镜像对称次长轴, 得 GMT 的 MTF 为:

$$\begin{aligned}
 MTF_0 + \frac{1}{7} MTF_0 * [& 4\delta(\xi, \eta \pm \frac{d}{\lambda z_i}) + \\
 & 4\delta(\xi + \frac{\sqrt{3}d}{2\lambda z_i}, \eta \pm \frac{d}{2\lambda z_i}) + 4\delta(\xi - \frac{\sqrt{3}d}{2\lambda z_i}, \eta \pm \frac{d}{2\lambda z_i}) + \\
 & 2\delta(\xi \pm \frac{\sqrt{3}d}{\lambda z_i}, \eta) + 2\delta(\xi + \frac{\sqrt{3}d}{2\lambda z_i}, \eta \pm \frac{3d}{2\lambda z_i}) + \\
 & 2\delta(\xi - \frac{\sqrt{3}d}{2\lambda z_i}, \eta \pm \frac{3d}{2\lambda z_i}) + \delta(\xi, \eta \pm \frac{2d}{\lambda z_i}) + \delta(\xi - \frac{\sqrt{3}d}{\lambda z_i}, \\
 & \eta \pm \frac{d}{\lambda z_i}) + \delta(\xi + \frac{\sqrt{3}d}{\lambda z_i}, \eta \pm \frac{d}{\lambda z_i})]
 \end{aligned}$$

其 MTF 分布具有 3 组镜像对称轴。



GMT子孔径中心分布于6个顶点和中心

图 5 GMT 子孔径中心分布

Fig. 5 Sub-aperture centroid distribution of GMT pupil

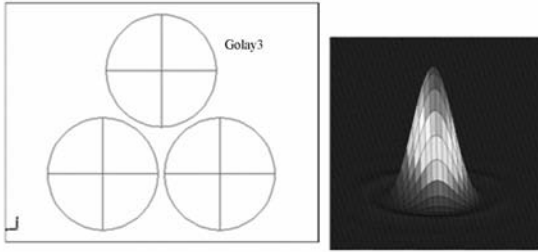
4.2 光瞳分布的仿真分析

为了验证上述的理论分析, 使用 Zemax 模拟

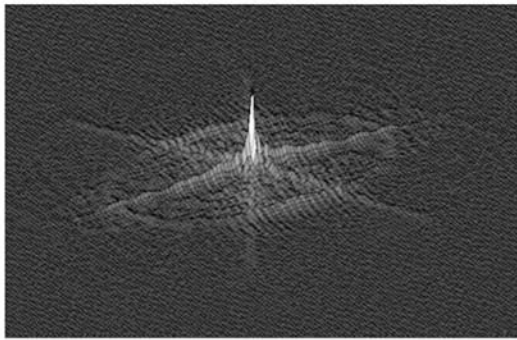
对应的光瞳输入,得到相应的 MTF 数据,经过 Matlab 的图形显示得到直观的 MTF 三维图。

4.2.1 Golay3 分布的对称性

如图 6, Golay3 的调制传递函数具有 3 个镜像对称轴,和光瞳的镜像对称分布相对应,点扩散函数次峰较高较少,分布比较稀疏。



(a)光瞳分布 (a)Distribution of pupil (b)点扩散函数 (b)PSF

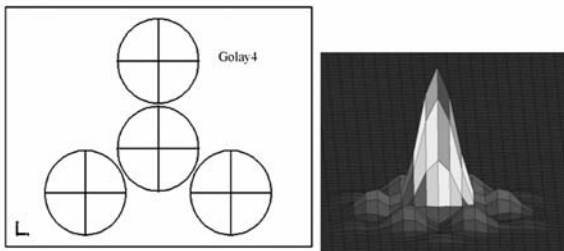


(c)调制传递函数 (c)MTF

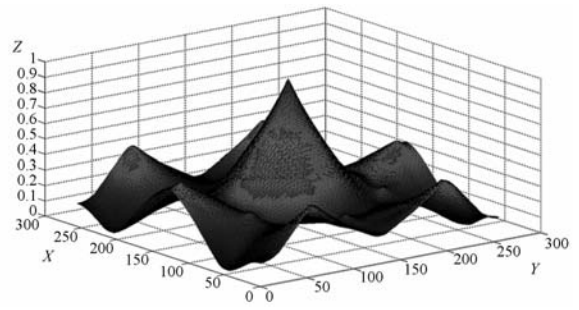
图 6 Golay3 相关特性 Fig. 6 Golay3 pupil

4.2.2 Golay4 分布的对称性

如图 7, Golay4 的调制传递函数具有 3 个镜像对称长轴和 3 个镜像对称短轴,和 Golay3 光瞳长轴的镜像对称性分布基本一致,点扩散函数次峰分布略优于 Golay3。



