

文章编号:1004-4213(2010)02-0260-6

即时/准即时 u-v 覆盖的光学综合孔径成像分析*

王海涛¹, 蔡佳慧¹, 魏鹏¹, 张雅静¹, 朱永凯¹, 田贵云^{1,2}

(1 南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016)

(2 Newcastle University upon Tyne, UK)

摘要:介绍了即时/准即时 u-v 覆盖的光学综合孔径成像技术实时/准实时观测的优点,并以 LBT 为实例进行了成像分析.对 LBT 采用快速傅里叶变换、卷积与反卷积算法获得系统的点扩展函数 (PSF) 与光学传递函数 (OTF);探讨了全局传递函数及其对成像效果的影响,说明了即时/准即时 u-v 覆盖成像特性;用实验仿真的方法验证了全局传递函数在满足准即时 u-v 覆盖成像的要求情况下能够对天体目标进行较好的图像恢复.

关键词:光学综合孔径;相干成像;点扩展函数;u-v 覆盖

中图分类号: O436.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103902.0260

0 引言

望远镜的口径越大观测角分辨率越高.由于建造大口径望远镜的费用与其口径的立方成正比^[1],大气扰动使得当望远镜的口径大于一定数值后,实际分辨率只取决于该望远镜实际安放点的大气视宁度.尽管引入了拼接镜面技术可以使望远镜的口径达到 10 m^[2]甚至建造中的 30 m^[3]和研究中的 100 m^[4],但从另一条途径引入光学综合孔径技术^[5-8]的概念,用小望远镜阵代替单个大口径望远镜进行集光观测,用最大基线的概念等效传统光学望远镜的口径^[5],在很大程度上可以解决单个望远镜集光能力不足、角分辨率不高的问题,且大大减少总重量和总造价,即通过光学综合孔径干涉成像技术可达到远高于具有相同接收面积的单口径望远镜的分辨率.

光学综合孔径成像中所涉及的 u-v 覆盖简单地说就是该光干涉仪阵对观测目标在光学波段上的空间频率信息的抽样情况.有两种方法改善空间频率的 u-v 覆盖^[5]:一是改变子孔径的位置或者旋转基线的方法;二是使分隔的最大子孔径间距保持与最长基线相适应的距离,并且增加子孔径的个数或者增加子孔径的直径.另外,根据观测时间的需要,光学综合孔径成像也存在两种情况,非即时 u-v 覆盖成像与即时/准即时 u-v 覆盖成像.非即时 u-v 覆盖成像通过基线旋转的方法,且每次的 u-v 信息各种

复杂的机构调整、检测等一系列的动作,因而获取所需时间很长,并且不是实时获得,这种方法是牺牲时间为代价获得满足图像重构的 u-v 采样条件^[9].对于时间分辨率要求较高的场合,通过基线旋转获得理想 u-v 信息的非即时 u-v 覆盖的办法就不能满足要求了.即时/准即时 u-v 覆盖成像通常情况下只需要对观测目标进行一次观测即可实时得到全部 u-v 信息,就能够得到满足图像重构的 u-v 采样条件,特殊情况下也只需要将基线旋转一、二次而已.在时间要求较高的场合,如观测小行星、空间碎片或人造卫星时,就要求实时/准实时的观测,而即时/准即时 u-v 覆盖的光学综合孔径望远镜(阵)就能达到此项要求,国际上的 MMT^[10]与 LBT^[11]都是采用即时/准即时覆盖技术.

本文对即时/准即时覆盖的光学综合孔径成像进行研究分析,并以 LBT 为例,利用其实际参量并采用快速傅里叶变换、卷积与反卷积算法获得系统的点扩展函数 (PSF) 与光学传递函数 (OTF),同时,探讨了 LBT 综合孔径的传递函数与全局传递函数及它对成像效果的影响.

