

非冗余孔径掩模技术在双星探测中的实验研究

王彦强^{1,2,3}, 吴桢^{1,2*}

¹中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042;

²中国科学院天文光学技术重点实验室, 江苏 南京 210042;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 利用地基大的光学望远镜获得衍射极限成像是许多天文观测的重要目的,受大气扰动限制的分辨率可以通过在望远镜瞳面添加非冗余孔径掩模、采用闭合相位技术来突破。介绍了非冗余孔径掩模技术的发展、原理以及应用;建立了将此技术应用于双星探测的数学模型,并进行了计算机模拟及实验研究。研究结果表明,通过对非冗余孔径掩模获得的干涉图的处理,获得闭合相位,以此对双星模型进行拟合,能够获得双星的对比度与角间距。

关键词 成像系统; 光干涉; 双星; 非冗余孔径掩模; 闭合相位

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.111101

Experimental Investigation of Non-Redundant Aperture Masking Technique in Binary-Star Detection

Wang Yanqiang^{1,2,3}, Wu Zhen^{1,2*}

¹National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China;

²Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract It is one of the main aims for the most astronomical observations to obtain the diffraction-limited images by the large ground-borne optical telescope. The limited resolution induced by the atmospheric fluctuation can be overcome by the addition of non-redundant aperture masks on the telescope pupils and the closure phase technique. The progress, principle and applications of non-redundant aperture masking technique are reviewed, and the mathematical model for the application of this technique into the binary-star detection is established. The computer simulation and the corresponding experimental investigation are conducted. The research results show that one can obtain the closure phase by processing the interferogram obtained from the non-redundant aperture masking and thus the binary-star contrast ratio and angular separation can be obtained by fitting algorithms.

Key words imaging systems; optical interference; binary stars; non-redundant aperture masking; closure phase

OCIS codes 110.3175; 120.3180; 070.4560

1 引言

受大气扰动的影响,利用地基大光学望远镜获得衍射极限成像是许多天文观测的重要目的。当前,当自适应光学在享受巨大成功时,其他非实时的、采用对探测数据进行后处理的技术,对于实现高角分辨率成像依然弥足珍贵。

非冗余孔径掩模技术(NRM)首先被用于克服大气扰动,获得衍射极限成像,采用的掩模孔径尺寸小于大气相干长度,采样时间短于大气相干时间。1987年, Haniff 等^[1]在 Lapalme 的 2.5 m Isaac Newton 望远镜的瞳面上安装了一个由 4 个一维排列的子孔径组成的掩模板,对双星 φ And 星进行了观测,获得的双星的角间距、位置角、星等差与文献

收稿日期: 2018-04-17; 修回日期: 2018-05-17; 录用日期: 2018-05-29

基金项目: 国家自然科学基金(11473047, 11190011)

* E-mail: zhenwu@niaot.ac.cn

已知数据一致。从 1990 年起,这一技术被用在 4.2 m 口径的 William Herschel 望远镜上,对三颗 M 超巨星 α Ori、 α Sco 和 α Her,以及 Mire 类型的 5 颗长周期变星 o Cet、R Leo、W Hya、x Cyg 和 R Cas 进行了多波段、持续数年的观测^[2-6],观测揭示了这些星亮度分布的非对称性。

大望远镜的发展带动了孔径掩模技术的兴起,发展的里程碑是 Tuthill 等^[7-11]将孔径掩模技术应用在 10 m 级的 Keck-I 望远镜上,安装在副镜上的孔径掩模分布也从一维增加到了二维,但未使用自适应光学系统。1996—2005 年,研究者们以前所未有的高角分辨率在近红外波段对年轻的恒星、碳星以及红巨星进行了成像和尺寸测量,也对 Mira 变星的光球直径进行了测量。除此之外,在近红外的观测利用瞬时二维傅里叶的映射能力,揭示了绕着垂死恒星的复杂光环,对绕着年轻恒星的自发光圆盘进行了初次成像,观测到了绕着布满灰尘的 Wolf-Rayets 的壮观的羽状物。这一时期该技术在 Keck-I 上的研究成果被综述在系列文档中。

