

基于自适应光学成像非等晕效应的空变点扩展函数估计模型

常 翔 李荣旺 熊耀恒

(中国科学院国家天文台 云南天文台, 云南 昆明 650011)

摘要 针对湍流扰动波前改正的天文自适应补偿成像系统由于等晕区存在而限制了观测视场内有效的补偿区域。这对通过自适应光学系统获取的天文实测数据的充分利用造成很大不便。通过对自适应光学系统空域统计特性的分析,得到空变点扩展函数的成像系统描述。在此基础上,依据大气光学统计理论,通过多相位屏分层大气湍流模型,提出一种利用数值模拟估计空变点扩展函数的方法。结合实际观测条件和自适应光学系统特性,给出运用该方法建立天文自适应成像系统空变点扩展函数估计模型的实例。并将所得模型用于对天文实测图像的重建,结果表明其对系统补偿残差和非等晕效应对成像结果造成的影响有明显改善,验证了该模型的有效性。

关键词 自适应光学;统计光学;天文成像;点扩展函数

中图分类号 P427.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.1201001

Predicted Space-Varying Point Spread Function Model for Anisoplanatic Adaptive Optics Imaging

Chang Xiang Li Rongwang Xiong Yaoheng

(Yunnan Observatory of National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming, Yunnan 650011, China)

Abstract The point spread function (PSF) of an adaptive optics (AO) system evolves in larger region than isoplanatic patch in the field of view (FOV). This variation strongly limits the efficient utilization of AO images. A theoretical expression of this space-varying PSF is derived by analysis of characteristics of AO imaging system. Then by combining the space-field statistical characteristics of AO compensation and atmospheric turbulence theory a predicted space-varying parameter PSF model for AO systems is developed and the effectiveness of the model is also tested by employing the predicted space-varying PSF model in reconstruction of AO astronomical image with deconvolution method, which can reduce effects of residual wave-front distortion and anisoplanatism on AO system's partial compensated astronomical images.

Key words adaptive optics (AO); statistical optics; astronomical imaging; point spread function

OCIS codes 010.1080; 350.1260; 110.0115

1 引 言

在实际地基天文光学观测中,满足线性空(间)不变条件的成像视场是由基于等晕条件的空间相干性决定的。Fried^[1]首先针对自适应光学(AO)波前补偿分析了等晕区问题,并定义等晕角 θ_0 表征大气空间尺度上线性空不变范围,其值在可见光波段的

垂直传播路径上一般仅为几个角秒。对于视场角大于等晕角 θ_0 的AO补偿成像,成像系统将不再是线性空不变的,自适应光学成像系统点扩展函数(AO-PSF)会随着视场角的增大而逐渐退化。对于AO系统的成像非等晕效应,一个直观理解就是:以波前探测参考星为中心,超过 θ_0 角以外的区域,其波前

收稿日期: 2011-05-25; 收到修改稿日期: 2011-06-07

基金项目: 国家自然科学基金(10978025)资助课题。

作者简介: 常翔(1981—),男,博士研究生,主要从事天文实测和自适应光学等方面的研究。

E-mail: changxiang@yao.ac.cn

导师简介: 熊耀恒(1955—),男,博士,研究员,主要从事自适应光学和激光测月等方面的研究。E-mail: xyh@yao.ac.cn

起伏不再与探测到的波前一致。这样, AO 系统就无法对 θ_0 以外观测视场内区域的湍流影响进行有效补偿。由于非等晕成像效应的存在, 极大限制了 AO 部分补偿的成像效果, 同时也限制了反卷积一类后处理技术对图像的重建和观测数据的有效利用。

为研究非等晕成像特性, 并针对一系列采用 AO 补偿成像系统的新设备所取得天文数据处理^[2,3], 本文给出了一种以视场角为参数来估计成像系统点扩展函数(PSF)的方法。首先通过对 AO 补偿成像系统 PSF 与视场角的关系, Fried 参数 r_0 对 PSF 的影响以及 PSF 的几何对称性等空域统计特性的分析, 得到考虑非等晕效应的天文 AO 成像系统理论描述。然后, 结合基于大气光学统计理论的多相位屏湍流分层模型, 并依据实际观测条件和系统特性, 用蒙特-卡罗(Monte-Carlo)模拟方法建立 AO-PSF。随视场角变化的参数模型, 从而获得对实际天文 AO 成像系统较准确的数理描述。最后为验证所得空变 AO-PSF 的有效性, 将模型用于对 AO 系统实测天文图像进行重建, 并给出了实验结果。

