

文章编号: 0253-2239(2005)11-1447-5

天文望远镜像差对斑点成像技术的影响*

罗 林^{1,2,3} 廖 胜¹ 樊 敏² 沈 忙^{作 1}

1 中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 成都 610209
2 成都信息工程学院光电技术系, 成都 610041
3 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要: 着重研究了采用斑点成像技术处理天文望远镜图像时, 光学系统固定像差对图像恢复结果的影响。在详细研究各种恢复天文图像振幅和相位的理论和方法的基础上, 建立了一个包括 Labeyrie 振幅恢复方法和 Knox-Thompson 相位重构方法的恢复扩展目标的斑点成像处理模型, 分析了光学系统固定像差对系统传递函数相位分布和目标相位重构的影响; 天文目标通过大气成像, 固定像差将会被淹没在大气湍流随机起伏中, 像差对相位重构没有显著影响。处理图像结果表明, 斑点成像技术能同时消除大气湍流和望远镜系统固定像差的影响, 得到高分辨力的扩展目标图像。还提出了一种消除光学系统像差的方法。

关键词: 大气光学; 大气湍流; 斑点成像; 图像恢复; 像差

中图分类号: TH751 文献标识码: A

Effects of Large Telescope Aberrations on Speckle Imaging

Luo Lin^{1,2,3} Liao Sheng¹ Fan Min² Shen Mangzuo¹

1 State Key Lab of Optical Technologies for Microfabrication, Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209
2 Department of Optics and Electronics, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610041
3 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

Abstract: The effect of the optical system aberrations on the restoration imagery is investigated when the speckle imaging technique is used to process the images of the astronomic telescope. Under the basis of analyzing the method and the theory on the restoration of the modulus and the phase, a speckle imaging model which includes the Labeyrie's speckle interferometry and the Knox-Thompson imaging technique is presented. The effects of telescope aberrations on the involving the modulus and the phase of object Fourier transform due to the random wave front phase distribution of system transfer function and the restoration of the object phase are discussed. The deterministic optical aberrations are submerged in the random phase of the transfer function introduced by the atmospheric turbulence. The restoration image shows that the speckle imaging technique can remove the effects of the deterministic aberrations and atmospheric turbulence on the estimated images, and the high resolution image is obtained. A method of compensating optical system aberrations is proposed.

Key words: atmospheric optics; atmospheric turbulence; speckle imaging; image restoration; aberration

1 引 言

斑点成像技术是指对通过望远镜系统采集的一系列短曝光像进行事后图像处理, 来改进图像分辨率的方法。1970 年 Labeyrie 发表他在提高观察天体

目标分辨率的重要结果, 他论述了大气湍流的变化关系在一定的空间区域和时间范围内存在一定的相关性, 也就是空间的等晕性和时间变化上的凝固性, 大气湍流的作用相当于使到达望远镜孔径的波前相

* 国家 863 计划(863-2-7-7-4)资助课题。

作者简介: 罗 林(1963~), 男, 四川双流县人, 成都信息工程学院副教授, 中国科学院光电技术研究所在职博士研究生, 主要从事光电图像处理技术的研究。E-mail: happyluolin@vip.163.com

收稿日期: 2004-06-17; 收到修改稿日期: 2005-03-28

关性降低,对于单点目标而言,使其在像面呈现出弥散的斑点,即斑点图,但是他认为在时间的凝固性范围内,大气湍流的变化是凝固不变的,目标的斑点图反映了大气湍流的信息,而且其中包含了目标形状的高频部分,通过处理双星的斑点图,Labeyrie 从图像的功率谱得到双星的衍射极限估计,这就是所谓的斑点干涉术^[1~4];对于扩展目标,要有相位信息才能恢复出原始目标的图像,出现了 Knox-Thompson 交叉谱^[5~8]或双谱处理技术^[9,10],它们可以从短曝光像恢复出目标的相位,这两种技术都是针对通过随机扰动介质图像的处理,消除图像中随机像差的影响。但是由于望远镜生产加工和设计的因素,减小像差将巨大地加大各项成本,结果是望远镜系统存在着或多或少的固定像差,因此在实际中用斑点成像技术处理望远镜图像时将涉及固定像差的影响。