1 LBT 成像原理

实际应用中,LBT 的 PSF 函数由自适应光学系统测量得出的.按照光的衍射和干涉理论,物点所成的像由于在实际光学系统中存在衍射效应,总是个有限大小的弥散斑,当两个物点不满足瑞利判据时将不能分辨它们的像.因此,光学仪器的实际分辨率由衍射极限决定,称为衍射受限系统.衍射受限光学系统的非相干传递函数 (OTF)^[12]为

$$\overline{H}_1(f_x, f_y) = \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} P^*(\lambda d_i \alpha, \lambda d_j \beta) P[\lambda d_i (f_x + \alpha)] \right\}$$

* 863-2 项目、南京航空航天大学创新基金项目 (Y0803-033) 及南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金资助

Tel: 025-84896264

Email: htwang2002@126.com

收稿日期: 2009-10-23

修回日期: 2009-11-07

$$\lambda d_i (f_y + \beta) \int d\alpha d\beta \} / \{ \iint |P(\lambda d_i \alpha, \lambda d_i \beta)|^2 d\alpha d\beta \} \quad (1)$$

式中 $P(\lambda d_i f_x, \lambda d_i f_y)$ 为系统的出瞳函数, d_i 为出瞳平面到像面的距离. 对式(1)作变量代换: $\xi = \lambda d_i \alpha$, $\eta = \lambda d_i \beta$, 则得 OTF 与光瞳函数之间关系为

$$\overline{H}_i(f_x, f_y) = \frac{\iint_{-\infty}^{+\infty} P(\xi, \eta) P(\xi + \lambda d_i, \eta + \lambda d_i) d\xi d\eta}{\iint_{-\infty}^{+\infty} |P(\xi, \eta)|^2 d\xi d\eta} \quad (2)$$

式(2)表明, 衍射受限光学系统的非相干传递函数是系统光瞳函数的自相关归一化函数, 它提供了由系统光瞳函数直接计算 OTF 的方法.

由于光瞳函数只有 1 和 0 两个数值, 所以, 式(2)中分母积分就等于出瞳的总面积

$$\iint_{-\infty}^{+\infty} |P(\xi, \eta)|^2 d\xi d\eta = \iint_{-\infty}^{+\infty} P(\xi, \eta) d\xi d\eta = \iint_{\text{出瞳}\Sigma} d\xi d\eta = S_0 \text{ (出瞳总面积)} \quad (3)$$

式(2)中分子积分中的 $P(\xi + \lambda d_i, \eta + \lambda d_i)$ 表示光瞳函数 $P(\xi, \eta)$ 分别沿 ξ 轴方向和 η 轴方向移动了 $-\lambda d_i f_x$ 和 $-\lambda d_i f_y$ 的距离, 而函数形式未变, 即平移后, 中心(原点)位置坐标为 $(-\lambda d_i f_x, -\lambda d_i f_y)$ 处的出瞳 Σ' 的光瞳函数. 由于光瞳函数 $P(\xi, \eta)$ 和 $P(\xi + \lambda d_i, \eta + \lambda d_i)$ 分别在 Σ 和 Σ' 内为 1, 在 Σ 和 Σ' 外为 0, 所以分子中被积函数只有在 $P(\xi, \eta)$ 和 $P(\xi + \lambda d_i,$

$\eta + \lambda d_i)$ 都不为零的区域才不为零且取值为 1, 这个区域就是两个出瞳 Σ 和 Σ' 的重叠区域. 这样, OTF 的计算就可以用出瞳的几何图形计算

$$\overline{H}_i(f_x, f_y) = \frac{s(f_x, f_y)}{S_0} = \frac{\text{两个错开的出瞳的重叠面积}}{\text{出瞳的总面积}} \quad (4)$$

双圆形出瞳系统如图 1, 两圆的圆心坐标分别为 $(x_0, 0)$, $(-x_0, 0)$ 直径同为 l , 圆心距为 d , 观测中心波长为 λ .

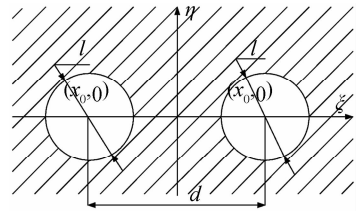


图 1 双圆形出瞳
Fig. 1 Pupil of dual circular

由图(1)可知系统的出瞳函数 $P(\xi, \eta)$ 为

$$P(\xi, \eta) = \begin{cases} 1 & \sqrt{(\xi - x_1)^2 + \eta^2} \leq l/2 \\ & \text{or } \sqrt{(\xi + x_1)^2 + \eta^2} \leq l/2 \\ 0 & \text{(otherwise)} \end{cases} \quad (5)$$

