

文章编号: 0253-2239(2004)08-1009-6

# 光学综合孔径望远镜成像分析及计算机仿真

龙伟军 王治乐 周彦平

(哈尔滨工业大学空间光学研究中心, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 阐述了光学综合孔径(OSA)望远镜成像原理以及综合孔径望远镜的几种实现形式;采用快速傅里叶变换(FFT)算法得到了任意子孔径综合模式下的点扩展函数(PSF)和光学传递函数(OTF)分布;从子孔径结构排列、共相位、图像恢复几个方面论述了光学综合孔径的成像特征。初步分析了稀疏率、填充因子、“实际截止频率”等因素对光学综合孔径望远镜成像的影响。分析和仿真结果表明:光学综合孔径通过相干成像不但可以突破传统单孔径系统的口径局限获得极高的成像分辨率,而且对于实现空间光学遥感系统轻量化和模块化都具有重要意义。

**关键词:** 应用光学; 光学综合孔径; 望远镜; 相干成像; 计算机仿真

中图分类号: O436.1 文献标识码: A

## Imaging Analysis and Computer Simulation of Optical Synthetic Aperture Telescope

Long Weijun Wang Zhile Zhou Yanping

(Space Optical Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

(Received 29 May 2003; revised 27 October 2003)

**Abstract:** The imaging theory and several realization ways of optical synthetic aperture telescope are presented. Based on fast Fourier transform (FFT) algorithm the point spread function and optical transfer function of a random optical synthetic aperture system are obtained, then the imaging characteristics of optical synthetic aperture telescope are analyzed from such aspects as sub-aperture configuration and arrangement, cophasing and image restoration. The influence of sparse ratio, fill factor, “practical cut-off frequency” on optical synthetic aperture telescope imaging is investigated. The analysis and simulation indicate the optical synthetic aperture technology by coherent imaging can improve the resolution dramatically compared with traditional single-aperture telescope. It is valuable for realization of lightweight and modularity of space-based optical remote sensing system.

**Key words:** applied optics; optical synthetic aperture; telescope; coherent imaging; computer simulation

## 1 引 言

单孔径光学成像系统无论是几何成像、衍射成像、还是扫描成像,无不受衍射极限的限制,角分辨率的极限为  $1.22\lambda/D$ ,  $D$  为入瞳直径。 $D$  的增大不但可以提高光学系统的分辨力,而且可以提高系统的聚光能量和信噪比。但实际应用中,口径的增大受到制造、装配、材料、工艺、成本等诸多因素的限

制。尤其是空基光学系统,口径的增加势必带来发射的困难,复杂的空间环境也可能导致大口径光学镜面的变形而不能正常工作。

为了解决这一难题,1970年美国科学家 Meinel<sup>[1]</sup>在文献中提出了光学综合孔径概念。光学综合孔径是将多个小口径的光学元件或光学系统按照一定的空间位置排列,通过相位匹配和光路调整,使得通过各个子孔径的光束在共同的焦平面上满足同相位要求,以实现光场的相干叠加,从而达到与之通光口径相当的单一大口径系统的衍射限分辨率。

E-mail: hitlon@elong.com

收稿日期:2003-05-29;收到修改稿日期:2003-10-27

光学综合孔径系统突破了传统单孔径光学系统口径尺寸的限制,通过相干成像不但可以获得极高的分辨率,而且子孔径的模块化设计避免了加工单一大口径高精度光学镜面的困难。所以对于综合孔径技术的研究具有重要的现实意义。

## 2 光学综合孔径望远镜成像原理

光学综合孔径系统的成像原理是基于光的衍射和干涉理论。按照几何光学的理论,在不考虑像差时,每个点物的像是一个锐利的点,实际的光学系统由于存在衍射效应,所成的像总是一个有限大小的弥散斑,当两个点物非常接近时,将不能分辨它们的像。因此,在不考虑光学系统几何像差的前提下,光学仪器的分辨本领由衍射极限决定,此时的光学系统称为衍射受限系统(Diffraction limited system)。光学综合孔径系统,由多个子孔径组成,各子孔径对无限远目标所发出平行光的衍射,使得来自不同子孔径的光束在焦平面上相干叠加,像场按照干涉叠加的原理重新分布。从频域上说,由于子孔径的综合,使得单孔径的频谱发生了改变,从而引起系统分

