

基于基尔霍夫衍射的全局大气非等晕成像模拟

罗 林 饶家权 高晓蓉

(西南交通大学光电工程研究所, 四川 成都 610031)

摘要 大气非等晕效应是望远镜大视场高分辨成像需要解决的重要问题,模拟大气非等晕成像是研究非等晕复原的基础。根据基尔霍夫衍射成像理论,建立了非等晕条件下空间目标大气成像理论模型。把大气非等晕效应用于不同高度的多层相位屏表示,目标上的每一点发出的光波经大气后的相位变化用一个相位屏表示,其相位大小是光线穿过各层相位屏后相位的叠加。通过一系列实验对所研究的方法进行了验证,对多星目标、星云和月球表面图像进行了非等晕成像模拟,实验结果表明:通过所建立的大气非等晕成像模型模拟的图像,有效体现出大气湍流、衍射和空间位置变化时点扩展函数的变化情况,没有振铃和边缘效应,并能准确表示不同视场角时大气非等晕效应对大气成像的影响。

关键词 大气光学; 非等晕; 大气湍流; 衍射; 图像处理

中图分类号 TH751 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.s113003

Simulation of Atmospheric Anisoplanatic Imaging Based on Kirchhoff Diffraction

Luo Lin Rao Jiaquan Gao Xiaorong

(Photoelectric Engineering Institute, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract Atmospheric anisoplanatism is one of the key subjects for the wide field view high resolution imaging of telescope. The simulation of anisoplanatic imaging is the basis of the research on the restoration of the blurred image. The theoretical model of atmospheric anisoplanatic imaging based on the Kirchhoff diffraction theory is set up. The atmospheric anisoplanatic effect can be expressed by multilayer phase screens. Light wave phase change of every dot on the object after atmosphere can be expressed by a phase screen, and phase size is the superposition of phases after each phase screen. The experiments are executed to test the proposed method, and finish the simulations of anisoplanatic imagings of starry, nebula, and moon craters. The experimental results show that the simulated image reflects the effect of atmospheric turbulence, diffraction and spatially variety on point spread function (PSF) from different field views. There is no ringing and edge effect in this anisoplanatic image.

Key words atmospheric optics; anisoplanatism; atmospheric turbulence; diffraction; image processing

OCIS codes 010.1290; 010.1330

1 引 言

一直以来大气湍流制约着望远镜对空间目标高分辨观测能力的发挥,在望远镜成像理论中,点目标在等晕角内的像面上像斑相同,系统(包括大气,以下同)点扩展函数(PSF)相同,具有线性空间不变性,超过等晕角视场范围,成像系统点扩展函数被认为与空间位置有关,这就是非等晕现象。在用于空间目标观测的望远镜成像中等晕角主要由大气部分

决定。目前,大部分的图像复原理论是建立在等晕成像基础上的,即所谓的卷积成像理论,图像复原范围仅适用于等晕角视场内像面。大视场空间目标图像远超出等晕角范围,大部分像面处于非等晕区域,给已有的图像复原带来新的技术问题,由此可见非等晕问题对获得大视场高分辨空间目标图像的重要性。