2 AO-PSF 空域统计特性分析

在依据 Shell 定理强度卷积所描述的非相干成像系统基础上^[4], 此处定义被测目标强度为 $I_o(\theta')$, 其中 θ 表示角间隔, θ' 为光源面(或物面)上距离视场中心的角间隔, 并假设波前探测参考点在视场中心, 即位于光轴上。观测视场大于非等晕区的 AO 补偿成像过程可表示为

$$I_i(\theta) = I_o(\theta') * |h(\theta, \theta')|^2 + \xi(\theta), \quad (1)$$

式中符号 $*$ 表示卷积, $\xi(\theta)$ 为零均值加性噪声, $|h(\theta, \theta')|^2$ 表示空间变化的长曝光 PSF。根据傅里叶光学可知, h 可由成像系统光学传递函数(OTF) \mathcal{H} 的傅里叶逆变换得到, 而整个视场内 PSF 的准确信息就可描述成像光学系统。而对于 AO-PSF 的估计则需要用到补偿残余波前的二阶统计矩。

通常, 对天文成像系统是将 OTF 分离为大气 OTF 和望远镜 OTF 来进行分析:

$$\mathcal{H}(\mathbf{f}) = \mathcal{H}_{\text{atm}}(\mathbf{f}) \times \mathcal{H}_{\text{tel}}(\mathbf{f}). \quad (2)$$

当加入 AO 补偿时, 考虑将 AO 对湍流波前补偿效果并入 $\mathcal{H}_{\text{atm}}(\mathbf{f})$ 来考虑, 并定义 $\mathcal{H}_A(\mathbf{f})$ 为大气-自适应光学传递函数。根据 Rytov 方法所得经典湍流微扰理论结果, 在望远镜光瞳上的湍流相位是服从 Gauss 分布的平稳随机过程^[5]。而根据 V6ran

等^[6]的研究结果, 在长曝光情况下, 经 AO 校正后的波前相位仍然是准平稳随机过程。在这一假设下, 大气-自适应光学长曝光传递函数就可以表述为

$$\mathcal{H}_A(\mathbf{f}) = \exp\left[-\frac{1}{2}D_A(\lambda z_f \mathbf{f})\right], \quad (3)$$

式中 $D_A(\lambda z_f \mathbf{f})$ 是残余波前相位结构函数, z_f 为成像系统焦距。且有

$$D_A(\lambda z_f \mathbf{f}) = D_A(\mathbf{r}_P) = \langle [\phi_{\text{res}}(\mathbf{r}) - \phi_{\text{res}}(\mathbf{r} + \mathbf{r}_P)]^2 \rangle, \quad (4)$$

式中 $\phi_{\text{res}}(\mathbf{r})$ 为 AO 校正后的残余波前相位, \mathbf{r}_P 为望远镜光瞳内空间间隔矢量。

为了考虑全视场内的非等晕效应, 以下根据 Voitsekovich^[7]和 Fusco^[8]的分析, 将 $D_A(\lambda z_f \mathbf{f})$ 分离为轴上(等晕)结构函数和非等晕(离轴)结构函数和的形式, 可将表示非等晕效应的结构函数分离出来, 并利用离轴角间隔 θ 作参数化表示有

$$D_A(\mathbf{r}_P) = D_0(\mathbf{r}_P) + D_{\text{ani}}(\mathbf{r}_P, \theta), \quad (5)$$

式中非等晕结构函数定义为

$$D_{\text{ani}}(\mathbf{r}_P, \theta) = \langle [\phi_{\text{res}, \theta}(\mathbf{r}) - \phi_{\text{res}, \theta}(\mathbf{r} + \mathbf{r}_P)]^2 - [\phi_{\text{res}, 0}(\mathbf{r}) - \phi_{\text{res}, 0}(\mathbf{r} + \mathbf{r}_P)]^2 \rangle, \quad (6)$$

这样就得到“非等晕成像光学传递函数”:

$$\mathcal{H}_{\text{ani}}(\mathbf{f}, \theta) = \exp\left[-\frac{1}{2}D_{\text{ani}}(\lambda z_f \mathbf{f}, \theta)\right]. \quad (7)$$

大气-自适应光学长曝光传递函数可以表示为“等晕”和“非等晕”OTF 乘积的形式

$$\mathcal{H}(\mathbf{f}) = \mathcal{H}_0(\mathbf{f}) \times \mathcal{H}_{\text{ani}}(\mathbf{f}, \theta), \quad (8)$$

整个天文 AO 成像补偿系统的 OTF 就为

$$\mathcal{H}(\mathbf{f}) = \mathcal{H}_0(\mathbf{f}) \times \mathcal{H}_{\text{ani}}(\mathbf{f}, \theta) \times \mathcal{H}_{\text{tel}}(\mathbf{f}). \quad (9)$$

