

引用格式:JIANG Ji-song, JIANG Ai-min. Numerical Model and Verification of Anisoplanatic Imaging Based on Time-varying Phase Screens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(3):0301001

蒋佶松,姜爱民. 基于时变相位屏的非等晕成像数值模型及验证[J]. *光子学报*, 2020, **49**(3):0301001

基于时变相位屏的非等晕成像数值模型及验证

蒋佶松^{1,2,3}, 姜爱民^{1,2,3}

(1 中国科学院国家天文台, 北京 100101)

(2 中国科学院空间天文与技术重点实验室, 北京 100101)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:基于多层薄相位屏光传输理论,建立了包含光传输过程、大气分层、相位屏实时连续变化、太阳扩展目标非等晕成像的数值模型,并从相位结构函数、大气相干长度及等晕角等方面进行了分析验证.在 H-V 5/7 和 H-V 10/10 两种强弱湍流模型下,大气相干长度及等晕角的绝对误差分别在 0.02 m 和 0.3"以内.结果表明,建立的非等晕成像数值模型在时间和空间上的统计特性符合实际应用需求,为研究非等晕误差在太阳稳像及自适应光学系统中的应用提供了可靠的模型支持.

关键词:大气光学;自适应光学;等晕角;相位屏;数值模型

中图分类号:P401

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204903.0301001

Numerical Model and Verification of Anisoplanatic Imaging Based on Time-varying Phase Screens

JIANG Ji-song^{1,2,3}, JIANG Ai-min^{1,2,3}

(1 *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*)

(2 *Key Laboratory of Space Astronomy and Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*)

(3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Based on the optical transmission theory of multi-layer phase screens, a numerical model including the optical transmission process, layered atmospheric, continuous predicted phase screens, anisoplanatic imaging of the solar extended target was established, then analyzed and verified from the aspects of phase structure function, atmospheric coherent length and anisoplanatic angle. Under H-V 5/7 and H-V 10/10 turbulence models, the absolute errors of atmospheric coherent length and anisoplanatic angle are within 0.02 m and 0.3" respectively. The results show that the statistical characteristics of the numerical model in time and space meet the practical application requirements, which provides a reliable model for the study of the effect of anisoplanatic errors on the solar image stabilization and adaptive optical system.

Key words: Atmospheric optics; Adaptive optics; Isoplanatic angle; Phase screen simulation; Numeric model

OCIS Codes: 010.1290; 010.1080 ; 010.1300; 010.1330

0 引言

太阳的光波经过大气湍流时,其波前振幅及相位均会发生随机改变,由于不同方向上光波的传输路径不

基金项目:国家自然科学基金(No. 11427901)

第一作者:蒋佶松(1993—),男,博士研究生,主要研究方向为自适应光学技术. Email: jiang_jisong@foxmail.com

导师(通讯作者):姜爱民(1970—),男,研究员,博士,主要研究方向为稳像、自适应光学及光干涉等. Email: amjiang@bao.ac.cn

收稿日期:2019-11-14;录用日期:2020-01-16

<http://www.photon.ac.cn>

同,将导致不同的光强起伏、成像抖动、像质衰退等现象,即大气非等晕效应.在实时校正入射波前动态倾斜的太阳望远镜稳像系统中,由于太阳米粒组织大小在 $2''$ 左右,为了保证探测目标包含的信息足够充分,探测视场一般选为 $10''$,像元分辨率为 $0.3''$.理想情况下,总希望稳像系统探测目标只存在平移,这样通过跟踪算法^[1]即可计算出高精度的平移量,实现对目标波前畸变倾斜的完全校正.对于常见天文台址,大气等晕角通常为 $1\sim 2''$ 左右,在等晕区内可认为系统是线性空不变的,具有相同的点扩散函数(Point Spread Function, PSF).然而,在太阳稳像系统中,其探测视场大于等晕区,因此探测目标的成像受到不同视场 PSF 的综合影响,大气非等晕误差不可忽视.