当前,非冗余孔径掩模被安装在自适应光学的后面,由于自适应光学使得掩模子孔径的口径尺寸不受大气相干长度的限制,采样时间能够长于大气相干时间,因此这两种技术的结合同时具有干涉技术的高分辨能力以及自适应光学探测相对微弱目标的能力,能够以前所未有的细节探测到更微弱的目标。2006 年,首先在 Palomar 200 英寸(1 英寸 = 2.54 cm)的望远镜上,在自适应光学系统 PALAO 的后端安装了非冗余孔径掩模板。其对双星系统 G78-28 的轨道数据的拟合结果与视向速度法和 Keck 激光引导星自适应光学获得的数据相比,误差大大降低^[12]。随后该技术被用于大望远镜 Keck-II (Keck-II + Nirc2)^[13] 以及 VLT (VLTUT4 + CONICA)^[14-15]上。与 Keck-I 上仅采用非冗余孔径掩模技术相比,自适应光学允许较长的曝光时间,能够对微弱的目标进行探测,因而可对年轻恒星的低质量伴星、恒星和亚恒星的多样性等进行研究^[16-23]。近几年,采用此技术已经对 T Cha、HD142527、LkCa15 过渡盘进行了探测^[24-27]。在 Keck-II 和 LBT-I 上,利用该技术在过渡盘 LKCa15 内,第一次探测到了一颗正在形成的行星质量的伴星^[27-28]。对这个区域的探测能够使我们理解行星如何在它们的母盘里形成以及它们是如何影响周围物质的。

现有的地基 8 m 级的望远镜几乎都配备了非冗余孔径掩模设备。它已经成为在小角间距获得高

对比度成像探测的最成功的技术之一。但是由于受到大气扰动的影响,闭合振幅很难校正,仅能用闭合相位进行模型拟合。在空间,没有大气扰动的影响。空基观测既提供闭合相位,也提供闭合振幅,能够对扩展结构进行成像。空基望远镜 JWST 的 NIRISS 仪器上配置了 7 孔径的非冗余孔径掩模^[29-30],它将与高级自适应光学(ExAO)相结合,通过波长和角分辨率的独特结合,拓宽望远镜的科学观测,从而能够对活动星系核(AGN)的中心进行成像探测^[30]。

非冗余孔径掩模^[31]技术通过在望远镜的瞳面添加掩模,将望远镜转变成干涉阵,容易获得干涉条纹;合成孔径成像技术是将多个独立的采集器或者望远镜按照一定的方式排列成干涉阵。国内研究人员相继对合成孔径成像技术的基本理论^[32-37]、干涉阵的优化排列^[36-39]、共相误差检测^[40-45]、图像复原方法^[36-37,46-49]等展开了深入的探索和研究,并发展了样机,进行了实验研究^[33-37,43-45]。

将非冗余孔径技术用于双星观测,获得的闭合相位直接与双星参数相关。本文正是基于这种相关性。同时,通过拟合,获得了双星参数,无需采用合成孔径的图像复原技术;通过计算机模拟发展了自己的数据处理方法,并进行了实验验证。

2 非冗余孔径掩模术原理

在望远镜的瞳面上插入由多个子孔径组成的孔径掩模,如图 1 所示,将极端冗余的望远镜转变成了由多个子孔径组成的斐索干涉仪。把孔径掩模设计成每条基线都是唯一的,即每个空间频率由唯一的一对子孔径采样,这样的掩模叫非冗余孔径掩模。非冗余孔径掩模具有不寻常的点扩散函数(PSF)形式,它是子孔径产生的衍射图与成对子孔径(即一条基线)产生的干涉条纹的叠加,表现出多个尖锐的峰值。根据 Rayleigh 准则,单孔径望远镜的角分辨率是 $1.22\lambda/D$ (λ 是观测波长, D 是望远镜直径),而干涉条纹的角分辨率是 $\lambda/2B$ ^[14-15,29-30] (B 是掩模板上相距最远的两个子孔径间的距离)。

阐述非冗余孔径掩模技术原理最简单的方法是考虑光的波动属性。为了理想成像,入射星光必须完全相干,在整个孔径平面是平面波前。一个 8 m 级的望远镜,即使采用自适应光学系统也很难获得完美校正;采用孔径掩模,要求大大降低,只需在子孔径尺寸内保持平面波前。当子孔径直径小于大气相干长度时,对于非冗余孔径掩模,在闭合三角形上使用闭合相位可消除大气扰动以及仪器误差的影

响。也可直观理解成,为了创建非冗余阵,必须抛弃大部分瞳面面积,损失大部分信号,但是也消除了所有的大气噪声,使得信噪比显著增加。当观测是光子噪声受限时,对于微弱的目标,孔径掩模是不利的;然而在散斑占主导地位,当大气扰动和仪器缺陷限制了信噪比时,非冗余孔径掩模的作用却是明显的。

闭合相位^[11]的应用是非冗余孔径掩模技术的一个主要优点。如图 2 所示,设 3 个子孔径对 12、23、31 形成的干涉条纹的相位分别为 ϕ_{12} 、 ϕ_{23} 、 ϕ_{31} , 大气扰动等造成的 3 个子孔径的干涉条纹的相位误差分别为 α_1 、 α_2 、 α_3 , 则实际测量得到的三组条纹相位分别为 $\phi_{12} + \alpha_1 - \alpha_2$ 、 $\phi_{23} + \alpha_2 - \alpha_3$ 、 $\phi_{31} + \alpha_3 - \alpha_1$, 将其相加得到闭合相位 $\phi_{123} = \phi_{12} + \phi_{23} + \phi_{31}$, 因而产生了一个仅受到天文目标影响、对任何残留的光学相位差都具有稳健性的可观测量。闭合相位与可见度相结合,采用合成孔径技术能够复原目标成像^[46-49]。非冗余孔径掩模技术的另一个优点是采用傅里叶分析,包含在最高频率内的信息能够被提取出来,使得分辨率可达到 $\lambda/2D$ ^[14-15,29-30]。