通常用随机相位屏来表示到达望远镜口径面上

收稿日期: 2013-10-07; 收到修改稿日期: 2013-11-14

作者简介: 罗 林(1963—),男,博士,教授,主要从事光电系统高分辨成像技术方面的研究。

E-mail: happyluolin@vip.163.com

的波前,模拟大气湍流对光波的影响。产生相位屏的方法可分为两类^[1]:一种是用二维的网格点来表示,称为取样法;另一种方法是用正交的基函数来表示,称为模式法。较通用的相位屏产生方法是基于傅里叶变换的取样法,由 McGlamery^[2]首先提出,自从斑点成像思想提出不久,他就用这种方法实现了用计算机模拟大气以至斑点成像的整个过程。模式法中,波前相位在口径上展开成一定的正交基函数级数,这些级数被用来生成随机相位屏,而 Zernike 多项式作为基函数,具有很大的优越性,所以被广泛用来生成相位屏^[3-4]。模式法的一个明显优点是,波前相位在整个口径面积上都得到了体现(不仅仅是有限的取样点),低频模式也得到了准确的表达。以上方法均可用于模拟相位屏的时间变化或非等晕带来的相关相位屏。模拟相位屏时间上的变化一般的方法是,生成一个比感兴趣口径面积大得多的相位屏,然后移动相位屏来模拟湍流横向吹过口径的效果^[5]。另一种方法是计算时间上或角度上(非等晕几何)分开的相位屏完全相关矩阵。

进行非等晕图像的模拟是研究该类图像复原的基础,可以把成像空间按等晕区大小分割成块,认为每块图像内的点扩展函数与位置无关,这样可以继续使用卷积成像形成分区图像,之后把图像拼接在一起,但拼接出的图像有一定的振铃和边缘效应^[6-7],当目标是多星或星云时,边缘效应并不明显^[8],同时可以从不同位置星点,看出明显的非等晕效应。当把大气湍流对波前相位的影响考虑成相位屏模型时,采用多层相位屏,用菲涅耳衍射成像理论,从目标面一层一层进行菲涅耳成像,一直到像面,该方法生成的非等晕图像避免了拼接时的边缘效应^[9]。本文从基尔霍夫衍射理论出发,模拟大气非等晕成像过程,把大气湍流等效为利用多层相位屏,生成不同目标位置在孔径面上的相位分布。

2 非等晕大气成像模型

大气层外目标通过望远镜成像,其成像过程如图 1 所示。当目标是天体时,目标上各点发出近似平面光波,通过大气层后,由于受到大气湍流扰动,其波前相位发生畸变,使成像面上的图像分辨率严重下降。大气湍流随时间变化,但在较短时间内(如 10 ms),可以认为不变,这时将大气湍流引起的相位变化作为一层薄相位屏,能较好地反映大气对成像光波波前的影响,并可以用一个点扩展函数表示整个成像空间的成像特性,但这种点扩展函数实际上

只适用于很小的视场范围。

在大多数情况下目标是扩展目标,视场范围超过等晕角,点扩展函数随不同空间位置变化,这时大气成像可以认为是非等晕成像,为了表示大气湍流对波前相位的影响,将原来一个相位屏用多层相位屏代替,本文中使用了 3 层相位屏。

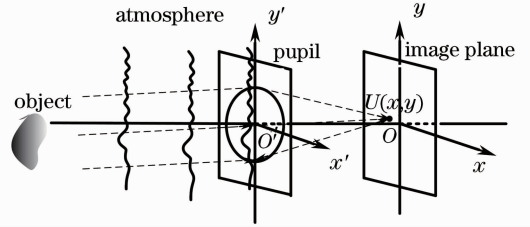


图 1 望远镜大气成像过程示意图

Fig. 1 Atmospheric turbulence imaging diagram of telescope

按照基尔霍夫衍射成像理论,目标通过大气,经望远镜光学系统在像面的振幅为

$$U(x, y) = \iint_{\Sigma} U'(x', y') \frac{\exp(jkr)}{r} dx' dy'. \quad (1)$$

式中 x, y 和 x', y' 分别是像面和孔径面上坐标, $r = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2 + f^2}$, f 是光学系统焦距, k 为光波波数, $U'(x', y')$ 为孔径面入射波,考虑目标近似位于无限远,通过望远镜口径后的振幅 $U'(x', y')$ 为

$$U'(x', y') = \exp[jk(x' \cos \alpha + y' \cos \beta)] \cdot \exp\left[-jk \frac{(x'^2 + y'^2)}{2f}\right] \exp[-j\phi(x', y')], \quad (2)$$

式中 $\phi(x', y')$ 是大气湍流引入的非等晕波前相位, α, β 是入射平面波方向余弦角, $\cos \alpha = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2 + f^2}}$, $\cos \beta = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2 + f^2}}$ 。