为了得到 $\mathcal{H}_{\text{ani}}(\mathbf{f}, \theta)$ 的理论表达, 就需要计算得到 $D_{\text{ani}}(\mathbf{r}_P, \theta)$ 。根据 Noll 定义的泽尼克(Zernike)多项式^[9], 对波前做模式重构。此处假设 AO 系统可完全补偿前 $i = n_Z$ 阶 Zernike 波前模式, 则有

$$\phi_{\text{res}, 0} = 2\pi \sum_{i=n_Z+1}^{\infty} a_i(0) Z_i(\mathbf{r}), \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \phi_{\text{res}, \theta}(\mathbf{r}) = & 2\pi \sum_{i=2}^{n_Z} [a_i(\theta) - a_i(0)] Z_i(\mathbf{r}) + \\ & 2\pi \sum_{i=n_Z+1}^{\infty} a_i(\theta) Z_i(\mathbf{r}), \end{aligned} \quad (11)$$

(10), (11)式分别为“等晕”残余相位和“非等晕”残余相位; 同样地, 其中的 $a_i(0)$, $a_i(\theta)$ 分别为轴上 Zernike 多项式系数和离轴 Zernike 系数。由此, 可以得到 $D_{\text{ani}}(\mathbf{r}_P, \theta)$ 的理论表达式为

$$D_{\text{ani}}(\mathbf{r}_P, \theta) = \sum_{i=1}^{n_Z} \sum_{j=1}^{\infty} 2[\Gamma_a(0) - \Gamma_a(\theta)] Z_{i,j}(\mathbf{r}_P), \quad (12)$$

式中 $\Gamma_a(\theta)$ 为 Zernike 系数 a_i, a_j 的角度互相关, 且有

$$\Gamma_a(\theta_2 - \theta_1) = \Gamma_a(\theta_1 - \theta_2) = \langle a_i(\theta_1) a_j(\theta_2) \rangle, \quad (13)$$

而 $Z_{i,j}$ 在此处为 Zernike 模式相关函数。 $\Gamma_a(\theta)$ 可在已知相位功率谱, 即已知大气条件下计算得到。

通过(7),(9)和(12)式, 就可以得到长曝光下的天文 AO 成像系统 OTF。其中(12)式表征了视场内的非等晕成像效果。

由于假设波前探测参考星在光轴上, 则成像的非等晕效应可通过离轴 PSF 得到直观的体现, 而非等晕性有关的则是湍流扰动波前。也就是说, 对于一个厚度为 Δz 的湍流层, 与参考星(即离轴)空间间隔为 θ 的系统 PSF 性质可通过 $\theta\Delta z$ 位置的波前起伏结构函数方差 σ_{ami}^2 来表征。在实际观测中, 对于多层垂直结构分布的湍流大气, 可取权重平均 \bar{h} , 近似得到整个湍流层的等效厚度。在本文中仅考虑近天顶观测情况, 则有 $\Delta z \approx \bar{h}$, 若考虑不同天顶角 ζ 时的情况则取 $\Delta z = \bar{h}/\cos \zeta$ 。根据 Fried^[1] 和 F. Roddier^[10] 的分析结果就有

$$\sigma_{\text{ami}}^2(\theta) = 6.88(\theta\Delta z/r_0)^{5/3}, \quad (14)$$

据此可以得到 θ_0 与 r_0 相关的计算式

$$\theta_0 = (6.88)^{-3/5} \frac{r_0}{\Delta z} = 0.314 \frac{r_0}{\Delta z}. \quad (15)$$

由(15)式得到的 θ_0 , 就可将(14)式写为 $\sigma_{\text{ami}}^2(\theta) = (\theta/\theta_0)^{5/3}$ 。由此得到斯特雷尔比(Strehl ratio)值与角间隔 θ 的指数关系^[11]

$$R_s \propto \exp[-(\theta/\theta_0)^{5/3}]. \quad (16)$$

除上述性质外, 根据折射率起伏的各向同性假设, 离轴 PSF 具有圆对称的几何性质。如图 1 所示, 图中浅色圆圈代表成像面各个线性空不变区域内的 PSF。由于非等晕成像效应导致沿 r 轴向上 PSF 随距轴上点角间隔 θ 的增大而拉长。在上图中通过旋转角 α , 引入与 r 轴正交的 r_{\perp} 方向。通过定义新的参考系 (r, r_{\perp}) , 就可以方便地表示离轴 PSF 为 $\text{PSF}_{\theta}(n\theta_0, \alpha)$, 其中 n 为整数, 即表示不同的空不变间隔。这样, 只要得到沿 r 轴上不同空不变区域的 PSF, 就可以得到对整个空间变化的观测视场完整的线性系统描述。通过以上离轴 PSF 空域特性的分析, 就得到了非等晕成像的空变线性系统近似。