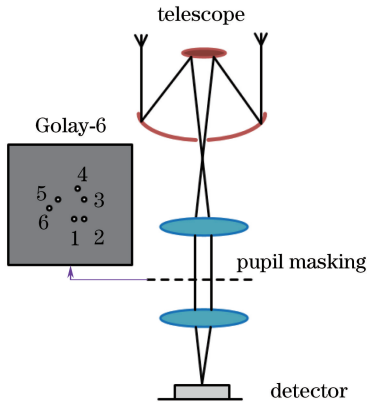


图 1 非冗余孔径掩模技术示意图
Fig. 1 Schematic of non-redundant aperture masking technique

3 数值模拟

在双星探测中,闭合相位不仅能够消除大气扰动对地基光学望远镜的影响,还与双星对比度、角间距存在函数关系。

测量闭合相位要求使用至少由三个子孔径组成的干涉阵。假设观测的双星在当前基线长度下无法分辨,在单个闭合三角形上获得的闭合相位 ϕ_{123} 可作为三条基线在天空的投影向量 $\{\mathbf{B}_{12}, \mathbf{B}_{23}, \mathbf{B}_{31}\}$ 、观测波长 λ 、双星对比度 ρ , 以及双星角距向量 Δ 的函数,表示为

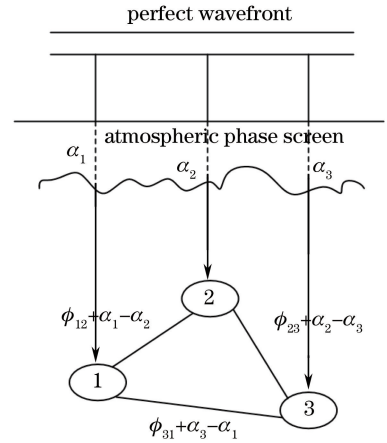


图 2 闭合相位原理图

Fig. 2 Schematic of closure phase

$$\phi_{123} = \arg \left\{ \frac{1 + \rho \exp [j2\pi (\mathbf{B}_{12} \cdot \Delta) / \lambda]}{1 + \rho} \right\} + \arg \left\{ \frac{1 + \rho \exp [j2\pi (\mathbf{B}_{23} \cdot \Delta) / \lambda]}{1 + \rho} \right\} + \arg \left\{ \frac{1 + \rho \exp [j2\pi (\mathbf{B}_{31} \cdot \Delta) / \lambda]}{1 + \rho} \right\}. \quad (1)$$

采用图 3(a) 所示的 Golay-6 型非冗余孔径掩模结构,对双星探测过程进行计算机模拟。Golay-6 型非冗余孔径掩模的子孔径直径为 D , 每个子孔径的圆心坐标为 (x_i, y_i) ($i = 1, \dots, 6$), 则光瞳函数 $P(x_0, y_0)$ 可表示为圆域函数与 δ 函数阵的卷积, 即

$$P(x_0, y_0) = \text{circ} \left(\frac{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}}{D/2} \right) * \sum_{i=1}^6 \delta(x_0 - x_i, y_0 - y_i). \quad (2)$$

在理想单色光(波长 λ) 照明情况下,成像透镜的焦距为 f , F_{PSFsub} 为单个子孔径的点扩散函数,系统的点扩散函数 $F_{\text{PSF6}}(x, y)$ 表示为

$$F_{\text{PSF6}}(x, y) = |F\{P(x_0, y_0)\}|^2 = F_{\text{PSFsub}} \left| \sum_{i=1}^6 \exp \left[-\frac{2\pi j}{\lambda f} (xx_i + yy_i) \right] \right|^2. \quad (3)$$

对 PSF 进行傅里叶变换,系统的调制传递函数 (MTF) 表示为

$$F_{\text{MTF}}(f_x, f_y) = F_{\text{MTFsub}} + \frac{F_{\text{MTFsub}}}{6} * \sum_i \sum_k \delta \left(f_x - \frac{x_i - x_k}{\lambda f}, f_y - \frac{y_i - y_k}{\lambda f} \right), \quad (4)$$

式中 $F_{\text{MTFsub}}(f_x, f_y)$ 是单个子孔径系统的 MTF。由此可见,系统 MTF 的分布是多个子孔径系统 MTF 在频域的组合(零频除外)^[37]。图 3(b) 为模拟的系统 PSF 图,图 3(c) 为系统 MTF 图,6 个子孔