由式(4)得系统的光学传递函数为

$$\overline{H}_i(x, y) = \begin{cases} \frac{(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)}{\pi} & \sqrt{x^2 + y^2} \leq l \text{ 且 } \sqrt{(x-d)^2 + y^2} \geq l \\ \frac{(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)}{\pi} + \frac{(\theta_2 - \sin \theta_2 \cos \theta_2)}{2\pi} & \sqrt{x^2 + y^2} \leq l \text{ 且 } \sqrt{(x-d)^2 + y^2} \leq l \\ \frac{(\theta_2 - \sin \theta_2 \cos \theta_2)}{2\pi} & \sqrt{x^2 + y^2} \geq l \text{ 且 } \sqrt{(x-d)^2 + y^2} \leq l \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

式中 $\cos \theta_1 = \sqrt{x^2 + y^2}/l$, $\cos \theta_2 = \sqrt{(x-d)^2 + y^2}/l$, $x = \xi \lambda d_i / l$, $y = \eta \lambda d_i / l$. 图 2 为 LBT 的光学传递函数及其 PSF.

利用 LBT 在不同基线水平方位角处对目标天体进行多次观测可以得到一个很好的 u-v 空间频率

平面, 这是由于地球的转动不仅能够使空间转动, 而且能够使得 LBT 的基线在目标天体上的投影转动. 图 3 表示在不同水平方位角条件下得到的 PSF 与相应的 OTF 以及 u-v 覆盖.