在像面上任一点图像强度为

$$I(x, y) = U(x, y) \cdot U^*(x, y). \quad (3)$$

图 2 表示非等晕相位屏形成过程,把大气引起的相位等效为 3 层薄相位屏,分别位于不同的高度,每一层相位屏相位起伏功率谱满足 Kolmogorov 统计分布模型,所产生的随机波前可以表示成

$$\phi(x, y) = C \iint_{-\infty}^{\infty} R(\mathbf{k}) \sqrt{F_{\phi}(\mathbf{k})} \exp[j(k_x x + k_y y)] dk_x dk_y, \quad (4)$$

式中 C 为常数, \mathbf{k} 为波矢, k_x, k_y 为波矢 \mathbf{k} 在 x, y 方向上的分量, $R(\mathbf{k})$ 是零均值、单位方差的复高斯随机过程, $F_{\phi}(\mathbf{k})$ 是具有 Kolmogorov 统计分布的相位起伏功率谱^[13],即

$$F_{\phi}(k) = 0.49 r_0^{-5/3} k^{-11/3}, \quad (5)$$

式中 r_0 是大气相干长度,它可以控制相位屏的随机特性。在估计整体大气湍流强度时,各层等效大气相干长度 r'_0 可表示为

$$r'_0 = r_0 \cdot M^{3/5}, \quad (6)$$

式中 M 是所取相位屏层数,这里取 3。如图 2 所示从目标上一点发出的一条光线,穿过 3 层相位屏,把光线与相位屏交点处的相位相加,得到光线穿过大气后的相位变化。对于目标上的每一点,取有限条光线,最后在孔径面形成新的相位分布,目标上的每一点对应一个孔径相位分布,可以表示为

$$\phi_{i,j}(x',y') = \phi(x',y') + \phi(x'',y'') + \phi(x''',y'''). \quad (7)$$

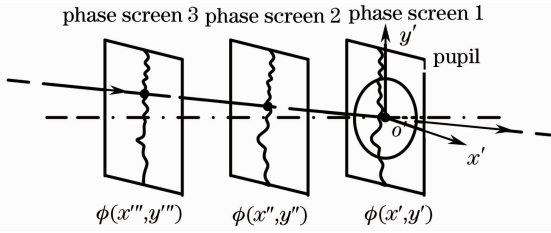


图 2 大气非等晕相位屏

Fig. 2 Atmospheric turbulence anisoplanatic phase screen

3 模拟计算结果

模拟计算中望远镜光学系统参数为:孔径为 1.2 m,焦距为 13 m,中心波长为 760 nm,大气相干长度为 10 cm,相位屏取 3 层,高度分别是 200, 6000, 10000 m。由功率谱 $F_\zeta(\mathbf{k})$ 产生的相位屏虽然简单,但由于空间采样点有限,其低频部分不足^[10],在模拟中考虑叠加次谐波进行低频补偿,修改后的相位屏数值模型为

$$\phi(m,n) = \sum_{p=1}^{N_p} \sum_{m'=-1}^1 \sum_{n'=-1}^1 R(m',n') f(m',n') \times \exp\left[i2\pi 3^{-p} \left(\frac{mm'}{N} + \frac{nn'}{N}\right)\right], \quad (8)$$

式中

$$f(m',n') = C \cdot 3^{-2p} r_0^{-5/6} (f_{lx}^2 + f_{ly}^2)^{-11/12}, \quad (9)$$

$$f_{lx} = 3^{-p} m' \Delta f_x, f_{ly} = 3^{-p} n' \Delta f_y, \quad (10)$$

其中将波数域转变到空间频率域 ($\mathbf{k} = 2\pi\mathbf{f}$), N 是相位屏 x, y 方向上的取样点, m, n 为整数。图 3 是单层相位屏,分别是不补偿低频和加入 $p = 3$ 级次谐波补偿低频的相位屏模拟结果,大气相干长度为 10 cm。