径产生 15 个 F_{MTFsub} 的频域, 每个峰值对应于一条基线。

Golay-6 型非冗余孔径掩模板形成 10 个独立的闭合相位。计算机模拟的点光源的闭合相位全部

为零, 这与闭合相位的性质吻合, 即它对光源亮度的非对称性敏感, 对于点光源或被分辨的亮度对称分布的光源闭合相位值为 0° 或 180° , 该性质也为验证此技术提供了依据。

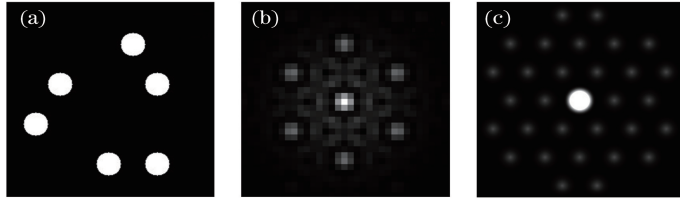


图 3 仿真图。(a) Golay-6 子孔径分布; (b) 系统 PSF; (c) 系统 MTF

Fig. 3 Simulation images. (a) Golay-6 sub-aperture distribution; (b) PSF of system; (c) MTF of system

采用 PSF 对代表双星的点源进行卷积, 获得系统的双星成像, 所采用的数据处理流程为: 1) 对图像进行傅里叶变换, 获得复可见度; 2) 利用闭合三角形上的复可见度获得闭合相位; 3) 利用(1)式, 采用闭合相位对双星参数进行拟合。

图 4 模拟了 3 个不同对比度 R_c 、3 个不同角间距 δA 但方向相同的双星在 Golay-6 型模板上获得的闭合相位, 利用(1)式对双星的对比度、角间距进

行拟合, 确定双星分布信息, 并与理论值进行了比较, 计算值与理论值一致, 说明了所采用的数据处理方法是正确的。模拟结果表明, 干涉图的相位可相对于像面上的任一点确定, 闭合相位与该点的位置无关; 角间距不变时, 双星对比度越高, 闭合相位越小, 闭合相位的计算精度决定了可探测到的双星的对比度。想要探测十分微弱的伴星, 必须提高闭合相位的测量精度。

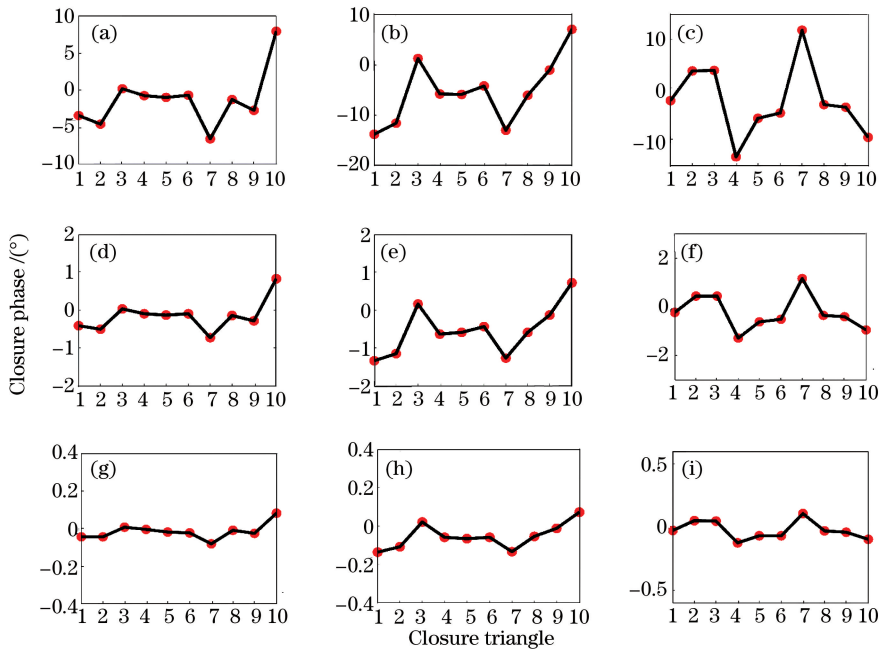


图 4 闭合相位与双星对比度、角间距的函数关系。(a) $R_c=0.1, \delta A=0.71\lambda/D$; (b) $R_c=0.1, \delta A=1.41\lambda/D$; (c) $R_c=0.1, \delta A=2.12\lambda/D$; (d) $R_c=0.01, \delta A=0.71\lambda/D$; (e) $R_c=0.01, \delta A=1.41\lambda/D$; (f) $R_c=0.01, \delta A=2.12\lambda/D$; (g) $R_c=0.001, \delta A=0.71\lambda/D$; (h) $R_c=0.001, \delta A=1.41\lambda/D$; (i) $R_c=0.001, \delta A=2.12\lambda/D$