辨本领的变化,其变化规律与子孔径的形状结构及排列方式有关。

图 1 是由  $N$  个相同圆孔组成的综合孔径系统,设子孔径的半径为  $a$ ,  $N$  表示子孔径的数量;  $x_n$  和  $y_n$  是第  $n$  个子孔径的中心位置坐标;  $\theta_n$  是第  $n$  个子孔径相对轴的角度;  $\rho_n$  是第  $n$  个子孔径中心相对原点的距离,简称孔径-原点矩。综合孔径系统的光瞳函数能够表达成一个子孔径光瞳函数与一个  $\delta$  函数阵列的卷积:

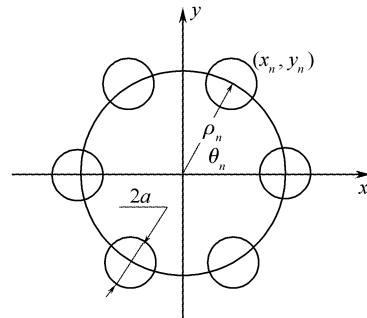


Fig. 1 Optical synthetic aperture with an aperture-origin separation of  $\rho_n$  and sub-aperture radius of  $a$

$$P(x, y) = \text{circ}\left(\frac{r}{a}\right) * \sum_1^N \delta(x - \rho_n \cos \theta_n, y - \rho_n \sin \theta_n), \quad (1)$$

式中的  $r = \pm \sqrt{x^2 + y^2}$ ,  $\text{circ}(r/a)$  表示圆域函数。

$U$  和  $V$  是像平面的归一化距离,表达式为

$$U = 2ax_i/\lambda f, \quad (2)$$

$$V = 2ay_i/\lambda f, \quad (3)$$

$x_i$  和  $y_i$  是像面坐标,  $f$  是焦距,  $\lambda$  是波长。综合孔径系统的脉冲响应  $h(U, V)$  被定义为光瞳函数的傅里叶变换:

$$h(U, V) = F\{P(x, y)\} = \left\{ \frac{2\pi a^2 J_1[(U^2 + V^2)^{1/2}]}{(U^2 + V^2)^{1/2}} \right\} \left\{ \sum_1^N \exp[-j(U\rho_n \cos \theta_n + V\rho_n \sin \theta_n)/a] \right\}, \quad (4)$$

(4) 式表明,综合孔径系统的脉冲响应实质上是单个子孔径的脉冲响应被其它子孔径在不同方向上余弦调制的叠加。余弦调制的方向和角度是各个子孔径的孔径-原点距  $\rho_n$ , 角度位置坐标  $\theta_n$  的函数。而且综合孔径系统的脉冲响应包络函数与单个子孔径的脉冲响应具有相同的形式,包络函数为

$$B = \frac{2\pi a^2 J_1[(U^2 + V^2)^{1/2}]}{(U^2 + V^2)^{1/2}}. \quad (5)$$

仿真结果如图 2 所示:其中图 2(a)的圆孔径半径  $a=0.5$  mm;图 2(b)是六个具有相同半径  $a=0.5$  mm的圆孔径综合,孔径-原点矩  $\rho_n=3a$ ;图 2(c)的圆孔接收面积与图 2(b)的总接收面积相同,即半

径  $a=1.22$  mm;都采用波长  $\lambda=0.55$   $\mu\text{m}$  的平面波入射,点扩展函数(PSF)分布如图 2 (强度值未归一化)。

仿真的结果表明,图 2(b)的中央峰在三者中具有最大的“锐度”,因此可以获得较高的分辨率。图 2(b)的强度包络与图 2(a)是相同的,这说明了综合孔径其实是对单个子孔径艾里斑的干涉调制作用,调制的程度与子孔径之间的相对位置有关。光学综合孔径成像正是基于这种原理把多个较小口径的光学元件或光学系统按照一定的空间位置排列(通常是最优排列),通过相位匹配和光路调整,使得通过各个子孔径的光束在共同的焦平面上满足同相位要