数值模拟可以从实际过程出发,重复再现大气湍流对目标成像的影响.文献[2-3]使用数值模拟方法对光束水平传输的非等晕性进行了模拟与验证.文献[4]对大气分层及相位屏动态运动进行了分析,但未考虑大气的非等晕性.文献[5]研究了非等晕性对自适应光学中信标的影响.文献[6]对宽视场望远镜不同口径下的非等晕效应进行了研究,计算了典型大气条件下不同视场角的畸变波前均方差值.以上研究均只针对非等晕性或时变湍流特性的其中某些方面建立了数值模型.

为了更加准确地研究真实环境下大气湍流对太阳望远镜稳像系统的综合影响,本文从光束在大气中的传播理论出发,依据观测台址大气条件,采用基于光程方差最小化的相位屏位置优化方法,将 $0\sim 20$ km 海拔内的大气湍流分成四层,并用协方差预测法实现了相位屏随风速的时实变化模拟,通过非等晕 PSF 成像方法,建立了太阳稳像系统的时变非等晕数值模型,最后分别计算了相位结构函数、大气相干长度及等晕角的理论与统计结果,验证了生成模型的可靠性.

1 非等晕模型建立

1.1 光束在大气中的传输模型

大气作为一种随机介质,当引起的波前相位起伏足够小时,光束在其中的传输过程可以看作真空传播和相位调制两个独立的过程^[7].如图 1,从太阳发出的光波到达地球大气边界时,可以近似为平行光,之后经过一系列的薄相位屏表示的大气湍流,其中光束在相位屏之间的传输遵循菲涅尔衍射定律,在经过相位屏附加相位变化后继续真空传播,到达望远镜瞳面时停止.光波经过第 i 层相位屏后的光场复振幅分布 $u_i(x, y)$ 可以表示为^[2,8]

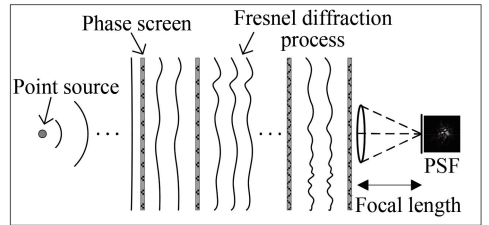


图 1 光在多层相位屏中的传播模型
Fig.1 Propagation model of light in multi-layer phase screens

$$u_i(x, y) = [u_{i-1}(x, y) \otimes h_{\Delta z_i}(x, y)] e^{j\phi_i(x, y)} \quad (1)$$

$$h_{\Delta z_i}(x, y) = \frac{e^{jk\Delta z_i}}{j\lambda\Delta z_i} \exp\left[\frac{jk}{2\Delta z_i}(x^2 + y^2)\right] \quad (2)$$

式中, \otimes 为卷积运算, $e^{j\phi_i(x, y)}$ 为第 i 层相位屏引入的相位变化, $h_{\Delta z_i}(x, y)$ 为真空传播时菲涅尔衍射的脉冲响应函数, Δz_i 为两层相位屏之间的距离.当获得瞳面上的光场复振幅分布 $u_n(x, y)$ 后,成像面上的 PSF 可表示为

$$\text{PSF}(x, y) = |\mathcal{F}\{p(x, y) \times u_n(x, y)\}|^2 \quad (3)$$

式中, $\mathcal{F}\{\cdot\}$ 为傅里叶变换, $p(x, y)$ 为光瞳函数.

1.2 大气非等晕性

以上光束传输模型针对的是点源目标在零视场下的成像过程,对于太阳这类扩展目标,其成像过程如图 2.从太阳面 O_1, O_2 发出的光束分别经实线和虚线方框表示的局部相位屏区域传播到瞳面,由于传输路径不同,相位屏引入的相位畸变也不一致,因此在成像面上对应的 PSF 也存在差异.假设 O_1, O_2 的张角为 θ ,其畸变相位均方差可以表示为^[9]

$$\sigma^2(\theta) = \langle [\phi_{O_1}(r) - \phi_{O_2}(r)]^2 \rangle = \left(\frac{\theta}{\theta_0}\right)^{5/3} \quad (4)$$

式中, $\langle \cdot \rangle$ 为系综平均, $\phi_{O_1}(r), \phi_{O_2}(r)$ 为对应目标在望远镜瞳面上的波前相位, θ_0 为等晕角,定义为 $\sigma^2(\theta)$ 为

1 rad²时所对应的张角.