对于望远镜像差(以下称为固定像差)在斑点成像技术中的影响,有许多针对系统(包括大气)传递函数影响的研究成果^[11~13],一般集中在如斑点传递函数、Knox-Thompson 交叉谱传递函数和双谱传递函数的研究上,很少涉及斑点成像技术中固定像差对处理图像的影响,特别是对扩展目标图像的影响,没有把固定像差与恢复目标的振幅和相位联系在一起考虑。与以往研究不同的是,我们将直接针对固定像差对扩展目标处理图像的影响,并把这种影响与恢复的图像直接联系起来。

2 斑点成像模型

当目标通过大气成像时,如果把大气和望远镜看成一个系统,则目标的图像可以看成是目标和系统点扩展函数的卷积:

$$i(x) = o(x) * h(x), \quad (1)$$

这里 x 是二维坐标, $i(x)$ 、 $o(x)$ 、 $h(x)$ 分别表示目标图像、原始目标和系统点扩展函数。

无噪声情况下,利用傅里叶关系 $I(f) = O(f)H(f)$, 目标短曝光二阶矩(以下将模平方均值称为二阶矩)

$$\langle |I(f)|^2 \rangle = \langle |O(f)H(f)|^2 \rangle = |O(f)|^2 \langle |H(f)|^2 \rangle, \quad (2)$$

式中 $O(f)$ 、 $I(f)$ 、 $H(f)$ 分别是 $o(x)$ 、 $i(x)$ 和 $h(x)$ 的傅里叶变换, $H(f)$ 是系统传递函数,而且 $\langle |H(f)|^2 \rangle$ 包含的高频信息“传递”给了 $\langle |I(f)|^2 \rangle$ 。

如果能在目标的等晕区^[14]内找到一个点目标或参考星 $r(x)$, 则其通过系统的响应函数 $R(f)$ 可以代替系统的传递函数,如果采集到 K 帧目标短曝光像和 M 帧参考星短曝光像,由(2)式目标功率谱的估计值为

$$|O_{\text{est}}(f)| = |O(f)| \left[\frac{\sum_{i=1}^K |H_i(f)|^2 / K}{\sum_{j=1}^M |R_j(f)|^2 / M} \right]^{1/2}, \quad (3)$$

当所用的短曝光像足够多时,在大气的等晕区范围内,上式中分子分母的统计结果将趋于相等,结果有 $|O_{\text{est}}(f)| \approx |O(f)|$, 这样得到的目标振幅谱的估计包含了原始目标振幅衍射极限的信息。

对于扩展目标来说,相位的恢复是至关重要的。Knox-Thompson 交叉谱是目前广泛采用的相位恢复技术之一,定义 Knox-Thompson 交叉谱函数为

$$A(f, \Delta f) = I(f)I^*(f + \Delta f) = |A(f, \Delta f)| \exp[i\phi_a(f, \Delta f)], \quad (4)$$

其中 $\phi_a(f, \Delta f)$ 是交叉谱函数相位, Δf 是频率位移,对上式指数部分进行平均,那么

$$\langle \phi_a(f, \Delta f) \rangle = \phi_o(f) - \phi_o(f + \Delta f) + \langle \phi_H(f) \rangle - \langle \phi_H(f + \Delta f) \rangle, \quad (5)$$

其中 $\phi_o(f)$ 是目标的相位,它是固定不变的,均号可以去掉, $\phi_H(f)$ 是大气湍流引起的传递函数相位。如果用 $\Delta\phi_H(f)$ 表示频率面上相邻两点的相位之差,则有

$$\Delta\phi_H(f) = \langle \phi_H(f) \rangle - \langle \phi_H(f + \Delta f) \rangle, \quad (6)$$

在系统没有固定像差时,目标短曝光像的频谱相位总是在一个相对稳定的常数上下作微小起伏^[15],在一定频率位移范围内,频率面上相邻两点的相位之差近似为零,即 $\Delta\phi_H(f) \approx 0$,这是用交叉谱恢复相位的重要条件。因此

$$\Delta\phi_o(f) = \phi_o(f) - \phi_o(f + \Delta f) = \langle \phi_a(f, \Delta f) \rangle, \quad (7)$$

即在一定的频率位移内,目标的相位差等于短曝光像的交叉谱相位,这样应用数值积分技术通过对整个频率面上的目标相位差积分,可恢复出原始目标的相位。

3 计算机模拟分析

在整个的讨论和模拟中,假定大气统计特性是稳定的,折射率起伏是各向同性的。同时将选择大气的层状模型作为模拟的大气模型。这样湍流效应由一随机相位屏来代替,当望远镜存在固定像差时,