求,以实现光场的相干叠加,从而达到与之通光口径相当的单一大口径系统的衍射极限分辨力。

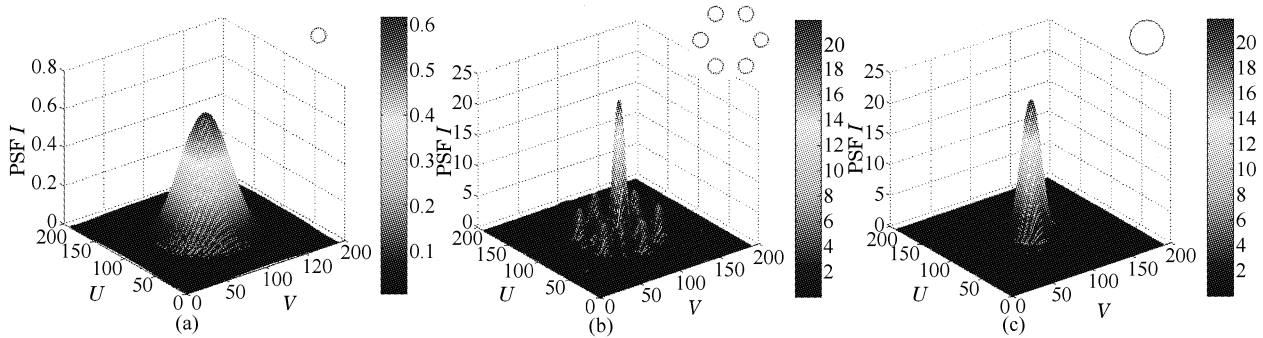


Fig. 2 The point spread function of single and six apertures (unnormalized). (a)  $a=0.5$  mm, (b) the synthesis of six apertures and sub-aperture radius of  $a=0.5$  mm with an aperture-origin separation of  $\rho_n=1.5$  mm; (c)  $a=1.22$  mm

### 3 光学综合孔径望远镜的实现形式

基于对光学综合孔径概念的定义,本文对光学综合孔径望远镜的实现形式作了划分。一种划分是根据子系统的不同,分为子镜面拼接主镜 (Segmented primary synthetic aperture) 的设计方式和子望远镜综合的相控望远镜阵 (Phased telescope array)。另一种划分是根据子孔径在入瞳处疏密程度的不同分为全填充孔径 (Fully filled aperture) 和稀疏孔径 (Sparse aperture)。下面分别对各种实现形式加以介绍和比较。

#### 3.1 子镜面拼接主镜与相控望远镜阵

子镜面拼接主镜设计是采用多个小口径子镜片拼接形成一个较大的主镜,通常再共用一个次镜,然后经过精密的光路调整和相位匹配模块,达到在共同焦平面上成像的目的。子镜面拼接主镜方式可以在传统的望远镜设计基础上进行,图 3(a) 是传统的卡塞格伦型 (Cassegrain) 望远系统,图 3(b) 是一种子镜面拼接主镜形式,主镜被分割成六个六边形子镜片,各子镜片通过精密装调机构达到与之相当的单个主镜面成像效果。相控望远镜阵的设计如图 3(c) 所示,入射波前通过子望远镜系统以后,经过光路调整和相位匹配,在共同的焦平面上实现相干成像。

子镜面拼接主镜设计与相控望远镜阵两种孔径综合方式各有优劣:前者可以充分利用现有的望远镜设计,而且比较容易做到较大的视场;但不足的是如果主镜被设计成非球面或更为复杂的高次曲面时,则加工若干个离轴子镜面存在诸多困难。后者避免了这一点,并且减少了像差的影响,但却不容易实现较大的视场,因为通常只能调整各个子望远镜焦点仅对一个物点重合,其它物点都会产生离焦和错位,类似于彗差情形,一种可能的解决方法<sup>[2,3,9,10]</sup>如图 3(c) 所

示,在这个系统中,每一个子望远镜的主镜和次镜是共焦的,从而产生平行光,另外用两个平面镜使光束与原光束平行,并进入一个辅助成像望远镜,这使光束按比例缩小,即满足拉格朗日条件

$$D/F = x/y, \quad (6)$$

这样系统可以对有限的视场得到调焦校正。

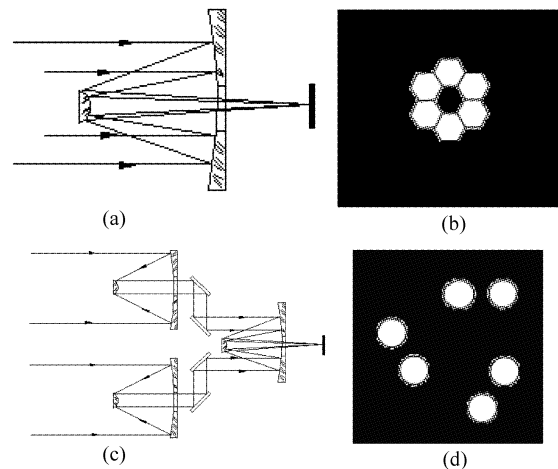


Fig. 3 (a) Cassgrain telescope (b) Segmented primary aperture (fully filled aperture with central obscuration), (c) Phased telescope array, (d) sparse aperture design