在等晕区内,PSF 基本满足空不变假设.为了有效地提高计算速度,采用 θ_0 作为 PSF 离散化计算的参考,即通过计算不同等晕区内 PSF,并对相邻等晕区内 PSF 进行双线性插值,实现像面光强 $I(m, n)$ 的快速计算.成像面上的光强分布可表示为

$$I(m, n) = \sum_k \sum_l o(m-k, n-l) \text{PSF}_{m,n}(k, l) \quad (5)$$

式中, $o(m, n)$ 为离散的物面图像, $\text{PSF}_{m,n}(k, l)$ 为与物面图像位置对应的 PSF.

1.3 大气湍流分层方法

大气湍流主要集中在高度为 0~20 km 的对流层内,其强度可以由大气折射率结构常数 C_n^2 表示,目前最常用的 C_n^2 廓线模型为 H-V 模型^[10],其表达式为

$$C_n^2(h) = 5.94 \times 10^{-23} h^{10} (W/27)^2 \exp(-h) + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-2h/3) + A \exp(-10h) \quad (6)$$

$$A = 1.29 \times 10^{-12} r_0^{-5/3} \lambda^2 - 1.61 \times 10^{-13} \theta_0^{-5/3} \lambda^2 - 3.89 \times 10^{-15} \quad (7)$$

$$W = 27(75\theta_0^{-5/3} \lambda^2 - 0.14)^{1/2} \quad (8)$$

式中, h 为海拔高度,单位为 km; λ 为波长,单位为 μm ; A 为近地面大气折射率结构常数值; W 为垂直路径上的均方根风速.通常情况下,太阳望远镜台址的大气相干长度 r_0 主要集中在 5~20 cm 的区间内^[11],为了验证模型在不同湍流强度下的准确性,采用 H-V 5/7 模型表示湍流较强的情况,即设定 $r_0 = 5 \text{ cm}$, $\theta_0 = 7 \mu\text{rad}$,当观测波长为 656.3 nm 时, $W = 29 \text{ m/s}$, $A = 3.1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$,而湍流较弱的情况采用 H-V 10/10 模型,其中 $W = 20 \text{ m/s}$, $A = 6.6 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$.

对于 $C_n^2(h)$ 已知的大气湍流,平面波的相干长度 r_0 和等晕角 θ_0 的理论值可分别表示为

$$r_0 = [0.423k^2 \sec^2 \zeta \int C_n^2(h) dh]^{-3/5} \quad (9)$$

$$\theta_0 = [2.914k^2 (\sec^2 \zeta)^{8/3} \int C_n^2(h) h^{5/3} dh]^{-3/5} \quad (10)$$

式中, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, ζ 为天顶角.

根据 1.2 节的分析,大气非等晕性主要表现在不同视场角入射的光束波前相位不一致,为了尽量避免薄相位屏对非等晕性模拟精度带来影响,需要保证通过薄相位屏的光束与理论光束之间的相位差最小,因此采用文献[12]提出的基于光程方差最小化的相位屏位置优化方法来对大气进行分层模拟,每层湍流边界和相位屏位置的优化条件为

$$\begin{cases} \int_{H_{i-1}}^{h_i} C_n^2(h) (h_i - h)^{2/3} dh = \int_{h_i}^{H_i} C_n^2(h) (h - h_i)^{2/3} dh \\ H_i = \frac{h_i + h_{i+1}}{2} \end{cases} \quad (11)$$

式中, H_{i-1} 和 H_i 分别为每层大气的上下边界, h_i 为该层相位屏的位置.每层相位屏的移动速度根据 Bufton 风速模型^[13] 计算得到,即

$$V_{\text{Bufton}}(h_i) = 5 + 30 \exp \left[- \left(\frac{h_i - 9.4}{4.8} \right)^2 \right] \quad (12)$$

为了保证分层后的大气湍流接近理论结果,在保证计算精度与速度的前提下,以文献[14]中的大气分层优化结果作参考,采用 4 层相位屏模拟大气湍流.根据式(6)~(12)计算得到 H-V 5/7 和 H-V 10/10 模型的湍流廓线模型及相位屏位置如图 3,其大气湍流分层参数如表 1.