3 离轴 AO-PSF 估计模型

在上述分析基础上, 可依据实际观测条件和 AO 成像系统特性, 通过数值模拟方式获得长曝光

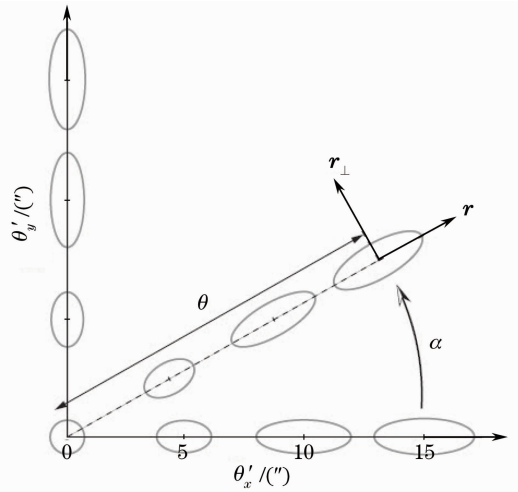


图 1 离轴 PSF 的圆对称性质示意

Fig. 1 Schematic of circular symmetry of the off-axis PSF

离轴 PSF 的准确估计。根据实测波前数据, 通过模式去除的方法估计轴上长曝光 PSF。最终可得与系统匹配的空变 PSF 参数化模型。

本模型针对 AO 补偿成像非等晕特性的研究基于云南天文台 1.2 m 望远镜 61 单元 AO 成像补偿系统, 因此其中的讨论和分析都依据这一类型的 AO 成像补偿系统来进行。但所提空变 AO-PSF 估计模型建立方法同样适用于其他 AO 系统。

与云南天文台 1.2 m 望远镜结合的 61 单元 AO 补偿成像系统是一种典型的采用倾斜镜(TM)和变形镜(DM)两级改正单元, 使用哈特曼-夏克(Hartmann-Shack)波前传感器, 并以目标本身作为自然导星的天文 AO 成像系统。系统的波前传感器和成像系统参数由表 1 给出。

对离轴 AO-PSF 的数值仿真可通过两种不同方法实现。其中一种较为直观的方式是直接模拟离轴点源的光传播过程, 及补偿成像过程来获得 PSF 估计^[12]。但这种方式在处理过程中, 由于计算量巨大, 以此进行 Monte-Carlo 模拟显得效率较低。此外, 更主要的是这种方式无法获得光瞳面上完整的相位分布, 从而无法对 AO 补偿的模式去除进行仿真。只能通过对大气层次模型中各层对应的薄相位屏进行模式去除处理来模拟, 这与实际系统相去甚远, 仿真结果无法得到系统准确的长曝光 PSF。

而从 AO 补偿成像非等晕性的物理意义进行考虑, 以不同角度入射的光线在湍流大气中经历与轴上垂直入射光线不同的波前畸变, 而 AO 系统以对轴上光线进行探测和补偿效果对斜入射光线进行补偿就造成了补偿成像的非等晕效应。如图 2 所示,

以 θ 角入射的光线在湍流大气分层模型中每一层对应的薄相位屏上都与轴上光线有间隔为 θz_i 的位置差。在忽略闪烁效应的前提下,可将各层相位上对

应位置做简单叠加来获得光瞳上离轴的相位起伏^[8]

$$\varphi_0(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^{n_z} \phi_{n_z}(\mathbf{r} + \theta z_i), \quad (17)$$

表 1 云南天文台 1.2 m 望远镜 61 单元 AO 波前传感器和成像系统参数

Table 1 Specifications of AO wave-front sensor and imaging system of Yunnan Observatory 1.2 m 61-element

System	Parameter
Hartmann-Shack wavefront sensor	
Lens array:	9×9 hexagon lens array
Sub-aperture size:	12.5 cm × 10.8 cm
Frame rate:	500, 1000, 2000 Hz selectable
Wavelengths for H-S sensor & imaging:	400~700 nm and 700~1000 nm respectively
Observed star:	6 ^m
Imaging system	
Focal length:	42100 mm
Detector:	EMCCD, 652×492, 7.4 μm×7.4 μm
Field of view for imaging system:	24"×18"