#### 3.2 全填充孔径与稀疏孔径设计

全填充孔径与稀疏孔径是根据子孔径的疏密程度来定义的,这里所说的子孔径可以是子镜面和子望远镜。为了描述子孔径间的疏密程度定义填充因子 (Fill factor)<sup>[2]</sup>

$$F = Nd^2/D_{\text{encircled}}^2, \quad (7)$$

式中  $N$  为子孔径数目,  $d$  为子孔径直径,  $D_{\text{encircled}}$  为子孔径包围圆直径。全填充孔径是指子孔径间紧密相连,  $F$  为 1 的综合孔径。但对中央有遮光孔的情形如

图 3(b)通常也被理解作为一种全填充形式。稀疏孔径的填充因子  $F$  介于 0 和 1 之间,  $F$  越小, 稀疏程度越高。图 3(d)是著名的 Golay6 稀疏孔径设计, 研究表明 Golay6 具有较小的冗余度和极高的分辨率<sup>[3,5,6]</sup>。

全填充形式经常被用到子镜面拼接主镜设计中, 这种设计通常有较大的接收面积, 因而可以获得较多的通光量和较高的信噪比。不足的是这种设计具有较大的自重, 一般空基系统不采用这种设计。稀疏孔径的成像方式与全填充形式有所不同, “稀疏”一词沿用了雷达中的概念。稀疏孔径通过改变子孔径的结构和疏密程度可以达到远高于具有相同接收面积的全填充孔径和单孔径的衍射极限分辨率。如图 2(b)就是一种稀疏孔径, 图 2(c)是具有相同接收面积的单孔径, 由仿真结果可见前者比后者具有更加尖锐的中央“主瓣”, 因此可获得高分辨率图像。但是稀疏孔径所成的像, 通常不能直接使用, 需要通过图像恢复和重建以得到逼近原始目标的图像<sup>[4,5,7]</sup>。

#### 4 光学综合孔径实际成像分析

全填充形式的综合孔径望远镜与具有相同接收面积的单孔径系统的成像特征没有太大区别, 在此不再赘述。采用稀疏孔径形式的综合孔径望远镜是研究较多的课题。总的来看, 主要集中在如下三个方面: 1) 子孔径的结构排列问题; 2) 共相位问题;

3) 图像恢复问题。这三个方面的问题也是光学综合孔径成像的一般性问题, 下面以稀疏孔径为例针对上述三个问题阐述光学综合孔径的成像特征。

##### 4.1 子孔径的结构排列

稀疏孔径形式中各子孔径的结构排列非常重要, 如无线电中的稀疏阵一样, 一个优化的孔径结构排列可以减少频率的冗余, 从而获得较高的像质和分辨率。所谓冗余是指某个空间频率范围的信息被过多地通过, 导致调制传递函数(MTF)出现了类似如图 4(d)所示的“带通”形式, 即在中央主瓣周围围绕着若干个离散的旁瓣, 旁瓣与旁瓣之间出现了调制传递函数为零的区域。这种调制传递函数中频信息的损失对用于成像的综合孔径系统是不利的<sup>[7,8]</sup>。

图 4 是存在冗余的三孔径系统与非冗余三孔径系统成像的对比。为研究方便, 文献[3]把稀疏率  $s$  定义为相邻子孔径间的中心间距与单位圆孔直径的比值<sup>[3]</sup>。图 4 第一列对应稀疏率  $s=2$ 。由图 4(d)可以看出调制传递函数是由一个中央主瓣和六个离散的较小旁瓣组成(峰值为中央峰值的  $1/3$ ), 瓣与瓣之间存在零值, 所以它是一种冗余的排列。第二列对应稀疏率  $s=1.73$ , 图 4(e)是它的调制传递函数分布, 由图可见六个旁瓣不再彼此孤立, 而相互连续起来, 瓣与瓣之间的零值被消除, 因此它是一种非冗余排列。