固定像差和大气湍流的影响一起可归结为系统入瞳面上的波前畸变,其光瞳函数为

$$\mathbf{P} = P_0(\mathbf{x}) \exp[jk\mathbf{W}_s(\mathbf{x}) + jk\mathbf{W}_D(\mathbf{x})] = P_0(\mathbf{x}) \exp[jk\mathbf{W}(\mathbf{x})], \quad (8)$$

这里 $P_0(\mathbf{x})$ 为光瞳函数, $\mathbf{W}(\mathbf{x})$ 为系统入瞳面上的波前畸变,分成两部分,其中 $\mathbf{W}_s(\mathbf{x})$ 为大气湍流引起的随机波前, $\mathbf{W}_D(\mathbf{x})$ 为固定像差引起的波前,这里忽略掉因吸收和散射所造成的光能损失。

固定像差主要考虑球差、彗差、象散、离焦和倾

斜等初级像差,但这种假定并不失一般性,引起的波前为^[16]

$$\mathbf{W}_D(x, y) = A(x^2 + y^2)^2 + Bx(x^2 + y^2) + C(x^2 + 3y^2) + D(x^2 + y^2) + Ey + Fx, \quad (9)$$

这里 x, y 是出瞳面上的坐标, A, B, C, D, E, F 分别是球差、彗差、象散、离焦和倾斜系数,其值由假定的最大波像差确定等于孔径边缘的像差。根据光学系统成像理论^[17],光学系统的传递函数等于它的光瞳函数的自相关,即

$$H(f) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} P_0(\mathbf{x}) P_0(\mathbf{f} - \lambda l' \mathbf{f}) \exp\{ik[\mathbf{W}(\mathbf{x}) - \mathbf{W}(\mathbf{x} - \lambda l' \mathbf{f})]\} d\mathbf{x}}{\int_{-\infty}^{+\infty} [P_0(\mathbf{x})]^2 d\mathbf{x}} = |H(f)|^2 \exp[i\phi_H(f)], \quad (10)$$

其中 l' 是成像距离, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, $\phi_H(f)$ 为大气湍流和固定像差引起的传递函数相位。

用相位屏模拟大气效应的主要思想是设计一个随机相位屏,其功率谱密度符合 Kolmogorov 或者 von Karman 谱统计特性。在简化条件下,随机相位屏^[18]

$$\phi(f) = C \iint_{-\infty}^{\infty} R(k_r) \sqrt{F_\phi(k_r)} \exp(ix \cdot k_r) dk_r, \quad (11)$$

这里 $F_\phi(k_r)$ 是与传播方向(z 轴方向)相垂直任一薄层切片上的大气功率谱^[19], $R(k_r)$ 是零均值、单位方差的厄米复高斯随机过程, C 为调节常数(可控制相位屏的方差),大气湍流的强弱由大气相干长度 r_0 调节,它与函数 $F_\phi(k_r)$ 的关系由下面两式确定:

$$r_0 = 0.185 \left[\lambda^2 \int_z^{z+\Delta z} C_n^2(\zeta) d\zeta \right]^{3/5}, \quad (12)$$

$$F_\phi(k_r) = 0.490 r_0^{-5/3} (k_r^2 + k_0^2)^{-11/6}, \quad (13)$$

$k_0 = 2\pi/L_0$, L_0 为大气湍流对应的外界尺寸,模拟中取 $L_0 = 10$ m。这样可以得到符合大气统计特性的随机波前,即

$$\mathbf{W}_s(\mathbf{x}) = \frac{\lambda}{2\pi} \phi(\mathbf{x}), \quad (14)$$

在计算机模拟时,在上式中加入固定像差,利用(10)式就模拟了大气湍流和固定像差产生的系统传递函数,以及在不同大气湍流和固定像差下,系统传递函数的相位分布。

归纳起来整个模拟包括如下步骤:

1) 生成符合大气统计特性的随机相位屏,加入固定像差,产生有固定像差情况下的系统传递函数,并分离出振幅和相位。通过与没有固定像差情况下

的系统传递函数比较,分析振幅和相位的变化。

2) 原始目标与系统传递函数复合,生成目标的短曝光像,包括有固定像差和无固定像差两种情况。

3) 计算目标短曝光像的功率谱,用(2)式得到原始目标振幅的估计。

4) 考虑无固定像差和有固定像差两种情况,分别计算目标短曝光像的频谱相位,分析它的相位变化,比较用交叉谱技术恢复相位后,固定像差对相位恢复的影响。

5) 复合所恢复的振幅和相位,得到原始目标的图像,并比较固定像差对原始目标图像恢复的影响,进而说明在应用斑点成像技术中固定像差的影响以及斑点成像对固定像差的作用。