(a)光瞳分布 (a)Distribution of pupil (b)点扩散函数 (b)PSF

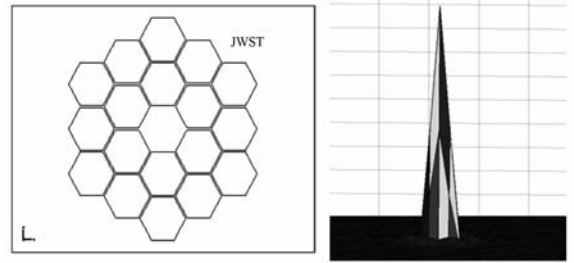


(c)调制传递函数 (c)MTF

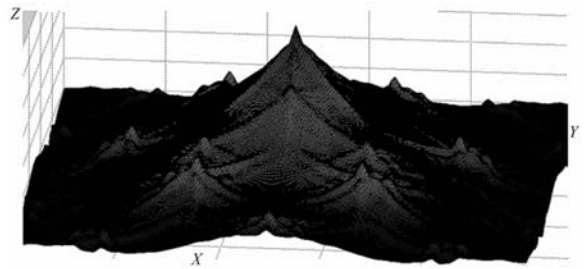
图 7 Golay4 相关特性 Fig. 7 Golay4 pupil

4.2.3 JWST 分布的对称性

如图 8, JWST 的调制传递函数具有 8 组镜像对称轴,共 30 个镜像对称轴,MTF 的空间分布均匀性明显优于 Golay3 和 Golay4。点扩散函数次峰强度较弱,分布也具有优势。



(a)光瞳分布 (a)Distribution of pupil (b)点扩散函数 (b)PSF



(c)调制传递函数 (c)MTF

图 8 JWST 相关特性 Fig. 8 JWST pupil

4.2.4 GMT 分布的对称性分析

如图 9, GMT 的调制传递函数具有 3 组镜像对称轴,包括 2 组长轴和 1 组短轴,共 9 个镜像对称轴,MTF 的空间分布均匀性明显优于 Golay3 和 Golay4。点扩散函数次峰强度较弱,分布也优于 Golay3。

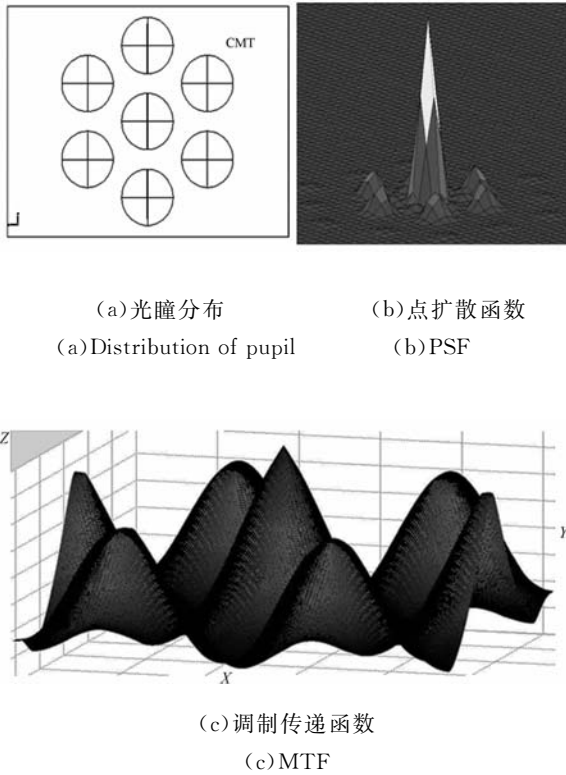


图 9 GMT 相关特性

Fig. 9 GMT pupil

5 结 论

在复杂光瞳非相干成像光学系统中,由于光瞳分布的不连续性和非圆周对称性,有必要采用二维空间调制传递函数对其进行分析评价,通过理论分析得出复杂光瞳分布的对称性对点扩散函数的分布对称性和调制传递函数的分布对称性的影响。对几种常见的合成孔径光学系统 Golay3 (3 个镜像对称轴)、Golay4 (3 个镜像对称轴)、JWST (6 个镜像对称轴) 和 Giant Magellan Telescope (6 个镜像对称轴) 的光瞳分布的分析表明,无论是天基的 JWST 还是地基的 GMT, MTF 的对称轴分别为 30 个和 9 个,均大大多于 Golay3、Golay4 结构的 3 个和 6 个对称轴 (3 长、3 短),越接近于传统的回转对称光学系统,其 MTF 的空间方向分布越均匀,PSF 的次峰分布也越加合理。与传统的回转对称单孔径光学系统相比,复杂光瞳非相干成像光学系统的镜像对称性代替回转对称性同样起着十分重要的作用,多对称轴、好的镜像对称性对于新一代复杂光瞳非相干成像光学系统非常重要。