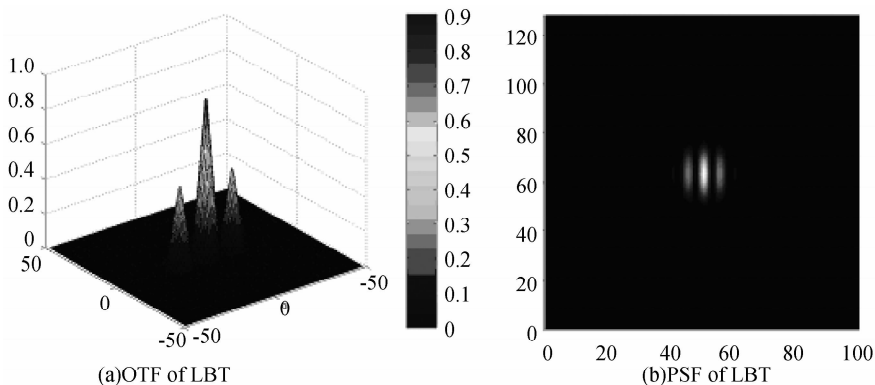


图 2 LBT 的光学传递函数及其点扩展函数
Fig. 2 OTF of LBT and its PSF

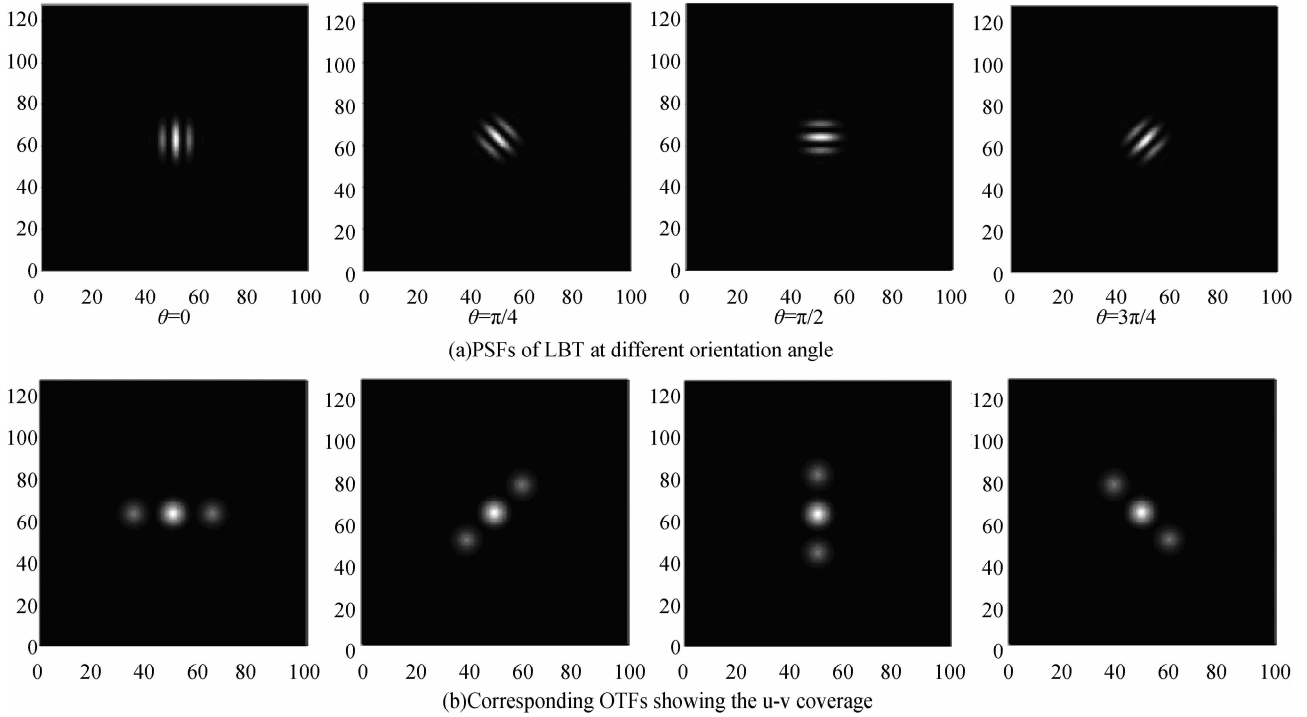


图3 不同水平方位角下 LBT 的点扩展函数以及相应光学传递函数的 u-v 覆盖
Fig. 3 PSFs at different orientation angles and its corresponding OTFs with the u-v coverage

2 LBT 成像分析

如果用 $N \times N$ 维矩阵 f_0 表示被观测天体的光强分布, $N \times N$ 维矩阵 $g_j, j=1, 2, \dots, p$ 表示用 LBT 基线的第 p 个水平角度对天体进行观测的结果, 以及用 LBT 基线的第 p 个水平方位角对天体进行观测时相应的具有空间不变性的 PSF, K_j . 因此, 第 p 次观测结果可用如下的数学模型描述

$$g_j = K_j * f_0 + b_j + \omega_j \quad (7)$$

式中, b_j 为由于大气散射引起的平均观测背景, ω_j 为第 p 次观测时的噪声. 式(7)也可以表示为

$$g_j(x, y) = \iint K_j(x-x', y-y') f_0(x', y') dx' dy' + b_j(x, y) + \omega_j(x, y) \quad (8)$$

对观测天体图像的重构问题在于在给定观测结果, 具有空间不变性的 PSF, K_j 以及对平均观测背景的估计 b_j 的条件下推算观测天体 f_0 的估计值 f . 对平均观测背景的估计在很多情况下是很重要的. 如果图像重构算法含有确定性约束条件, 那么这个约束条件将不随观测背景的消除而改变. 通常假设在望远镜观测范围内, 平均观测背景 b_j 是恒定的.

2.1 全局传递函数

事实上, LBT 的干涉图像是离散的包含 $N \times N$ 个像素, 可以用下标 $m, n=1, 2, \dots, N-1$ 表示. 如果用 $g_j(m, n), f_0(m, n)$ 等表示 g_j, f_0 等在点 (m, n) 的像素值, 则式(7)的离散化表达式为

$$g_j(m, n) = \sum_{m', n'=0}^{N-1} K_j(m-m', n-n') f_0(m', n') + b_j(m, n) + \omega_j(m, n) \quad (9)$$

对式(9)的两边进行离散傅里叶变换可以得

$$\hat{g}_j(m, n) = \hat{K}_j(m, n) \hat{f}_0(m, n) \hat{b}_j(m, n) + \hat{\omega}_j(m, n) \quad (10)$$

符号 $\hat{\cdot}$ 表示离散傅里叶变换. 离散 PSF 函数 $K_j(m, n)$ 的离散傅里叶变换是对应于不同基线水平方位角的系统离散光学传递函数(OTF).