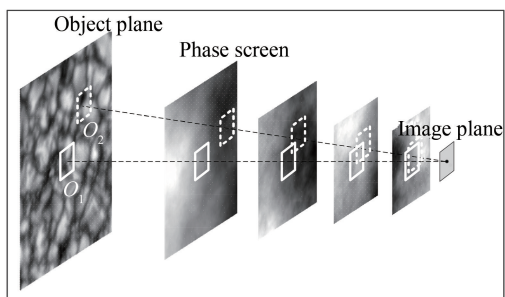


图 2 多层相位屏生成非等晕 PSF 的方法
Fig.2 Method for generating anisoplanatic PSF with multi-layer phase screens

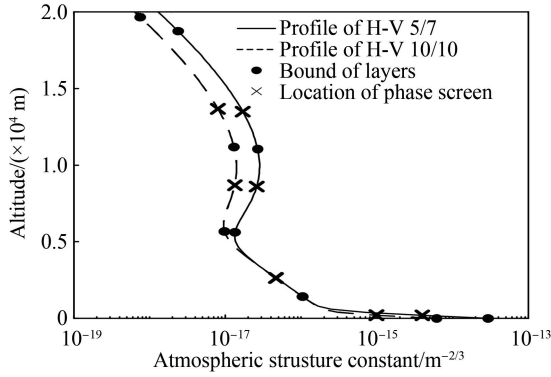


图3 H-V 5/7模型和H-V 10/10模型的湍流廓线模型及相位屏位置

Fig.3 The atmospheric turbulence profile models of H-V 5/7 and H-V 10/10 and position of phase screens

1.4 时变相位屏的生成方法及改进

为了模拟稳像系统实时波前校正的过程,采用相位协方差预测法^[15]生成分层后的相位屏.其优点在于可以通过上一次相位屏数据对即将产生的相位屏实时预测计算,因此无需提前存储曝光时间内的整个相位屏数据,极大地节约存储空间并实现无限长时间的模拟.相位协方差预测法的基本原理为:用 $\Phi_{N \times N}$ 表示每一次生成相位屏的所有相位值,其中 N 表示初始相位屏的像素值.矩阵 Z 表示 $\Phi_{N \times N}$ 中用于预测的最后 N 列的相位值,矩阵 X 表示预测产生的新相位值, X 和 Z 满足以下关系

$$X = AZ + B\beta \quad (13)$$

式中, A 和 B 为预测所需矩阵, β 为均值为零、方差为1的高斯随机变量.矩阵 A 和 B 的表达式分别为

$$A = \langle XZ^T \rangle \langle ZZ^T \rangle^{-1} \quad (14)$$

$$BB^T = \langle XX^T \rangle - A \langle ZX^T \rangle \quad (15)$$

式中,矩阵 B 可以通过奇异值分解的方法得到.考虑大气湍流外尺度影响的Von-Karman湍流谱的相位结构函数为

$$D_\phi(r) = \left(\frac{L_0}{r_0}\right)^{5/3} \times \frac{2^{1/6} \Gamma(11/6)}{\pi^{8/3}} \left[\frac{24}{5} \Gamma\left(\frac{6}{5}\right)\right]^{5/6} \times \left[\frac{\Gamma(5/6)}{2^{1/6}} - \left(\frac{2\pi r}{L_0}\right)^{5/6} K_{5/6}\left(\frac{2\pi r}{L_0}\right)\right] \quad (16)$$

式中, $K_{5/6}(x)$ 为修正的第二类贝塞尔函数, $\Gamma(x)$ 是伽马函数, L_0 为湍流外尺度.其对应的协方差函数表达式为

$$C_\phi(r) = \left(\frac{L_0}{r_0}\right)^{5/3} \times \frac{\Gamma(11/6)}{2^{5/6} \pi^{8/3}} \left[\frac{24}{5} \Gamma\left(\frac{6}{5}\right)\right]^{5/6} \times \left(\frac{2\pi r}{L_0}\right)^{5/6} K_{5/6}\left(\frac{2\pi r}{L_0}\right) \quad (17)$$

因此,当已知相位屏中两点之间的物理距离 r 时,根据协方差函数 $C_\phi(r) = \langle \phi(x)\phi(x+r) \rangle$ 可以计算得到 $\langle XZ^T \rangle$ 、 $\langle ZZ^T \rangle$ 、 $\langle XX^T \rangle$ 、 $\langle ZX^T \rangle$ 项的值.