在模拟过程中,假定望远镜的孔径为 $D = 1.8$ m,工作波长是 $\lambda = 700$ nm,大气相干长度 $r_0 = 10$ cm,由离焦、象散产生的最大波像差取 4λ ,所用目标短曝光像数为 100 帧。图 1 所示为三种情形下在归一化空间频率面上的系统传递函数的对数相位分布(纵坐标取 10 为底的对数值)。

图 1(a)显示了在没有大气湍流只有固定像差情况下系统传递函数相位分布,其特点是各点的相位起伏很大,相邻两点的相位之差远大于零,不满足用 Knox-Thompson 交叉谱技术恢复相位的条件,没有大气湍流影响时,使用 Knox-Thompson 交叉谱技术恢复相位会带来巨大的误差。与上述情况不同的是,在有大气湍流影响的情况下,系统传递函数的相位分布由剧烈起伏变得平缓均匀,各点的相位在一个常数上下作微小波动,如图 1(b)、图 1(c),使

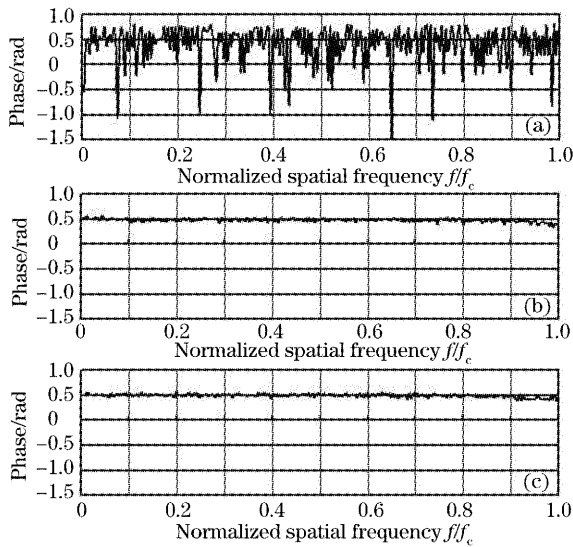


图 1 系统传递函数相位分布。(a)没有大气湍流,固定像差为离焦和像散的综合像差 4λ , (b)没有固定像差,大气相干长度 $r_0 = 10$ cm, (c)固定像差为离焦和像散的综合像差 4λ ,大气相干长度 $r_0 = 10$ cm

Fig. 1 Phase distribution of system transfer function. (a) No atmospheric turbulence, deterministic aberration 4λ , including defocus and astigmatism, (b) no deterministic aberration, atmosphere coherent length $r_0 = 10$ cm, (c) deterministic aberration (including defocus and astigmatism) 4λ , atmospheric coherent length $r_0 = 10$ cm

得相邻两点的相位之差近似为零,这样交叉谱的相位等于目标的相位差成立,满足使用 Knox-Thompson 交叉谱技术恢复相位的条件,同时说明,只要存在大气湍流或随机扰动的影响,无论系统有无固定像差,都会使系统传递函数相位分布变得平缓均匀,这时使用 Knox-Thompson 交叉谱技术可以恢复出目标的衍射极限相位,而固定像差对恢复几乎没有影响。

应用上面结论的一个重要推论,即在有固定像差的系统光路中加入随机扰动或随机相位屏,用 Knox-Thompson 交叉谱技术恢复相位,可以消除系统的固定像差,得到衍射极限的目标相位。

为了分析固定像差大小对传递函数相位的影响,定义 $\sigma_{\Delta\phi}^2$ 为相邻两点相位起伏的均方差,在大气相干长度 $r_0 = 10$ cm 时, $\sigma_{\Delta\phi}^2$ 随固定像差的变化如图 2 所示。