Fig. 4 Closure phase as a function of binary-star contrast ratio and angular separation. (a) $R_c=0.1, \delta A=0.71\lambda/D$; (b) $R_c=0.1, \delta A=1.41\lambda/D$; (c) $R_c=0.1, \delta A=2.12\lambda/D$; (d) $R_c=0.01, \delta A=0.71\lambda/D$; (e) $R_c=0.01, \delta A=1.41\lambda/D$; (f) $R_c=0.01, \delta A=2.12\lambda/D$; (g) $R_c=0.001, \delta A=0.71\lambda/D$; (h) $R_c=0.001, \delta A=1.41\lambda/D$; (i) $R_c=0.001, \delta A=2.12\lambda/D$

4 实 验

实验光路如图 5 所示, 采用两个 He-Ne 激光光

源模拟主星和伴星, 为了便于调整双星角间距, 伴星通过单模光纤引入, 光纤出射端安装在带差动驱动的 XY 平移调节架上, 主星和伴星均通过分束器到

达准直镜,经准直后的星光由成像镜汇聚在 CCD 上。其中,非冗余孔径掩模板采用 Golay-6 结构,子孔径直径均为 0.5 mm,最短基线的长度为 1 mm,最长基线长度为 2.658 mm。在准直镜和成像镜之

间插入掩模板,掩模板位置即为光学系统的入瞳。使用的 CCD 像素为 648 pixel \times 488 pixel,像元尺寸为 7.4 μ m \times 7.4 μ m,为获得更好像质,整个系统为 $F/20$ 。图 6 所示为插入掩模板前、后系统的成像。

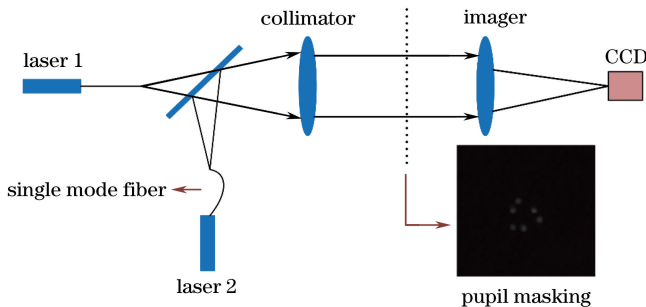


图 5 实验光路图

Fig. 5 Experimental light path

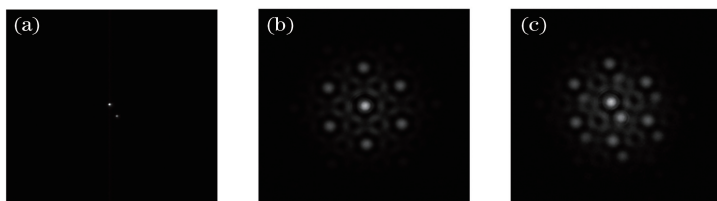


图 6 实验中 CCD 采集到的图片。(a)插入模板前的双星成像;(b)系统 PSF;(c)插入掩模板后的双星成像

Fig. 6 Images collected by CCD in experiment. (a) Binary-star image before inserting mask; (b) PSF of system;