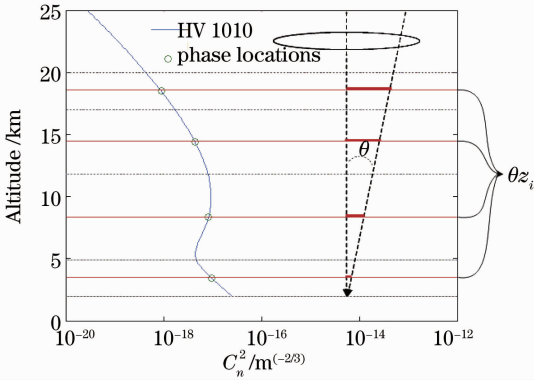


图 2 非等晕成像仿真方法说明

Fig. 2 Schematic representation of anisoplanatic imaging simulation method

在数值模拟中,利用次谐波补偿的谱反演方法生成各湍流层随机相位屏 $\phi_{n_z}(\mathbf{r})$ ^[13, 14],根据(17)式对每层相位屏移动叠加来得到相应 θ 角入射光线最终在望远镜光瞳上经历的相位起伏。

表 2 湍流大气 4 层模型各层等效参数

Table 2 4 layers turbulence model equivalent parameters

	Phase locations	Layer width	$\lambda=0.8 \mu\text{m}$
$z_n=20$	$z_4=18.497$	$\Delta z_4=3.0066$	$r_{04}=108.32$
	$z_3=14.392$	$\Delta z_3=5.2033$	$r_{03}=30.34$
	$z_2=8.323$	$\Delta z_2=6.9336$	$r_{02}=19.14$
	$z_1=3.428$	$\Delta z_1=2.8565$	$r_{01}=25.51$
$z_0=2$			$r_0=12 \text{ cm}$

根据云台 1.2 m 望远镜 61 单元 AO 成像补偿系统的性能^[15, 16],一般情况下该系统对波前扰动的补偿可等效为对前 35 阶 Zernike 模式的校正。由此,在对 AO 成像非等晕性分析的数值仿真过程中,假设系统可对前 35 阶 Zernike 模式完全校正,即设(9)式中轴上 $\mathcal{H}_0(f)$ 为前 35 阶 Zernike 模式完全去除后的 OTF。

仿真得到的空变 AO-PSF 如图 3 所示。所示结果以间隔 1",给出半视场内的离轴 PSF。图中为 1000 次叠加平均后的长曝光 AO-PSF 结果,在半视场内连续。图中 3(a), (b) 分别给出了 AO 开环和闭环时的情况。其中,开环即为去除前 3 阶 Zernike 模式,闭环即为去除前 35 阶 Zernike 模式。

此处依据云南天文台 1.2 m 望远镜 61 单元 AO 补偿成像系统实际参数进行数值建模,并依据云南天文台夜间大气条件,设 $r_0=12 \text{ cm}$,波长为 $0.8 \mu\text{m}$ 。使用图 2 中所示 4 层湍流大气模型模拟实际观测条件。观测站址海拔 2 km,仅考虑海拔 20 km 以下的湍流影响,各湍流层相应间隔和相位屏位置,以及对应 r_0 如表 2 所示。

对上图结果进行分析,可明显看出 AO 补偿成像的非等晕效应。在 AO 开环时,轴上与离轴 PSF 的 R_s 值都在 2.5% 以下,且差别不大,非等晕成像效果并不明显。在 AO 闭环工作时,其波前补偿效果可使轴上 PSF 的 R_s 值达到 40%,但却随离轴间隔增大,SR 值降低,补偿效果迅速减弱。离轴间隔 3" 以外区域 PSF 的 R_s 值降到 5% 以下,而 5" 以外的值更是低于 2.5%,与图 5(a) 中的结果相当,近乎于没有 AO 补偿的效果。

系统全视场为 20"。按照(17)式,每 4 个相位屏做相应位移后在望远镜口径上的叠加结果为离轴光瞳的一次实现;一次实现内对不同的 θ 做相应位移得到不同的离轴光瞳,以此计算 10" 半视场内不同 PSF 的一次实现,即偏离不同角度 θ 且在大气相干时间内的短曝光离轴 PSF。借助 Monte-Carlo 方法做多次短曝光后的系综平均即得到长曝光离轴 PSF 仿真结果。