本文主要研究在常用的Kolmogorov湍流谱模型下的非等晕成像过程,与考虑外尺度 L_0 的Von-Karman模型不同,其理论相位结构函数^[16]为 $D_\phi(r) = 6.88(r/r_0)^{5/3}$,而且文献[15]中的方法生成的相位屏存在各向异性的问题,因此对相位屏预测过程做出了相应的改进:

- 1) 选择较大的湍流外尺度 L_0 以尽量符合Kolmogorov湍流谱模型;
- 2) 在相位屏预测生成时,为了保证行和列方向上具有相同的统计特性,对行和列方向各进行一次预测,即相位屏沿斜对角线方向移动.

3) 与文献[15]中选取 $N=2$ 用于预测不同,选取第 $1, N/4, N/2, 3N/4, (N-1)$ 和 N 列作为用于预测的矩阵 Z ,这样可以改善大外尺度下的湍流低频特性,但由于生成相位屏的时间会随着预测矩阵的增大而增加,如果计算速度允许,可以添加更多远离矩阵 X 的数据用于预测,这样低频特性还会进一步提高.

2 模型参数及有效性分析

2.1 参数设置

在数值模拟中,综合考虑湍流引入的图像平移、计算效率等因素,以典型地面太阳望远镜稳像系统方案为例,设置参数如下:

1)望远镜口径为 1 m,典型的探测支路焦距为 5 m,探测波段为 656.3 nm,探测相机像素尺寸为 7.4 μm ,每像素对应约 0.3"的探测视场;

2)相位屏采样间隔设置为 0.008 9 m,对应的大气分层具体参数如表 1,每层相位屏的预测迭代速度由对应的风速决定.

表 1 H-V 5/7 模型和 H-V 10/10 模型下的大气湍流分层参数

Table 1 Parameters of atmospheric turbulence layers of H-V 5/7 model and H-V 10/10 model

Parameters	H-V 5/7 model/H-V 10/10 model			
	First layer	Second layer	Third layer	Fourth layer
Position of phase screen/m	205/206	263 5/265 2	8 609/8 700	13 497/13 680
Atmospheric coherent length/m	0.05/0.12	0.33/0.33	0.37/0.54	0.43/0.67
Wind speed/m	5.65/5.65	5.76/5.77	9.12/9.16	34.20/34.37
Grid size	194	214	262	302
Size of phase screen/m	1.73	1.90	2.33	2.69
Theoretical value	$r_0 = 0.05 \text{ m}/0.10 \text{ m}$	$\theta_0 = 1.44''/2.11''$		

2.2 成像结果

在太阳望远镜稳像系统 9.6"探测视场的非等晕成像中,以 H-V 10/10 模型为例,模拟步骤如下:

1) 首先通过对如图 4 所示的 Hinode 卫星^[17]米粒组织图像 6 \times 6 像素合并的方法得到每像素视场为 0.3"的物面图像.考虑湍流引入的平移效果会使图像移出探测视场,因此物面图像采样大小扩大为 48 \times 48 像素,探测视场为 14.4";

2) PSFs 按 1.44"视场的间隔计算,符合 $\theta_0 = 2.11''$ 的等晕区要求,共产生 11 \times 11 组原始 PSFs 矩阵.原始 PSFs 矩阵根据图像采样大小进行双线性插值,获得 48 \times 48 组 PSFs;

3) 根据式(5)计算得到非等晕图像,经过中心裁剪后最终获得 32 \times 32 像素、视场为 9.6"的太阳米粒组织图像.

在实际稳像过程中,探测帧频一般为 2 000 Hz,根据以上步骤,产生 1 000 ms 时长的图像序列,采用第一幅图作为参考图,通过互相关算法^[1]计算得到的图像偏移量.其中图像偏移量计算结果如图 5(a),第 0 ms、250 ms、500 ms、750 ms、1 000 ms 时不同视场角的点扩散函数如图 5(b),图 5(c)为对应的非等晕成像结果.可以看出,由于不同时刻及不同视场所对应的 PSF 之间存在差异,成像结果受到不同视场 PSF 的综合影响.