引入向量矩阵概念, 将式(9)改写为

$$g_j = A_j f_0 + b_j + \omega_j \quad (11)$$

式中, A_j 是由第 j 个 PSF 的周期卷积定义的块循环矩阵. 因此, 根据最小均方误差算法, 对 f_0 的最小方差估计 f 定义为

$$\epsilon^2(f) = \sum_{j=1}^p \|A_j f + b_j - g_j\|^2 + \mu \|f\|^2 \quad (12)$$

式中, $\|\cdot\|$ 表示矩阵范数, μ 为标准化噪声. 由式(12)可以定义减法图像 $g_{s,j}$ 为

$$g_{s,j} = g_j - b_j \quad (13)$$

容易证明式(12)与式(14)同解,

$$\sum_{j=1}^p A_j^T A_j f = \sum_{j=1}^p A_j^T g_{s,j} - \mu \|f\|^2 \quad (14)$$

式中, A_j^T 表示块循环矩阵 A_j 的转置. 对式(14)进行离散傅里叶变换得到

$$(|\hat{K}(m, n)|^2 + \mu) \hat{f}(m, n) = \sum_{j=1}^p \hat{K}_j^*(m, n) \hat{g}_{s,j}(m, n) \quad (15)$$

式中, $|\hat{K}(m, n)|^2 = \sum_{j=1}^p |\hat{K}_j^*(m, n)|^2$. 即

$$\hat{f}(m, n) = \sum_{j=1}^p \frac{\hat{K}_j^*(m, n) \hat{g}_{s,j}(m, n)}{|\hat{K}(m, n)|^2 + \mu} \quad (16)$$

将式(10)与式(13)代入式(16)得

$$f(m,n) = \frac{|\hat{K}(m,n)|^2}{|\hat{K}(m,n)|^2 + \mu} \hat{f}_o(m,n) + \sum_{j=1}^p \frac{\hat{K}_j^*(m,n)}{|\hat{K}(m,n)|^2 + \mu} \hat{w}_j(m,n) \quad (17)$$

由式(17)可知,重构的图像 $f(m,n)$ 由两部分组成,前一部分为观测天体的离散傅里叶变换与系统传递函数的乘积

$$\hat{K}''(m,n) = \frac{|\hat{K}(m,n)|^2}{|\hat{K}(m,n)|^2 + \mu} \quad (18)$$

后一部分为噪音干扰.由此可以定义 $\hat{K}''(m,n)$ 为全局传递函数,相应地定义其离散傅里叶反变换为全局 PSF.