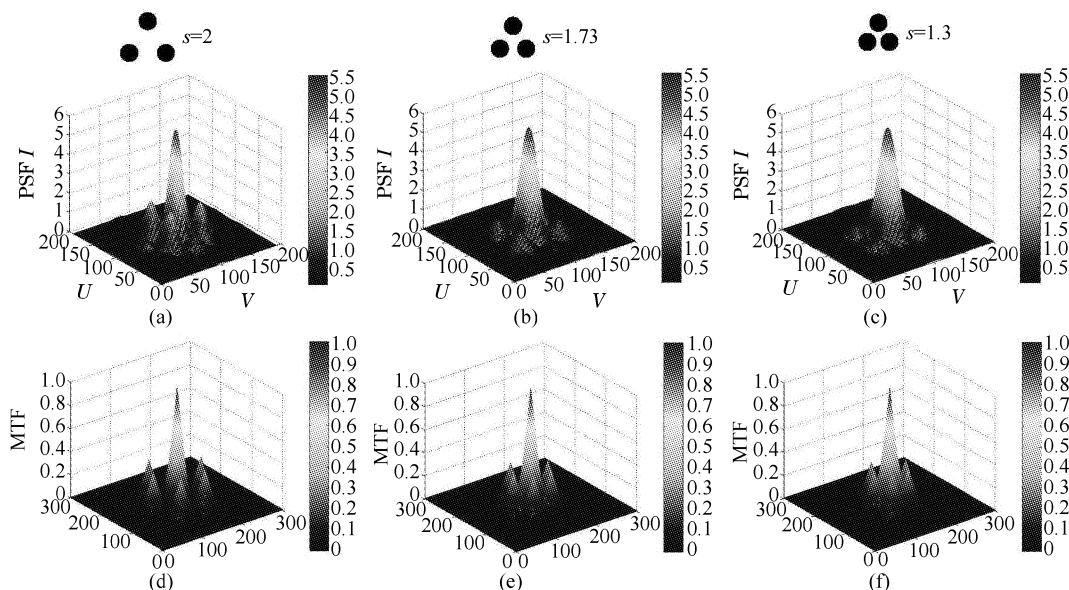


Fig. 4 Point spread function and MTF of three-aperture synthesis with sparse ratio  $s=2, 1.73, 1.3$

仿真结果表明: 非冗余稀疏阵的点扩展函数(PSF)次峰强度明显低于冗余稀疏阵的次峰强度,

这对提高像质是有利的。更为重要的是由于非冗余阵消除了旁瓣间传递函数为零的区域, 所以可以通

过传递函数恢复技术进行补偿<sup>[3,4]</sup>,从而达到与稀疏孔径等效的单圆孔分辨率。等效单圆孔的截止频率与稀疏孔径的“实际截止频率”相同,“实际截止频率”用  $f_p$  表示,如图 5 所示,它有别于通常意义下的

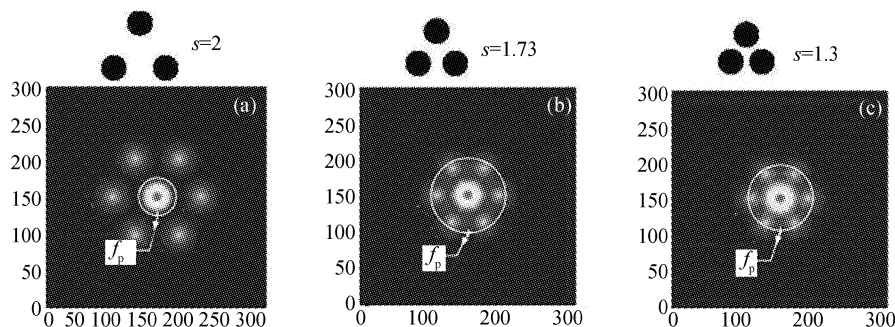


Fig. 5 Practical cut off frequency of MTF (top view) of three-aperture synthesis with sparse ratio  $s=2, 1.73, 1.3$