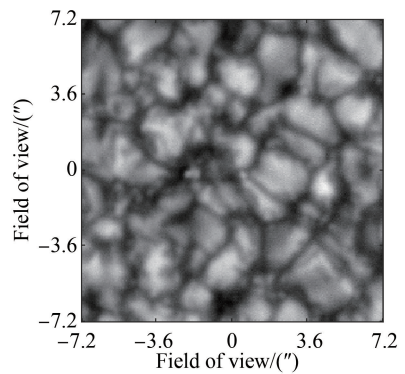
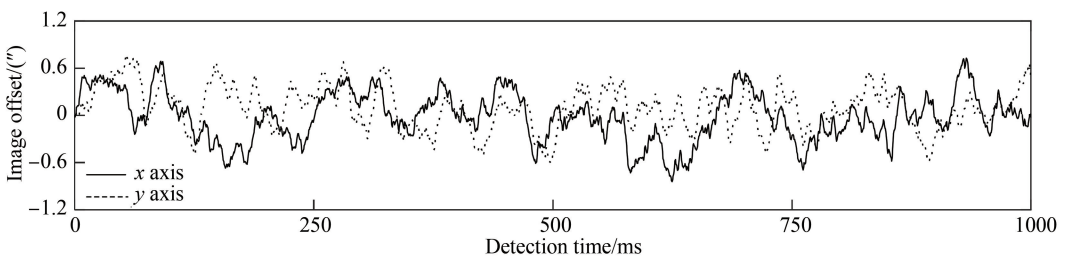
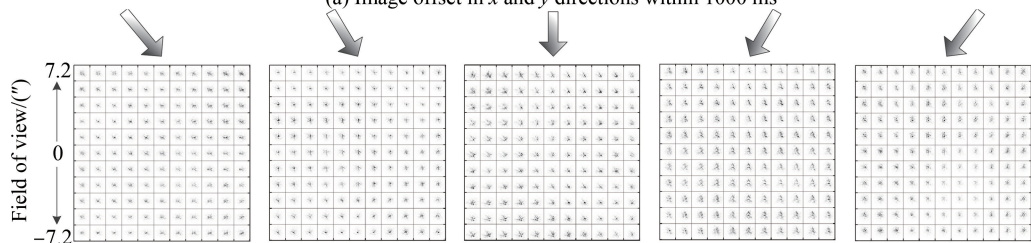


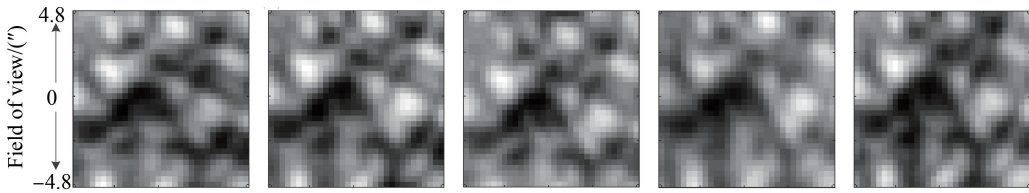
图 4 作为物面的 14.4"视场太阳米粒组织图像
Fig.4 The 14.4" solar granulation image as object plane image



(a) Image offset in x and y directions within 1000 ms



(b) PSFs of different field of view at 0, 250, 500, 750, 1000 ms



(c) The imaging results at 0, 250, 500, 750, 1000 ms

图5 太阳稳像系统非等晕成像模拟结果

Fig.5 Simulation results of anisoplanatic imaging of solar image stabilization system

2.3 数值模型验证结果

为了验证非等晕成像数值模型的准确性,选择从相位结构函数、大气相干长度、等晕角三个方面进行验证.根据文献[18]中对大气相干长度测量技术指标的分析可知,为了保证大气相干长度测量的准确性,测量时的采样频率不能低于 100 Hz,采样时长不能短于 20 s.因此在数值模型验证时,参数设置为:每次仿真时长为 20 s,探测帧频为 100 Hz,共获得 2 000 组数据,进行 100 次独立的模拟以尽可能获得湍流相位屏的统计特性.