2.2 全局传递函数对成像质量的分析

图 4 给出了在不同基线水平方位角下的全局传递函数,图 4(a)为将基线旋转六次,每次旋转 30° 而

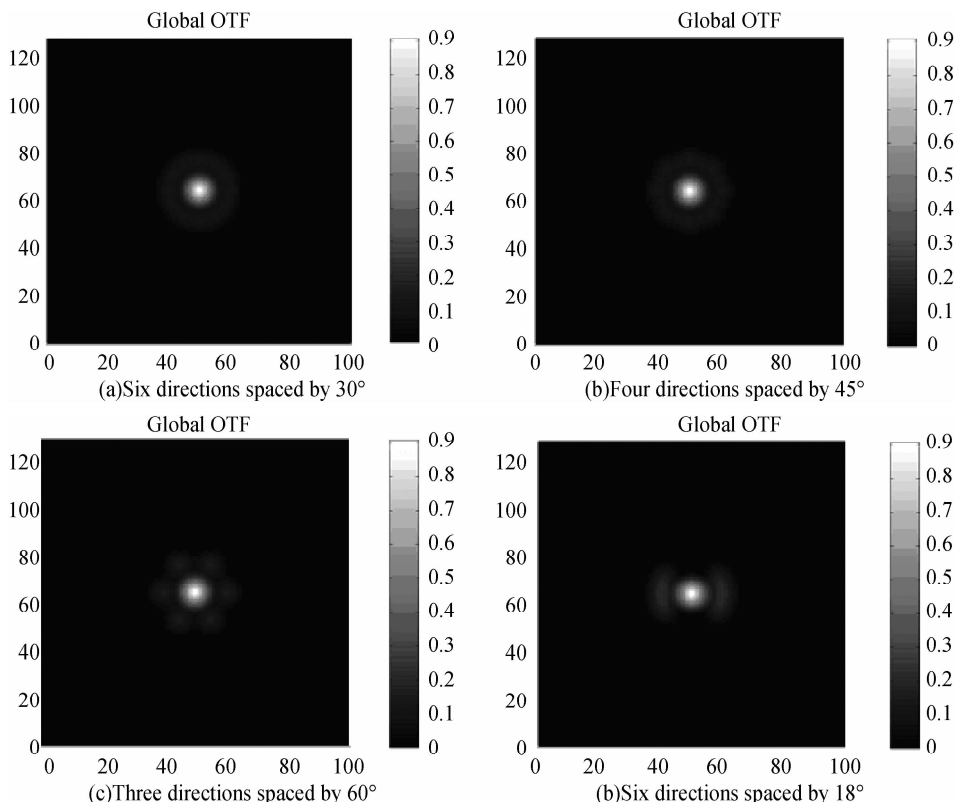


图 4 在不同水平方位角的基线下的全局传递函数
Fig. 4 global transfer function for various sets of baseline orientations

得到的全局传递函数,图 4(b)为将基线旋转四次,每次旋转 45° 而得到的全局传递函数;图 4(c)为将基线旋转三次,每次旋转 60° 而得到的全局传递函数,图 4(d)为将基线旋转六次,每次旋转 18° 而得到的全局传递函数.由图 4 可知,图 4(a)的 u-v 覆盖最佳,依次次之,但是在情况图 4(a)下观测的时间也最长,相比之下在情况图 4(c)中虽然 u-v 覆盖比情况图 4(a)中的覆盖差,但是仍然可以得到满足图像

重构的 u-v 采样条件,并且能够满足准即时成像的时间要求.

3 LBT 准即时 u-v 覆盖成像的实验仿真

由讨论可见,由于引入全局 OTF,使得系统对结构复杂的天体进行观测时获得的 u-v 覆盖得到显著的改善,有利于对观测天体的图像重构,从而获得较清晰的天体图像.图 5 表示观测目标经过 LBT 后

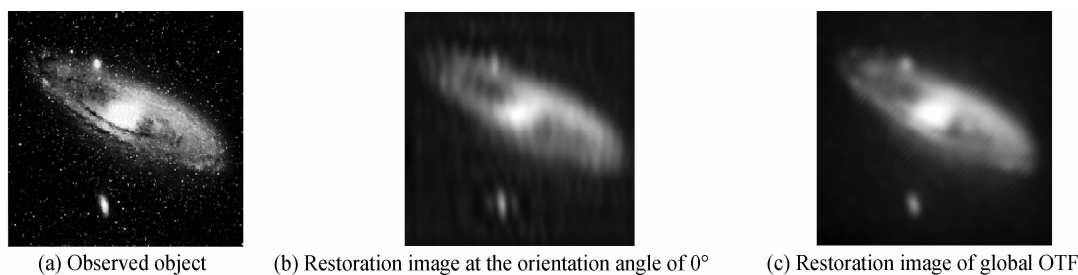


图 5 观测目标的原始像和经过 LBT 后得到的图像
Fig. 5 The observed object and the restoration image through LBT

得到的图像,图 5(a)为观测目标的原始图像,图 5(b)为在水平方位角为 0° 时一次成像的图像,图 5(c)为由图 4(c)情况下的全局传递函数得到的图像.图 5 清楚说明对于结构复杂天体的观测,LBT 不仅可以获得效果较好的重构图像,而且能够满足准即时 $u-v$ 覆盖成像的要求.

4 结论

本文介绍了即时/准即时 $u-v$ 覆盖的光学综合孔径成像技术的实时/准实时观测的优点,并以 LBT 为实例进行了成像分析,通过对 LBT 系统的点扩展函数(PSF)与光学传递函数(OTF)的计算引入了全局传递函数的概念,并且探讨了全局传递函数以及它对成像效果的影响,用实验的方法验证了全局传递函数在满足准即时 $u-v$ 覆盖成像的要求情况下能够对结构复杂的天体目标进行较好的图像恢复.