图 3 的估计结果正确反映了相关理论和实际情

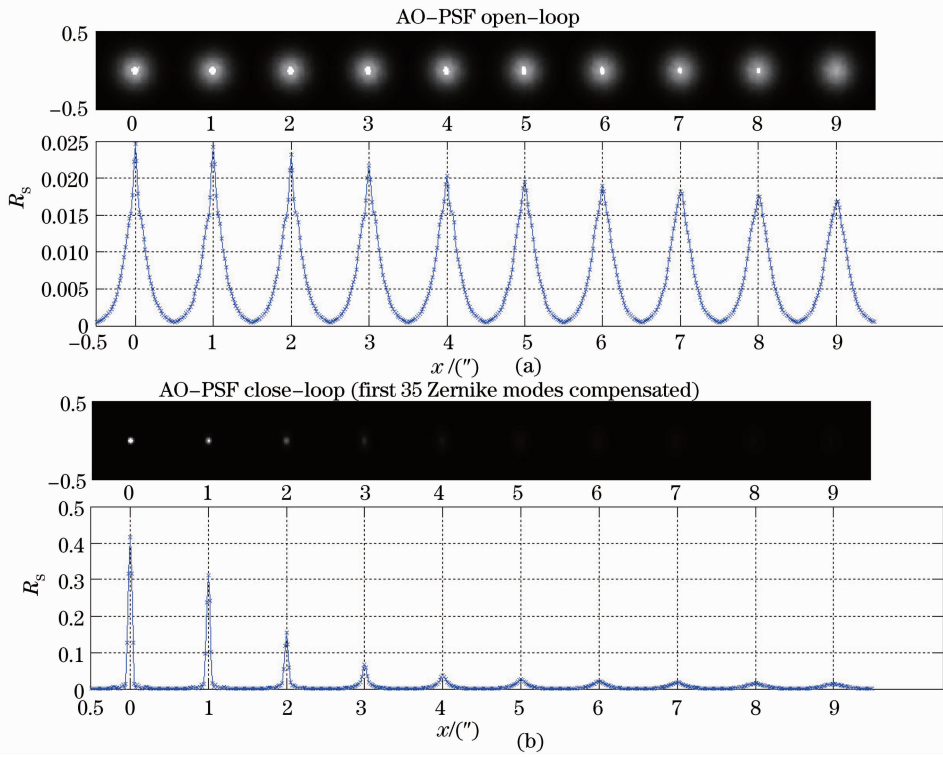


图3 空变 AO-PSF 估计结果。(a)为 AO 开环时离轴 PSF;(b)为 AO 闭环时的离轴 PSF。每幅图中上方为离轴 PSF 的 2D 视图,下方为对应的沿 y 轴截面廓线图;横坐标对应半视场宽度;截面廓线图纵坐标为离轴 PSF 的 R_s 值

Fig.3 Predicted space-varying off-axis AO-PSF. (a) The off-axis AO-PSF of open-loop AO system; (b) the off-axis AO-PSF of close-loop AO system. Both sub-picture have the 2D vision in upper part and y -axis cut-off profile in lower part of each sub-figure, respectively, abscissa corresponds half width of view field. The Strehl ratio has been given in each y -axis cut-off profile

况,在验证仿真方法正确性的同时也是对 AO 补偿成像非等晕效应的一个直观理解。通过上述数值方法,就可建立以距离参考星角间隔 θ 为参数建立非等晕 AO-PSF 的估计模型。

在此为针对非等晕成像的 AO 补偿图像重建,利用上述方法建立一个 AO-PSF 估计模型。考虑等晕角约为 $2''$,等效为 $2'' \times 2''$ 的正方形等晕区。依据图 1 所示的离轴 PSF 圆对称性质,取 $10''$ 视场建立一个 5×5 网格的空变 AO-PSF 模型。依据不同角间隔 θ 计算,得到与观测视场对应的空变 AO-PSF 估计模型,如图 4 所示。

4 模型有效性验证

为验证所得空变 AO-PSF 模型的有效性,对经过 AO 部分补偿的实测天文图像进行重建。重建过程主要针对 AO 成像非等晕效应的去除和抑制。此处并不涉及图像处理技术领域较为宽泛和复杂的内容。针对基于(1)式的图像反卷积重建,仅使用目前较为成熟且被广泛使用的 Lucy-Richardson 算法。

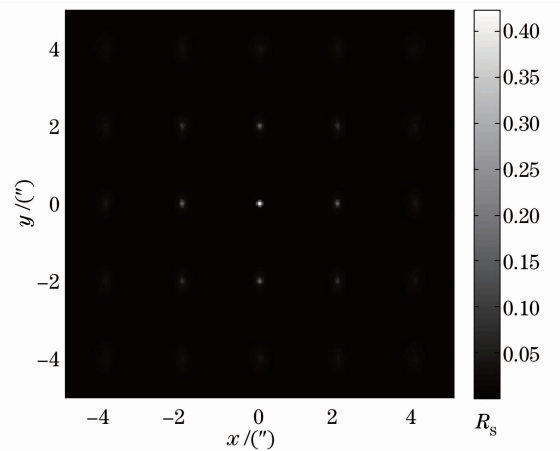


图4 对应 $10''$ 观测视场的离轴 AO-PSF 估计模型

Fig.4 Predicted off-axis space-varying AO-PSF model corresponding to $10''$ field of view