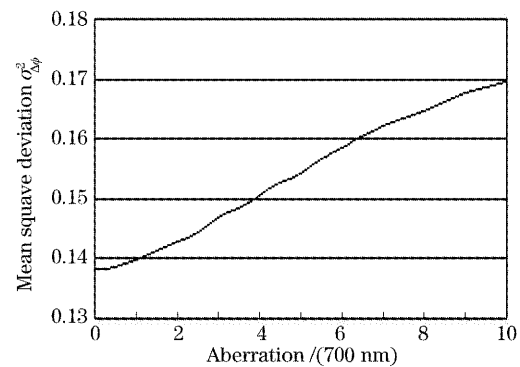


图 2 相邻两点相位起伏的均方差随固定像差大小的变化
Fig. 2 Variation of the phase variance of two adjacent spots' phase fluctuation with deterministic aberrations

可以看出,随系统固定像差的增加,相邻两点相位之差缓慢增加,但仍然接近于零,说明有随机扰动影响的情况下,系统传递函数的相位对固定像差不敏感,下面的恢复结果也说明了这一点。

4 图像恢复结果

用前面所建立的斑点成像处理模型,对土星的短曝光像进行了处理,处理时我们故意加了三个单星,以显示用该模型处理后图像的分辨能力,所用参量和前面所述相同。

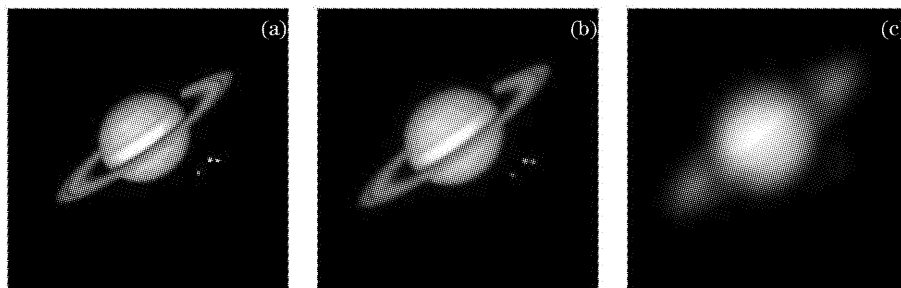


图 3 (a) 有三个单星的土星原始图像, (b) 理论衍射极限图像, (c) 固定像差图像

Fig. 3 (a) Original Saturn, (b) theoretical diffraction-limited image, (c) blurred image due to the deterministic aberration with no turbulent atmosphere

如图 3 所示,分别为土星的原始图像、望远镜的衍射成像和有固定像差的望远镜成像,其固定像差

是 4λ 的综合离焦和象散,图 3(c) 中三个单星由于像差的影响已完全不能分辨。图 4 是斑点成像处理

的结果,其中图 4(a)是有固定像差时望远镜的短曝光像,图 4(b)是它的处理结果,图像中的三个单星已清晰可见,处理后的图像表明:用斑点成像技术,不仅能消除大气湍流影响,而且可以消除系统中存在的固定像差。

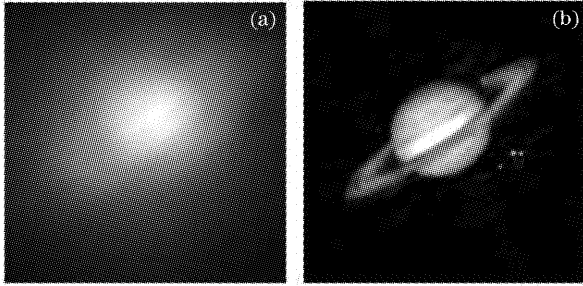


图 4 (a)大气相干长度 $r_0 = 10$ cm 和有综合像差包括离、像散 4λ 的短曝光像,(b)恢复图像

Fig. 4 (a) The short exposure image with an atmospheric coherent length, $r_0 = 10$ cm, 4λ defocus and astigmatism value, (b) Reconstructed image with no photo noise

5 结 论

本文建立一个能同时对扩展目标的振幅和相位进行恢复的斑点成像处理模型,用 Labeyrie 斑点干涉术恢复目标的振幅和用 Knox-Thompson 方法恢复目标的相位。用所建立的斑点成像处理模型,详细分析了望远镜固定像差对目标的振幅和相位的影响。

用斑点成像技术恢复空间扩展目标的振幅和相位,大气湍流和望远镜系统固定像差对振幅的恢复几乎不存在影响,对相位的恢复会产生一个可忽略的误差,但不影响相位重构的精度。计算实验模拟的结果表明,正是大气湍流引入的随机波相差综合掉了望远镜系统的固定像差,因此,在实际中应用斑点成像技术不仅能消除大气湍流的影响,同时也能把望远镜系统的固定像差去掉。