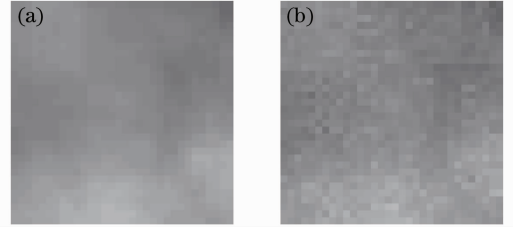


图 3 低频补偿相位屏。(a) 低频补偿前的结果; (b) 是(a)低频补偿后的结果

Fig. 3 Phase screen compensated by low frequency. (a) Without low frequency compensation; (b) with low frequency compensation

图 4 给出了相位屏结构函数补偿后模拟结果与理论值的比较。从图中看出,低频补偿后,结构函数明显地与理论值更接近。

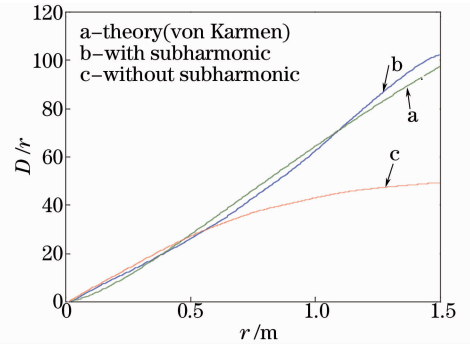


图 4 理论和模拟的结构函数

Fig. 4 Theoretical and simulated structure functions

图 5 为多星的大气成像模拟,图(a)是原始图,图(b)是衍射成像图,图(c)是大气非等晕图像,图中可以看到不同空间位置的点扩展程度不一样,此图显示点扩展函数在图中是位置变换函数,大气非等晕效应明显。

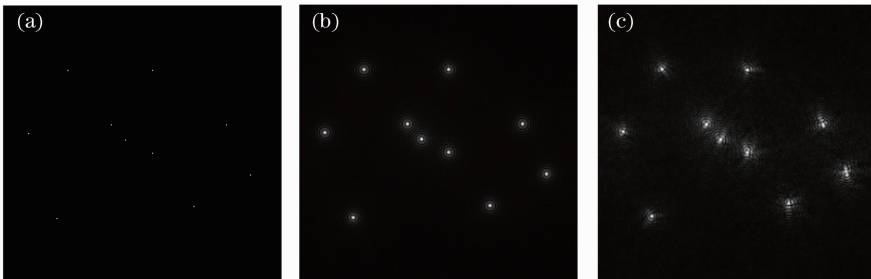


图 5 多星非等晕大气成像模拟。(a) 原始图; (b) 衍射成像图; (c) 非等晕成像图像

Fig. 5 Simulation of starry anisoplanatic atmospheric imaging. (a) Original image; (b) diffraction image; (c) anisoplanatic image

在与图 5 相同的条件下,进行了星云图的大气非等晕成像模拟。图 6(a)是文献[7]所用图像,图像大小 1024×1024 , 来源于 Space Telescope Science Institute (www. stsci. edu), 图(b)是衍射图,图(c)是大气非等晕图像。原始图中目标上每一

点发出一束近似平行的光束,在入瞳面上对应一个大气相位屏分布,总共有 1024×1024 个,每个相位屏大小为 408×408 ,当相位屏越小时,产生的衍射效应越显著,相位屏大小与望远镜孔径、像面 CCD 像素大小有关。

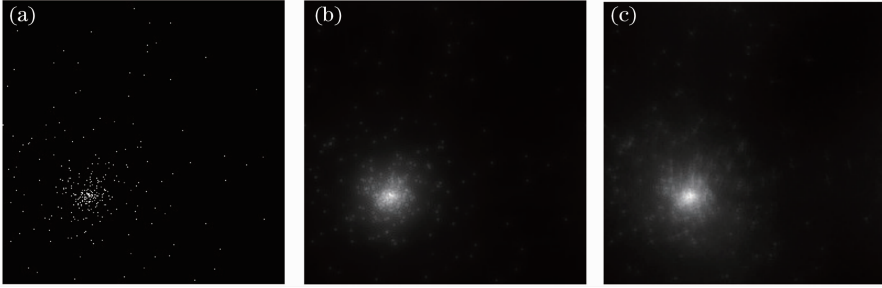


图 6 星云图大气非等晕成像模拟。(a) 原始图像;(b) 衍射图像;(c) 非等晕图像

Fig. 6 Simulation of nebula anisoplanatic imaging. (a) True image; (b) diffraction image; (c) anisoplanatic image