参考文献:

- [1] NASREDDINE H J, CHAUX C, PERRIN G, *et al.*. Satellite image restoration in the context of a spatially varying point spread function[J]. *JOSA A*, 2010, 27 (6):1473-1481.
- [2] HYDE R A, DIXIT S N, WEISBERG A H. Eye-glass, a very large aperture diffractive space telescope[J]. *SPIE*, 2002, 4849:28-39.
- [3] BUCK J R, KRAUSE B W, MALM A, *et al.*. Synthetic aperture imaging at optical wavelengths [C]. *Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference*, OSA, 2009: PThB3.
- [4] BARAK K, JOSEPH R. Super-resolution in incoherent optical imaging using synthetic aperture with Fresnel elements[J]. *Optics Express*, 2010, 18 (2): 962-972.
- [5] CHUNG S, MILLER D W, DEWECK O L. ARGOS testbed: study of multidisciplinary challenges of future spaceborne interferometric arrays [J]. *SPIE Optical Engineering*, 2004, 43 (9): 2156-2167.
- [6] 乔彦峰, 刘坤, 段相永. 光学合成孔径成像技术及发展现状[J]. *中国光学与应用光学*, 2009, 02(3): 175-183.
QIAO Y F, LIU K, DUAN X Y. Optical synthetic aperture imaging techniques and development[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(3):175-183. (in Chinese)
- [7] 王长伟, 江月松, 刘丽, 等. 光学综合孔径成像技术实验研究[J]. *应用光学*, 2010, 31 (1):8-12.
WANG CH W, JIANG Y S, LIU L, *et al.*. Experimental study of optical synthetic aperture imaging technology [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(1) :8-12. (in Chinese)
- [8] LIU K, QIAO Y F, DUAN X Y. Optical remote imaging using fizeau synthetic aperture telescope[C]. *Lasers & Electro Optics & The Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2009:1-2.
- [9] 王大勇, 韩骥, 刘汉承, 等. 光学稀疏孔径系统的成像及其评价方法[J]. *光子学报*, 2008, 37(6): 1208-1212.
WANG D Y, HAN J, LIU H CH, *et al.*. Imaging

of optical sparse aperture systems and evaluate method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(6): 1208-1212. (in Chinese)

[10] M. 弗朗松. 衍射: 光学中的相干性[M]. 北京: 科学出版社, 1974.

FRANCON M. *Diffraction Coherence in Optics* [M]. Beijing: Science press, 1974. (in Chinese)

[11] 韩昌元. 信息光学基础理论及其应用[M]. 长春: 长春出版社, 1989.

HAN CH Y. *Basic Theory and Application of Information Optics*[M]. Changchun: ChangChun press, 1989.

[12] JOSEPH W. *Introduction to fourier optics*[M]. New York: Goodman McGraw-Hill, 1996.

[13] GOLAY M. Point arrays having compact non-redundant autocorrelations [J]. *JOSA*, 1971, 61: 272.

作者简介:



王忠生(1979—),男,黑龙江肇东人,博士,2001年于哈尔滨工程大学获得学士学位,2011年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事激光加工、合成孔径成像光学方面的研究。E-mail: ciompwzs@gmail.com

导师简介:



张学军(1968—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,中科院百人计划获得者,主要从事先进光学制造技术方面的研究。E-mail: zxj@ciomp.ac.cn

●下期预告

兼具高次谐波抑制的三镜偏振器

周洪军^{1*},王冠军²,郑津津²,霍同林¹

- (1. 中国科学技术大学 国家同步辐射实验室,安徽 合肥 230029;
2. 中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系,安徽 合肥 230027)

为了抑制长波段的高次谐波以及提高该波段光源的偏振特性,本文通过计算分析了三镜偏振器 Au₁Si₂Au₃ 的偏振特性以及其对长波段的高次谐波的抑制效果,并比较了 Au₁Si₂Au₃, Au₁SiC₂Au₃, Au₁Be₂Au₃ 的 3 种不同材料的偏振镜对高次谐波的抑制效果和对偏振度的提高。从计算分析来看 Au₁Si₂Au₃ 的三镜组合抑制镜对长波段的高次谐波抑制效果较好,且光源通过 Au₁Si₂Au₃ 三镜反射后, P 分量的反射率几乎为 0, 而 S 分量在 30eV 以后几乎全被抑制, 经过 Au₁Si₂Au₃ 三反射膜后不仅可以抑制 30 eV 以上波段的高次谐波, 而且在该波段光源的偏振性得到提高, 20 eV 时最高偏振度可达 99% 以上, 在极大地改善同步辐射光源的纯度的同时提高了光源的偏振度。