(c) binary-star image after inserting mask

实验首先验证了闭合相位能够消除大气扰动的影响的特性。用相位屏在光路中引入随机相位,测

得的 5 组点光源的 10 个闭合相位均接近 0°,如图 7 所示,测得的闭合相位的均值为 0.3762°,标准偏差

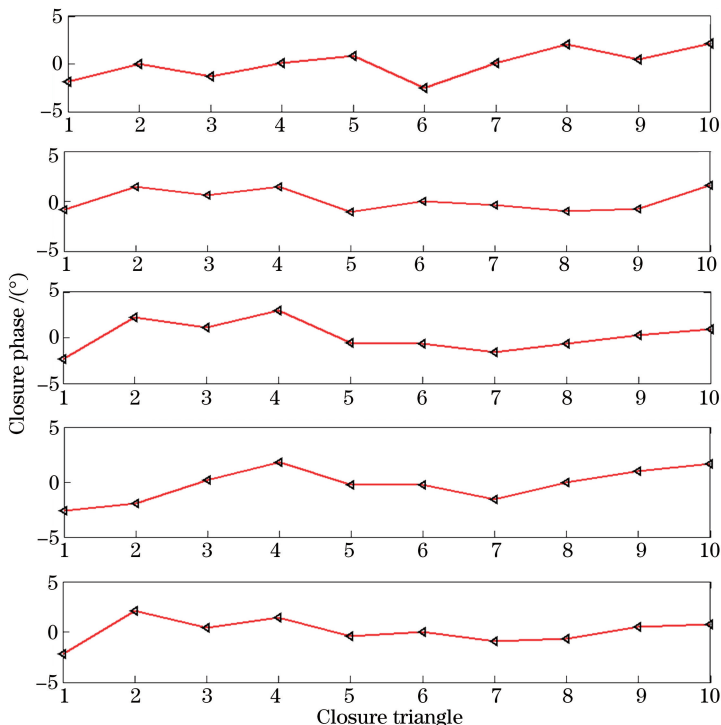


图 7 实验中点光源的闭合相位

Fig. 7 Closure phases of point light source in experiment

为 2.44° 。

在探测双星时,通过增减衰减片改变双星对比度。对实验采集的多组干涉图进行平均、去背景,然后用计算机模拟获得的数据处理方法对图像进行处理,获得闭合相位。6个子孔径产生的10个独立的闭合相位对双星的对比度、角间距进行拟合,一组拟合曲线如图8所示。部分实验结果如表1所示,可以看出,求得的角间距与实际角间距符合很好。实验中所用模板的最长基线为2.658 mm,对应的干涉角分辨率为 $24.55''$,望远镜口径按最长基线计算,衍射极限角分辨率为 $59.91''$,第3组数据双星角间距介于二者之间,表明非冗余孔径掩模技术具有更高的角分辨率。

实验中双星探测的相对误差均在 $\pm 5\%$ 以内,可探测到的双星对比度达0.08,实验误差直接来源于闭合相位的测量误差。根据文献[15]中蒙特卡罗法仿真的结果可知,若闭合相位有 1° 的测量误差,双

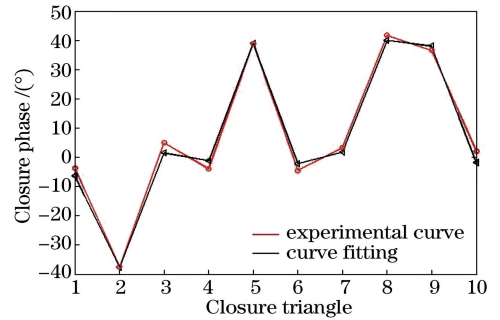


图8 一组双星参数拟合曲线

Fig. 8 Fitting curve of a group of binary-star parameters
星角间距位于 $\lambda/D \sim 5\lambda/D$ 时,可探测的双星对比度极限约为0.0033。闭合相位测量误差主要源于掩模板子孔径的定位精度、子孔径的直径误差、光子噪声、CCD噪声以及数据处理方法等。在今后的实验中,将通过精确测量子孔径间距、增加掩模板子孔径数目、采用科学级CCD以及优化数据处理方法等,提高闭合相位的测量精度。

表1 实验结果

Table 1 Experimental results

Group	Binary-star contrast ratio calculation value	Binary-star contrast ratio calibration value	Error of contrast ratio	Calculation value of angular separation / ($''$)	Calibration value of angular separation / ($''$)	Error of angular separation
1	0.530	0.520	1.92%	73.385	75.261	-2.49%
2	0.081	0.085	-4.71%	73.979	75.261	-1.70%
3	0.266	0.262	1.53%	50.68	49.750	1.87%

5 结 论

进行了非冗余孔径掩模技术用于双星探测的计算机模拟以及实验研究。研究表明,通过对非冗余孔径掩模获得的干涉图的处理,获得闭合相位,以此对双星模型进行拟合,能够获得双星的对比度与角间距。非冗余孔径掩模的干涉本质,使其具有高分辨能力。今后,一方面继续实验研究,提高非冗余孔径探测的动态范围、扩展应用领域;另一方面,将研究成果用于实际观测,为我国的天文观测提供技术支持。

参 考 文 献

- [1] Haniff C A, Mackay C D, Titterton D J, *et al.* The first images from optical aperture synthesis[J]. *Nature*, 1987, 328: 694-696.
- [2] Buscher D F, Haniff C A, Baldwin J E, *et al.* Detection of a bright feature on the surface of Betelgeuse [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1990, 245: 7-11.
- [3] Wilson R W, Baldwin J E, Buscher D F, *et al.* High-resolution imaging of Betelgeuse and Mira[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1992, 257(3): 369-376.
- [4] Tuthill P G, Haniff C A, Baldwin J E. Long-term diameter variations in the long-period variable o Ceti [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1995, 277(4): 1541-1546.
- [5] Wilson R W, Dhillon V S, Haniff C A. The changing face of Betelgeuse[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1997, 291(4): 819-826.
- [6] Tuthill P G, Haniff C A, Baldwin J E. Surface imaging of long-period variable stars [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2002, 306(2): 353-360.
- [7] Tuthill P G, Monnier J D, Danchi W C, *et al.* Michelson interferometry with the keck I telescope [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2000, 112(770): 555-565.
- [8] Monnier J D, Tuthill P G, Danchi W C, *et al.* The keck aperture-masking experiment: near-infrared