图 7 是月球表面陨石坑非等晕模拟图像,其中图(a)是来源于 NASA 月球表面陨石坑图像,图(b)是大气非等晕成像模拟图像。

的方法模拟的图像,大气非等晕效应明显,无拼接过程,因而不存在振铃和边缘效应,同时较逐层非涅耳成像方式,计算速度快,并能体现不同等晕角对成像的影响。

参 考 文 献

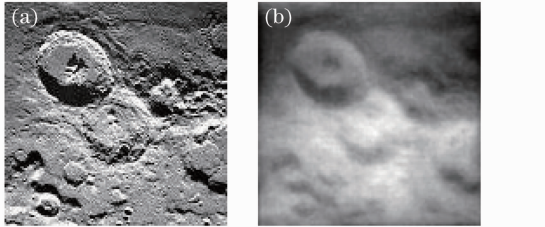


图 7 月球表面陨石坑非等晕模拟图像。

(a) 原始图;(b) 非等晕模拟图

Fig. 7 Simulation of moon craters anisoplanatic imaging.

(a) True image; (b) anisoplanatic image

4 结 论

根据基尔霍夫衍射成像理论,对地基望远镜观察天文目标成像过程进行了推导,建立了大气非等晕成像理论模型,其中近似认为目标位于无限远。采用多层相位屏表示大气湍流对成像波前相位的影响,目标物点发出不同角度的平行光束,穿过各层相位屏的不同位置,每层引起一定的相位变化,最后在孔径面上形成对应的相位分布。按实际望远镜成像系统参数进行了成像模拟实验,并确定成像面与孔径相位面的大小。通过对多星的模拟实验,显示了点扩展函数随空间位置的变化情况,同时对星云和月球表面进行了成像模拟。实验结果显示,所研究

- 1 Byron M Welsh. A Fourier series based atmospheric phase screen generator for simulating anisoplanatic geometries and temporal evolution[C]. SPIE, 1997, 3125: 327-338.
- 2 Benjamin L McGlamery. Computer simulation studies of compensation of turbulence degraded images[C]. SPIE, 1976, 74: 225-233.
- 3 Roddier N A. Atmospheric wavefront simulation using Zernike polynomials[J]. Opt Eng, 1990, 29(10): 1174-1180.
- 4 G ming Dai. Wavefront simulation for atmospheric turbulence [J]. SPIE, 1994, 2302: 62-72.
- 5 H Jakobsson. Simulations of time series of atmospherically distorted wave fronts[J]. Appl Opt, 1996, 35(9): 1561-1565.
- 6 M I Charnotskii. Anisoplanatic short-exposure imaging in turbulence[J]. J Opt Soc Am A, 1993, 10(3): 492-501.
- 7 G Cresci, R I Davies, A J Boker, et al.. Accounting for the anisoplanatic point spread function in deep wide-field adaptive optics images[J]. Arxiv Preprint Astro-Ph, 2005, 438: 757-767.
- 8 J Bardsley, S Jefferies, J Nagy, et al.. A computational method for the restoration of images with an unknown, spatially-varying blur[J]. Opt Express, 2006, 14(5): 1767-1782.
- 9 C J Carrano. Anisoplanatic performance of horizontal-path speckle imaging[C]. SPIE, 2003, 5162: 14-27.
- 10 R G Lane, A Glindemann, J C Dainty. Simulation of Kolmogorov phase screen[J]. Waves in Random Media, 1992, 2(3): 209-224.

栏目编辑:王晓琰