“实际截止频率”的存在源于稀疏孔径调制传递函数的非旋转对称性,从某种意义上说它更能反映稀疏孔径的实际分辨能力。非冗余的稀疏孔径通常具有较大的“实际截止频率”,如图 5(b)所示,从而具有较高的分辨率。所以避免或减少稀疏孔径的冗余度成为优化子孔径结构排列的目标。目前就稀疏孔径子孔径的结构优化问题,不少文献<sup>[6,8]</sup>提出了各种判据和算法。总之,稀疏孔径的子孔径结构排列优化是实现光学综合孔径成像、提高分辨率和像质都必须考虑的问题。

#### 4.2 共相位

光学综合孔径系统最重要的问题是共相位问题<sup>[3,9,10]</sup>,稀疏孔径尤其如此。各子孔径产生的像场必须具有相同的相位,才能在艾里斑中心相互增强,同时使艾里斑变窄,从而获得高分辨率图像。光学综

截止频率  $f_c$ 。“实际截止频率”被定义为稀疏孔径所能恢复的最大频率,但在以这个最大频率为半径的频率圆域不允许有调制传递函数为零的区域。

合孔径系统中各子孔径间的相位失调对成像的影响十分明显。图 6 是三圆孔综合孔径系统存在相位失调时的仿真结果,稀疏率  $s=1.73$ ,波长  $\lambda=0.55 \mu\text{m}$ 。图 6(a)是当某个子孔径存在  $0.1\lambda$  活塞向相位误差的点扩展函数分布,与不存在相位误差的图 4(b)相比,有些旁瓣峰值水平开始增高,一些开始下降,当相位误差增加到  $0.3\lambda$  时,这种现象愈加明显,如图 6(b)所示。图 6(c)是相位误差为  $0.5\lambda$  的点扩展函数分布,非常明显地看到其中有个旁瓣差不多达到了主瓣的峰值水平,这种情况下通常无法成像。为了定量描述主瓣中心亮度的下降状况,给出上述三种活塞向相位误差所对应的斯特雷尔比(S. D.)分别为:99%,89%,71%,可见像差对光学综合孔径系统的成像影响是非常严重的。

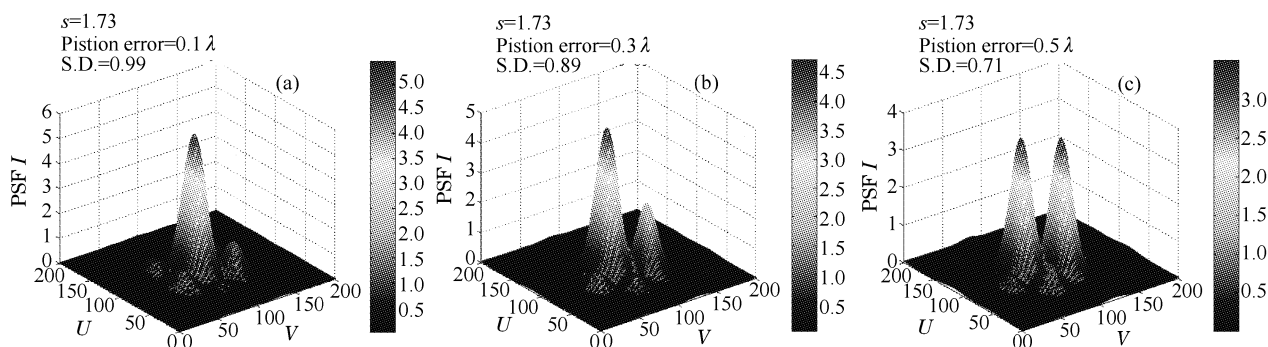


Fig. 6 Point spread function of three-aperture synthesis,  $s=1.73$ . Some aperture with piston error  $0.1\lambda, 0.3\lambda, 0.5\lambda$

在工程上为了实现子孔径间的共相位比较困难,因为要达到光频段十分之一波长的精度,无论在机械调整,稳定性,大气扰动等都不容易做到。为了实现这种精度要求,有人采用了闭环控制机构和自适应技术<sup>[11,12]</sup>,通过在子孔径与子孔径连接处安装

波前抽样传感器实时测量各子波前间的相对波前误差,然后通过闭环控制机构的实时校正实现子孔径间的共相位。

#### 4.3 图像恢复

稀疏孔径所成的像是原始图像(raw image),像

质一般不会太高。即便是 Golay6 这种非冗余孔径也不例外,虽然从理论上说 Golay6 可以获得很高的分辨率。Golay6 的调制传递函数如图 7(a)所示,可以看到由“实际截止频率”决定的分辨率很高,但“实际截止频率”以内的中高频部分传递函数值并不高,因此由 Golay6 得到的原始图像还不清晰,需要通过传递函数恢复技术<sup>[3,4,5]</sup>加以补偿得到一个更加逼