- sizes of dusty Wolf-Rayet stars [J]. The Astrophysical Journal, 2007, 655(2): 1033-1045.
- [9] Woodruff H C, Tuthill P G, Monnier J D, *et al.* The keck aperture masking experiment: multiwavelength observations of six mira variables [J]. The Astrophysical Journal, 2008, 673(1): 418-433.
- [10] Woodruff H C, Ireland M J, Tuthill P G, *et al.* The keck aperture masking experiment: spectro-interferometry of three Mira Variables from 1.1 to 3.8 μm [J]. Astrophysical Journal, 2009, 691(2): 1328-1336.
- [11] Blasius T D, Monnier J D, Tuthill P G, *et al.* The keck aperture masking experiment: dust-enshrouded red giants [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2012, 426(4): 2652-2667.
- [12] Pravdo S H, Shaklan S B, Wiktorowicz S J, *et al.* Masses of astrometrically discovered and imaged binaries: G78-28AB and GJ 231.1BC [J]. The Astrophysical Journal, 2006, 649(1): 389-398.
- [13] Tuthill P, Lloyd J, Ireland M, *et al.* Sparse-aperture adaptive optics [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6272: 62723A.
- [14] Lacour S, Tuthill P, Ireland M, *et al.* Sparse aperture masking on Paranal [J]. Messenger, 2011, 146: 18-23.
- [15] Lacour S, Tuthill P, Amico P, *et al.* Sparse aperture masking at the VLT [J]. Astronomy & Astrophysics, 2011, 532: A72.
- [16] Lloyd J P, Martinache F, Ireland M J, *et al.* Direct detection of the brown dwarf GJ 802B with adaptive optics masking interferometry [J]. The Astrophysical Journal, 2006, 650(2): L131-L134.
- [17] Martinache F, Lloyd J P, Ireland M J, *et al.* Precision masses of the low-mass binary system GJ 623 [J]. The Astrophysical Journal, 2007, 661(1): 496-501.
- [18] Ireland M J, Kraus A, Martinache F, *et al.* Dynamical mass of GJ 802B: a brown dwarf in a triple system [J]. The Astrophysical Journal, 2008, 678(1): 463-471.
- [19] Martinache F, Rojas-Ayala B, Ireland M J, *et al.* Visual orbit of the low-mass binary GJ 164 ab [J]. The Astrophysical Journal, 2009, 695(2): 1183-1190.
- [20] Kraus A L, Ireland M J, Martinache F, *et al.* Mapping the shores of the brown dwarf desert. I. upper scorpius [J]. The Astrophysical Journal, 2008, 679(1): 762-782.
- [21] Kraus A L, Ireland M J, Martinache F, *et al.* Mapping the shores of the brown dwarf desert. ii. multiple star formation in taurus-auriga [J]. The Astrophysical Journal, 2011, 731(1): 8.
- [22] Evans T M, Ireland M J, Kraus A L, *et al.* Mapping the shores of the brown dwarf desert. iii. young moving groups [J]. The Astrophysical Journal, 2011, 744(2): 120.
- [23] Ireland M J, Kraus A L. The disk around CoKu tauri/4: circumbinary, not transitional [J]. The Astrophysical Journal, 2008, 678(1): L59-L62.
- [24] Huélamo N, Lacour S, Tuthill P, *et al.* A companion candidate in the gap of the T Chamaeleontis transitional disk [J]. Astronomy & Astrophysics, 2011, 528: L7.
- [25] Cheetham A, Huélamo N, Lacour S, *et al.* Near-IR imaging of T Cha: evidence for scattered-light disc structures at Solar system scales [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2015, 450(1): L1-L5.
- [26] Biller B, Lacour S, Juhász A, *et al.* A likely close-in low-mass stellar companion to the transitional disk star HD 142527 [J]. The Astrophysical Journal, 2012, 753(2): L38.
- [27] Kraus A L, Ireland M J. LkCa 15: a young exoplanet caught at formation [J]. Astrophysical Journal, 2012, 745(1): 5-16.
- [28] Sallum S, Follette K B, Eisner J A, *et al.* Accreting protoplanets in the LkCa 15 transition disk [J]. Nature, 2015, 527(7578): 342-344.
- [29] Sivaramakrishnan A, Tuthill P, Martinache F, *et al.* Planetary system, star formation, and black hole science with non-redundant masking on space telescopes [J]. arXiv, 2009: 0904.1360.
- [30] Ford K E S, McKernan B, Sivaramakrishnan A, *et al.* Active galactic nucleus and quasar science with aperture masking interferometry on the James Webb Space Telescope [J]. The Astrophysical Journal, 2014, 783(2): 73-89.
- [31] Xu M F, Ding J W, Hu P, *et al.* Effects of multi-apertures mask on formation of statistically independent speckle image [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(1): 0101005.
徐美芳, 丁俊文, 胡鹏, 等. 多孔掩模对统计独立散斑图像形成的影响分析 [J]. 中国激光, 2017, 44(1): 0101005.
- [32] Wang H T, Zhou B F. Optical synthesis aperture