2.3.1 相位结构函数

根据 1.4 节的相位屏生成方法,以 H-V 5/7 模型为例,对表 1 中的四层相位屏分别进行验证,湍流外尺度 L_0 设定为 10^4 m.改进前后的相位屏在行和列方向的相位结构函数对比结果如图 6(a)~(d).

从图中可以看出,原始方法在行和列方向的相位结构函数存在很大差异,其中更靠近理论值的是列方向相位结构函数,主要原因是相位屏按列预测计算.虽然相位屏沿斜对角线方向预测时,行和列方向的结构函数非常接近,但低频部分与理论值相差较大.而通过添加更多远离预测列的数据,实现了对低频部分的补偿,使行和列方向的相位结构函数在保持相似的情况下更接近理论值.

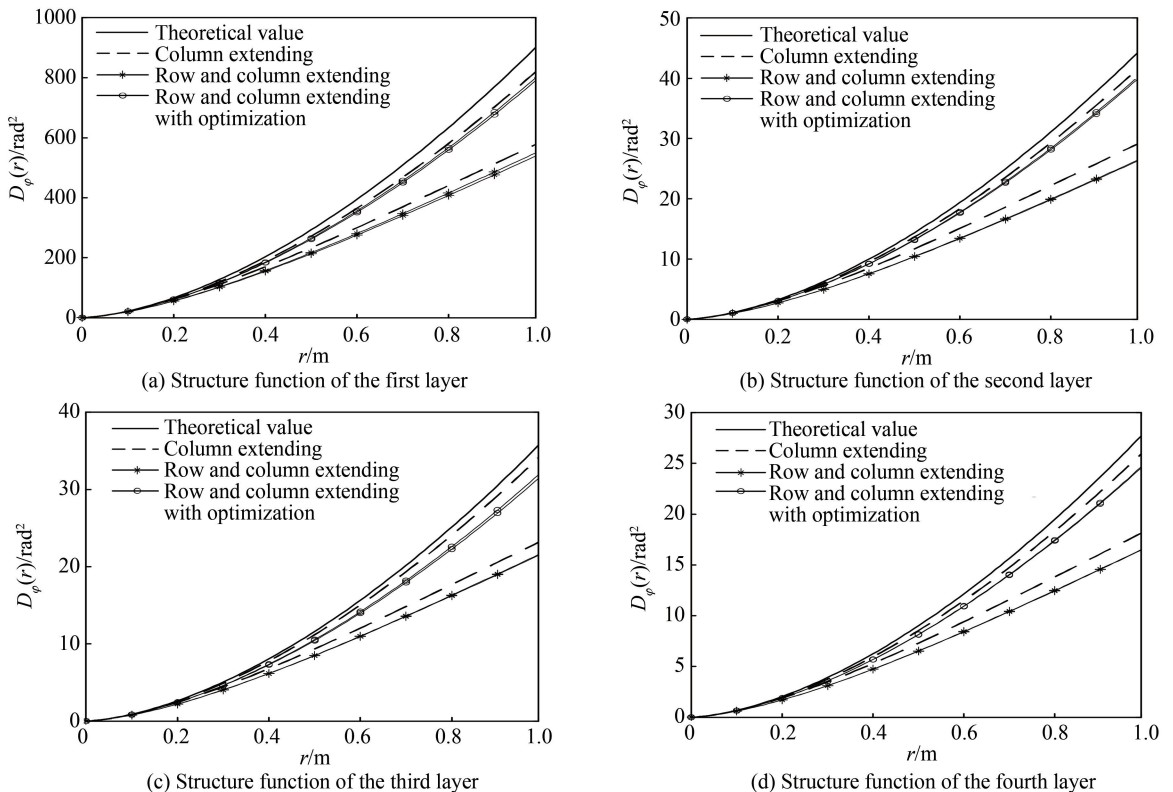


图6 以 H-V 5/7 湍流模型为例的时变相位屏生成方法改进前后行和列方向相位结构函数对比结果

Fig.6 Comparison results of phase structure functions in row and column directions before and after improvement of time-varying phase screen generation method based on H-V 5/7 model

2.3.2 大气相干长度

Fried 提出的单口径下大气相干长度计算方法的定义为^[19]

$$r_0 = \{ (0.358\lambda^2) / [D^{1/3} (\sigma_x^2 + \sigma_y^2)] \}^{3/5} \quad (18)$$

式中, σ_x^2, σ_y^2 为 x, y 方向到达角起伏方差, D 为望远镜孔径直径. 根据实验系统测量到达角 α , 其表达式为

$$\alpha = (d_{x,y} \times S_{\text{pixel}}) / f'_t \quad (19)$$

式中, $d_{x,y}$ 为成像光斑质心的位置偏移量, S_{pixel} 为像元尺寸, f'_t 为成像系统焦距. 通过成像质心的偏移量即可计算出 r_0 .