参考文献

- [1] HUANG You-ran, XU Ao-ao, TANG Yu-hua. Immediate measurement for astrophysics[M]. Beijing: Science Press, 1987, 30.
黄佑然, 许敖敖, 唐玉华. 实测天体物理学, 北京: 科学出版社, 1987, 30.
- [2] MARK M, ANDREW F, SAMMUEL L, *et al.* Keck Interferometer [C]. *SPIE*, 1998, **3350**: 776-784.
- [3] NELSON J. Design concepts for the california extremely large telescope [C]. *SPIE*, 2000, **4004**: 282-289.
- [4] PHILIPPE D, ROBERTO G. Progress of the OWL 100-m telescope conceptual design [C]. *SPIE*, 2000, **4004**: 290-299.
- [5] WANG Hai-tao, ZHU Yong-kai, CAI Jia-hui, *et al.* Research on the UV coverage and the optimization arrangement of the optical synthetic aperture telescope array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 1112-1116.
王海涛, 朱永凯, 蔡佳慧, 等. 光学综合孔径望远镜的 UV 覆盖和孔径排列的研究 [J]. 光学学报, 2009, **29**(4): 1112-1116.
- [6] WANG Hai-tao, ZHOU Bi-fang. Beam combiner in optical aperture synthesis telescope array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9): 1109-1115.
王海涛, 周必方. 光学综合孔径望远镜阵的光束组合器 [J]. 光学学报, 2002, **22**(9): 1109-1115.
- [7] WANG Da-yong, FU Xi-yang, GUO Hong-feng, *et al.* Imaging and image reconstruction of optical-aperture systems [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(10): 1157-11160.
王大勇, 伏西洋, 郭红峰, 等. 光学稀疏孔径系统的成像及其图像复原 [J]. 光子学报, 2005, **34**(10): 1157-11160.
- [8] XU Jian-cheng, XU Qiao, CHAI Li-qun. Performance analysis of interferometric imaging sampled system based on mutual information [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(8): 1608-1611.
徐建程, 许乔, 柴立群. 基于互信息的干涉成像采样系统性能分析 [J]. 光子学报, 2008, **37**(8): 1608-1611.
- [9] YOUNG J, BALDWIN J, BECKETT M, *et al.* COAST in the near infrared: solutions for infrared interferometry [C]. *SPIE*, 1998, **3350**: 746-752.
- [10] KEITH H, CHESELKA M. The MMT optics support structure: performance for interferometric imaging [C]. *SPIE*, 1990, 14-16 February.
- [11] HILL J, SALINARI P. The Large Binocular Telescope project [C]. *SPIE*, 2004, **5489**: 603-614.
- [12] ZHAO Jian-lin. The Modern Optics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002, 174.
赵建林. 高等光学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002, 174.

Imaging Analysis of Optical Synthetic Aperture System with the Immediate/para-immediate $u-v$ Coverage

WANG Hai-tao¹, CAI Jia-hui¹, WEI Peng¹, ZHANG Ya-jing¹, ZHU Yong-kai¹, TIAN Gui-yun^{1,2}

(1 School of Automation engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

(2 School of Electrical, Electronic and Computer Engineering, Newcastle University, UK)

Abstract: The indispensable information regarding the image reconstruction is derived immediately/para-immediately by the optical synthetic aperture imaging with the immediate/para-immediate $u-v$ coverage with the samples taking from the space frequency domain. The image of the observed object is obtained. The advantages of the immediate/para-immediate observation using the optical synthetic aperture imaging technology with the immediate/para-immediate $u-v$ coverage are introduced. The analysis of imaging for LBT is proceeded as an example. It deduces the point-spread function and optical transfer function of the LBT system based on the algorithm of the Fast Fourier Transform (FFT), convolution and deconvolution. It also discusses the global transform function and its influence on the effect of imaging. It explains the imaging properties of the immediate/para-immediate $u-v$ coverage. With the means of the experimental simulation, it tests and verifies that the global transform function could restore the image of celestial body under the circumstance which fits the condition of the imaging of the para-immediate $u-v$ coverage.

Key words: Optical synthetic aperture, Interferometric imaging, Point spread function, $u-v$ coverage



WANG Hai-Tao was born in 1968. He got the Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University and Chinese Academy of Science in 2002. As an exchange scientist, he worked in MPE in Munich and the University of Wuerzburg in Germany between the year of 1998-2000. Now, he is associated professor and the head of the department of measurement and test engineering, school of automation engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His research area is the optical interference measurement technology, the electromagnetic NDT&E technology and the computer control technology.