旨在验证离轴 AO-PSF 参数化估计模型的正确性和对非等晕成像结果处理的有效性。

图像的反卷积算法中, Lucy-Richardson 算法是对空不变成像结果重建的经典方法^[17]。该算法也是天文数据处理中的常用方法,可在泊松(Poisson)

噪声模型下得到目标图像的最大似然估计 (Maximum Likelihood)^[18]。

在天文观测中使用 CCD 探测器,各个独立像元

使图像噪声呈 Poisson 分布。按照贝叶斯 (Bayesian)估计,图像的条件概率密度就为

$$p(I_i | I_o) = \prod_{n,m} \frac{[I_o(x_n, y_m) * h(x_n, y_m)]^{I_i(x_n, y_m)} \exp[-I_o(x_n, y_m) * h(x_n, y_m)]}{I_i(x_n, y_m)!}, \quad (18)$$

式中 n, m 表示离散像元。(18)式通常称为图像的 Poisson 分布似然函数。其值可通过求导计算,当取最大值 1 时有(设 PSF 归一化为 1)

$$\frac{I_i}{h * \tilde{I}_o} * h = 1, \quad (19)$$

式中 \tilde{I}_o 为目标图像估计结果。对(19)式使用迭代方法计算就得到

$$\tilde{I}_o^{k+1} = \tilde{I}_o^k * \left[\left(\frac{I_i}{\tilde{I}_o^k * h_\theta^{\text{mod}}} \right) * h_\theta^{\text{mod}} \right], \quad (20)$$

式中 h_θ^{mod} 表示离轴 AO-PSF 估计模型。最终计算得到 k 次迭代后的目标估计图像。

在实现中,利用通常对空变图像反卷积的区块

处理(Block processing)方式,将原观测数据划分为近似等晕子区。根据(20)式对每个图像的等晕子区与相对应的离轴 AO-PSF 分别做反卷积重建。最后将各个子区重建图像拼接,就得到了最后的 AO 非等晕图像重建结果。

利上述方法对实测图像进行重建,此处使用的是 2008 年利用云南天文台 1.2 m 望远镜 AO 系统对面源天文目标火星观测获得的成像结果,如图 5(a)所示。在利用离轴 AO-PSF 估计模型重建过程中,按图 4 同样以近似的 $2'' \times 2''$ 正方形等晕子区将图 5(a)划分为 5×5 网格。重建结果分别如图 5(c)和(b)所示。

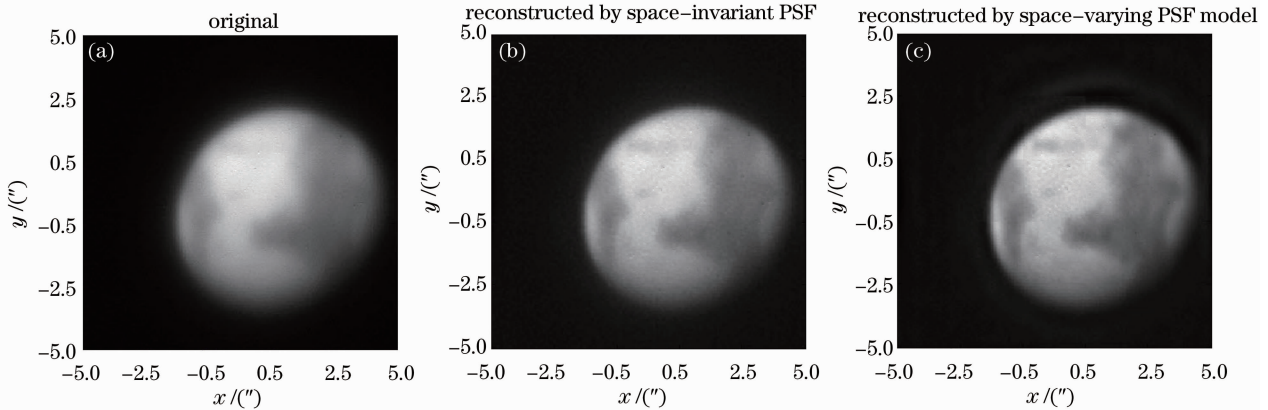


图 5 利用空变 AO-PSF 模型的实测结果重建对比。(a)为 2008 年 3 月云南天文台 1.2 m 望远镜 AO 成像系统对火星的实测结果;(b)为仅用轴上 PSF 对原数据重建结果;(c)为利用空变 AO-PSF 估计模型的重建结果