近目标的图像。传递函数恢复的前提是采用非冗余排列,理论上“实际截止频率”以内的信息都可以被恢复,因此,可以最大限度地避免中频损失,恢复所采用的方法是一个解卷积过程。计算机仿真结果如图 7 所示。图 7(d)是恢复以后的图像,相比图 7(c)的原始图像像质有所改善。因此,实现光学综合孔径高分辨率成像,图像恢复也是一个必须的过程。

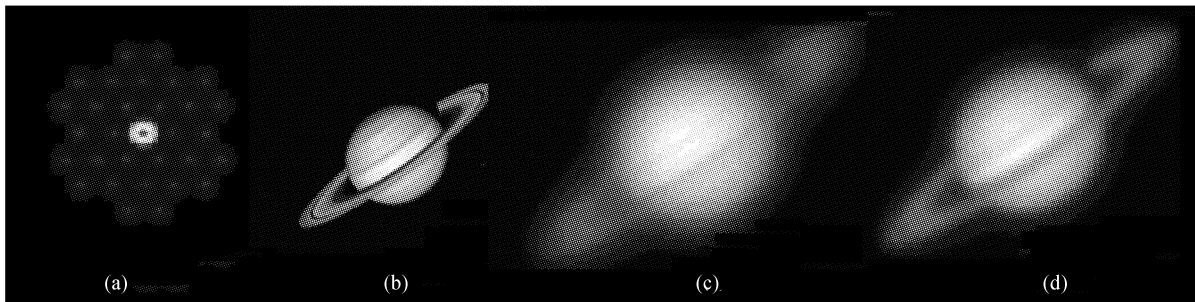


Fig. 7 (a) MTF of Golay 6, (b) object, (c) raw image, (d) restored image

**结论** 本文论述了光学综合孔径望远镜成像原理,建立了多个子孔径衍射成像的数学模型;对综合孔径望远镜的实现形式作了具体划分,并比较了各种综合方式的优劣。然后以稀疏孔径为例分析了子孔径结构排列和子孔径相位误差对成像的影响,并采用图像恢复技术进一步提高了像质。本文的理论结果都采用计算机仿真加以证实,尤其值得一提的是我们采用快速傅里叶变换算法实现了对任意子孔径综合形式的传递函数计算机仿真。

### 参 考 文 献

- 1 Meinel A B. Aperture synthesis using independent telescope. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(11): 2501~2504
- 2 Fieta R, Mooney J, Tantalio T. Image quality assessment of sparse-based designs with decreasing fill factors. *Proc. SPIE*, 2000, **4091**: 64~73
- 3 Harvey J E. Performance characteristics of phased array and thinned aperture optical telescopes. *Opt. Engng.*, 1988, **27**(9): 762~768
- 4 Barakat R. Dilute aperture diffraction imagery and objects reconstruction. *Opt. Engng.*, 1990, **29**(2): 131~139
- 5 Paxman R G, Fienup J R. Optical misalignment sensing and image reconstruction using phase diversity. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1988, **5**(6): 914~922
- 6 Mugnier L M, Rousset, Cassaing. Aperture configuration optimality criterion for phased arrays of optical telescopes. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1996, **13**(12): 2367~2374
- 7 Peng Renjun, Wu Jian, Yang Chungping *et al.*. Synthesizing aperture in optics with interferometric imaging. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(3): 355~359 (in Chinese)
- 8 Fender J S, Carreras R A. Demonstration of an optically phased telescope array. *Opt. Engng.*, 1988, **27**(9): 706~711
- 9 Weaver L D, Fender J S, DeHainaut C R. Design considerations for multiple telescope imaging arrays. *Opt. Engng.*, 1988, **27**(9): 730~735
- 10 Traub W A. Combing beams from separated telescopes. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(4): 528~532
- 11 Wang Haitao, Zhou Bifang. Beam combiner in optical aperture synthesis telescope array. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(9): 1109~1115 (in Chinese)
- 12 Zhao Peiqian, Zhou Bifang, Mariotti J M *et al.*. Method study of optical path modulation in coherent optical telescope array. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1994, **14**(7): 748~751 (in Chinese)