通过本项目的研究,可以得到了另一种补偿光学系统像差的方法:如果在光学系统的成像光路中加入随机相位屏,用斑点成像处理技术,将有可能消除系统固定像差的影响,得到衍射极限的图像。随着计算机技术的发展,这种方法的使用,将大大减少光学系统的设计和制造费用,具有重要的应用前景。

参 考 文 献

1 A. Labeyrie. Attainment of diffraction-limited resolution in large telescope by Fourier-analyzing speckle patterns in star images[J]. *Astron. Astrophys.*, 1970, **6**: 85~87

2 Shen Mangzuo. Application of speckle interferometry in the astronomy (overview)[J]. *Optical Engineering*, 1982, **9**(4): 49~62 (in Chinese)
沈忙作. 斑点干涉术在天文学中的应用(综述)[J]. *光学工程*, 1982, **9**(4): 49~62

3 Shen Mangzuo, Wang Weijian. Simulation experiments of a hybrid optical/digital image processing system applicable to stellar speckle interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 1984, **4**(1): 33~38 (in Chinese)
沈忙作,王伟建. 光学/数字混合图像处理用于星体斑点干涉术的模拟实验[J]. *光学学报*, 1984, **4**(1): 33~38

4 Shen Mangzuo, Wang Weijian. Simulation experiments of astronomical speckle interferometry [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 1984, **25**(3): 293~ (in Chinese)
沈忙作,王伟建. 星体斑点干涉术的实验模拟[J]. *天文学报*, 1984, **25**(3): 293~

5 Keith T. Knox, B. J. Thompson. Recovery of images from atmospherically degraded short exposure photographs [J]. *Astrophys. J.*, 1974, **193**: L45~L48

6 G. R. Ayers, M. J. Northcott, J. C. Dainty. Knox Thompson and triple correlation imaging through atmospheric turbulence [J]. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1988, **5**(7): 963~985

7 Keith T. Knox. Image retrieval from astronomical speckle patterns[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**(11): 1236~1239

8 R. V. Stachnik, P. Nisenson, D. C. Ehn *et al.*. Speckle image reconstruction of solar features[J]. *Nature*, 1977, **266**: 149~151

9 G. P. Weigelt. Modified astronomical speckle interferometer 'speckle masking'[J]. *Opt. Commun.*, 1977, **21**: 55~59

10 Adolf Lohmann, Gerd Weigelt, Bernhard Wirtzner. Speckle masking in astronomy: triple correlation theory and applications [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24): 4028~4037

11 R. Barakat, P. Nisenson. Influence of the wave-front correlation function and deterministic wave-front aberration on the speckle image-reconstruction problem in the high-light-level regime[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1981, **71**: 1390~1402

12 Richard Barakat, Steven Ebstein. Bispectral diffraction imagery. I. The bispectral optical transfer function[J]. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1987, **4**(9): 1756~1763

13 J. Y. Zhang, J. C. Dainty. Effects of aberrations on transfer functions used in high angular resolution astronomical imaging [J]. *J. Mod. Opt.*, 1992, **39**(12): 2383~2404

14 D. L. Fried. Limiting resolution looking down through the atmosphere[J]. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1966, **56**(10): 1380~1384

15 Oskar von der Luehe. Signal transfer function of the Knox-Thompson speckle imaging technique [J]. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1988, **5**(5): 721~729

16 D. Malacara. *Optical Shop Testing* [M]. Wiley-Interscience, 1992. 461

17 J. W. Goodman. *Statistical Optics* [M]. Qing Kecheng, Liu Peishen, Cao Qizhi transl., Beijing: Science Press, 1992
J. W. 顾德门 著. 统计光学[M]. 秦克诚,刘培森,曹其智 等译. 北京: 科学出版社, 1992

18 Yang Lianchen, Shen Mangzuo, Guo Yonghong. The speckle imaging simulation of space objects[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(12): 1108~1112 (in Chinese)
杨连臣,沈忙作,郭永洪. 天体目标斑点成像的模拟[J]. *光子学报*, 2000, **29**(12): 1108~1112

19 V. T. Tatarski. *Wave Propagation in a Turbulent Medium* [M]. Wen Jinggao, Song Zhengfang transl., Beijing: Science Press, 1978
塔塔尔斯基 著. 湍流大气中波的传播理论[M]. 温景嵩,宋正方,曹宗泳 等译. 北京: 科学出版社, 1978