Fig.5 Comparison of space-varying PSF model reconstruction result with space invariant PSF reconstruction. (a) The original observed results of Mars by Yunnan Observatory 1.2 m AO imaging system in March, 2008; (b) reconstructed result by on-axis space-invariant PSF; (c) the reconstructed result using predicted space-varying AO-PSF model

从图 5 可以看出,通过同样的图像反卷积算法,利用空变 AO-PSF 估计模型的重建结果在超出等晕区视场范围内得到图像细节出现,对观测图像位置和强度信息有更准确的重建结果。验证了天文 AO 补偿成像系统空变 PSF 估计模型在天文实测数据处理应用中的有效性。

5 结 论

在对天文 AO 补偿成像系统空域特性分析的基

础上,结合数值仿真方法,建立了空变 AO-PSF 参数模型。该模型不但是克服成像非等晕效应影响的重建方法得以实现的基础,同时也是对 AO 成像系统空域性质做进一步分析研究的有效手段。所提出的空变 AO-PSF 参数模型估计方法基于对天文 AO 系统成像过程的分析,方法可靠且灵活性强。可根据不同观测条件和成像设备相关参数调整来建立准确模型。若能获得更准确的大气条件参数就能对 AO-PSF 模型有更准确的估计,如用实测大气参数

替代文中使用的湍流模型；或者对 AO 系统空域特性有更深入分析重建 $\mathcal{H}_0(f)$ 也能得到对成像系统 PSF 更准确的估计。

参 考 文 献

- 1 D. L. Fried. Anisoplanatism in adaptive optics [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(52): 1917~1983
- 2 C. Rao, L. Zhu, X. Rao *et al.*. 37-element solar adaptive optics for 26-cm solar fine structure telescope at Yunnan Astronomical Observatory [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(10): 966~968
- 3 K. Wei, X. Zhang, H. Xian *et al.*. First light on the 127-element adaptive optical system for 1.8-m telescope [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(11): 1019~1021
- 4 J. W. Goodman. Introduction to fourier optics [M]. Colorado: Roberts company and Publishers, 2005
- 5 J. W. Goodman. Statistical Optics [M]. New York: Wiley Interscience, 1985
- 6 J.-P. Véran, J. R. Francois, M. Henri *et al.*. Estimation of the adaptive optics long-exposure point spread function using control loop data: recent developments [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1997, **14**(11): 3057~3069
- 7 V. V. Voitikhovich, S. Bara. Effect of anisotropic imaging in off-axis adaptive astronomical systems [J]. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 1999, **137**: 385~389
- 8 T. Fusco, J.-M. Conan, L. M. Mugnier *et al.*. Characterization of adaptive optics point spread function for anisoplanatic imaging. Application to stellar field deconvolution [J]. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 2000, **142**: 149~156
- 9 F. Roddier. The effects of atmospheric turbulence in optical astronomy [C]. *Progress in Optics*, 1981, **19**: 281~376
- 10 F. Roddier, J. M. Gilli, J. Vernin. On the isoplanatic patch size in stellar speckle interferometry [J]. *J. Opt.*, 1982, **13**(2): 63~70
- 11 F. Roddier. Adaptive Optics in Astronomy [M]. New York: Cambridge University Press, 1999
- 12 M. Aubailly, M. C. Roggemann, T. J. Schulz. Approach for reconstructing anisoplanatic adaptive optics images [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(24): 6055~6063
- 13 R. G. Lane, A. Glindemann, J. C. Dainty. Simulation of a Kolmogorov phase screen [J]. *Waves in Random Media*, 1992, **2**(3): 209~224
- 14 B. Zhang, S. Qin, X. Wang. Accurate and fast simulation of Kolmogorov phase screen by combining spectral method with Zernike polynomials method [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(10): 969~971
- 15 G. Tang, C. Rao, F. Sheng *et al.*. Performance and test results of a 61-element adaptive optics system on the 1.2-m telescope of Yunnan Observatory [C]. *SPIE*, 2002, **4926**: 13~19
- 16 C. Rao, W. Jiang, Y. Zhang *et al.*. Upgrade on 61-element adaptive optical system for 1.2-m telescope of Yunnan Observatory [C]. *SPIE*, 2004, **5490**: 943~953
- 17 W. H. Richardson. Bayesian-based iterative method of image restoration [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1972, **62**(55-59): 1917~1983
- 18 F. Murtagh, J. L. Starck. Astronomical Image and Data Analysis [M]. New York: Springer-Verlag, 2006

栏目编辑：谢婧