- interference image technology [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(5): 434-442.
- 王海涛, 周必方. 光学综合孔径干涉成像技术[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(5): 434-442.
- [33] Chen X Y. Some key techniques of Fizeau-type optical aperture synthesis telescope [D]. Shanghai: Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, 2007.
- 陈欣扬. Fizeau型天文光学综合孔径望远镜的若干关键技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海天文台, 2007.
- [34] Wu Q Y. Study on the sparse aperture optical systems [D]. Suzhou: Soochow University, 2006: 18-19.
- 吴泉英. 稀疏孔径光学系统成像研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2006: 18-19.
- [35] Qian L, Wu Q Y, Wu F, *et al.* Study on imaging of dual three sub-apertures design [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(8): 1030-1035.
- 钱霖, 吴泉英, 吴峰, 等. 复合三子镜的成像研究[J]. *光学学报*, 2005, 25(8): 1030-1035.
- [36] Liang S T. Study on the imaging theory of the optical synthetic aperturing imaging systems [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2011.
- 梁士通. 合成孔径光学成像系统研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2011.
- [37] Yi H W. Study on the key issues of the optical sparse-aperture imaging systems [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2007.
- 易红伟. 光学稀疏孔径成像系统关键问题研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2007.
- [38] Sun C S, Zhu Y T, Hu Z W, *et al.* Astronomy optical interferometric telescope array optimization based on modified UV sampling method [J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(4): 555-561.
- 孙长胜, 朱永田, 胡中文, 等. 基于改进空间频率域采样的天文光干涉望远镜阵列优化[J]. *应用光学*, 2017, 38(4): 555-561.
- [39] Liu J, Jiang H, Wang J, *et al.* Study on the torus sparse aperture [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(11): 111101.
- 柳军, 姜慧, 王军, 等. 环面形稀疏孔径的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(11): 111101.
- [40] Chen Q H, Wang Z L, Zhang W. Study on subaperture aberration of optical synthetic aperture imaging system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, 27(2): 112-115.
- 陈旗海, 王治乐, 张伟. 光学合成孔径成像系统子孔径像差研究[J]. *应用光学*, 2006, 27(2): 112-115.
- [41] Ding C Z, Feng H J, Xu Z H, *et al.* Co-phasing error study of the sub-apertures' for optical sparse aperture system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(5): 1158-1162.
- 丁驰竹, 冯华君, 徐之海, 等. 光学稀疏孔径成像系统子孔径位相误差研究[J]. *光子学报*, 2009, 38(5): 1158-1162.
- [42] Hu M M, Chen B H, Jiang H, *et al.* Influence of alignment error of the three sub-mirrors sparse aperture two-mirror system on imaging quality [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(1): 011101.
- 胡孟孟, 陈宝华, 姜慧, 等. 三子镜稀疏孔径双反系统子镜装调误差对成像质量的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(1): 011101.
- [43] Zheng B, Lu P F, Chen Y H, *et al.* Co-phase error detection of segmented mirrors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1112002.
- 郑彬, 陆培芬, 陈永和, 等. 拼接式反射镜共相误差检测[J]. *光学学报*, 2017, 37(11): 1112002.
- [44] Fan J L, Wu Q Y, Li X W, *et al.* Selection of benchmark sub-mirror of sparse aperture based on phase diversity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0511001.
- 范君柳, 吴泉英, 李勋武, 等. 基于相位差法的稀疏孔径基准子镜的选择[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0511001.
- [45] Li X W, Fan J L, Hu M M, *et al.* Study of filter-apodization phase diversity applied in sparse aperture [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(9): 092201.
- 李勋武, 范君柳, 胡孟孟, 等. 应用于稀疏孔径的滤波波切趾相位差异法的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(9): 092201.
- [46] Zhu X, Wu F, Wu Q, *et al.* Image restoration for sparse aperture systems based on wavelet-Wiener algorithm [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7513: 75131B.
- [47] Wu J, Wu Z. Imaging characteristic and image reconstruction of synthetic aperture optical system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(4): 567-573.
- 吴俊, 吴楨. 合成孔径光学系统的成像特性和图像复原[J]. *应用光学*, 2010, 31(4): 567-573.
- [48] Zhang X L. Study on the astronomical optical

interferometry and optical aperture synthetic image reconstruction [D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2004

张仙玲. 天文光干涉与光学综合孔径图像重构技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.

[49] Jiang Y C. Image restoration in optical sparse aperture systems [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.

姜艳超. 稀疏孔径光学成像系统图像恢复算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.