在 r_0 验证时, 考虑到 Kolmogorov 湍流是各向同性的, 因此仅统计中心视场 PSF 的到达角起伏方差. 计算结果如图 7, 在 H-V 5/7 模型中, r_0 的理论值为 0.05 m, 统计平均结果为 0.06 m; 在 H-V 10/10 模型中, r_0 的理论值为 0.10 m, 统计平均结果为 0.12 m. 实际上, 根据相位结构函数的比较可以看出, 由于改进后的协方差预测法与 Kolmogorov 湍流在低频部分仍有一定误差存在, 并且由于计算速度的原因, 在仿真中生成相位屏的时间不是足够长, 随着时间的增加, r_0 的统计结果将更接近理论情况.

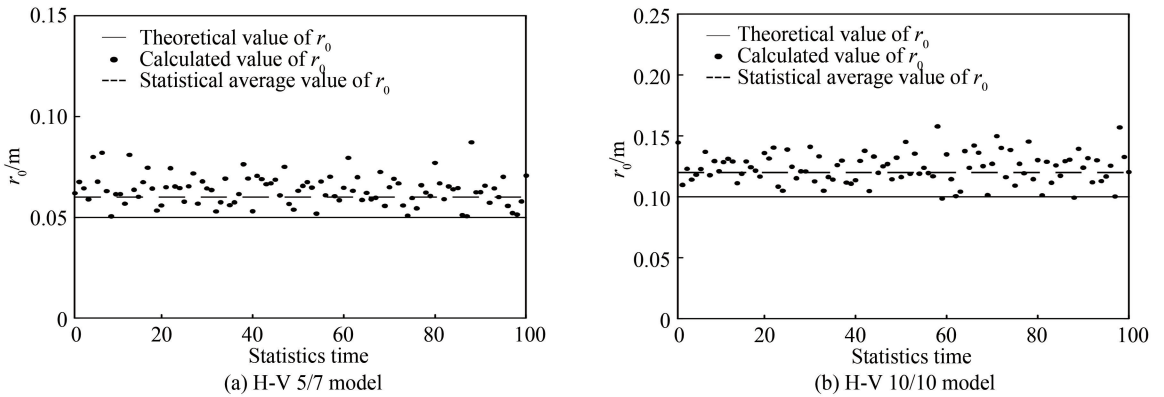


图 7 两种大气湍流廓线模型下的 r_0 计算结果

Fig.7 Calculation results of r_0 under two kinds of atmospheric turbulence profile models

2.3.3 等晕角

在计算 θ_0 时, 根据式(4)可知, 波前相位均方差 $\sigma^2(\theta)$ 随着视场角增大, 当 $\sigma^2(\theta)$ 为 1 rad^2 时所对应的视场角即为等晕角. 对此, 按 $0.1''$ 视场的间隔进行非等晕成像模拟, 并计算到达望远镜瞳面处的波前相位均方差. 统计结果如图 8, 在 H-V 5/7 模型中, θ_0 的理论值为 $1.44''$, 统计平均结果为 $1.65''$, 在 H-V 10/10 模型中, θ_0 的理论值为 $2.11''$, 统计平均结果为 $2.41''$, 略微大于理论情况. 造成等晕角偏大的原因有两个: 1) 在统计时间内相位屏 r_0 统计平均值偏大, 造成湍流起伏比理论情况更弱, 这是造成 θ_0 计算值略微偏大的主要原因; 2) 根据文献[5]可知, 式(4)为口径 $D \rightarrow \infty$ 时的情况, 由于在数值模拟时望远镜口径为 1 m, 因此计算得到的等晕角会大于式(4)中的理论情况.

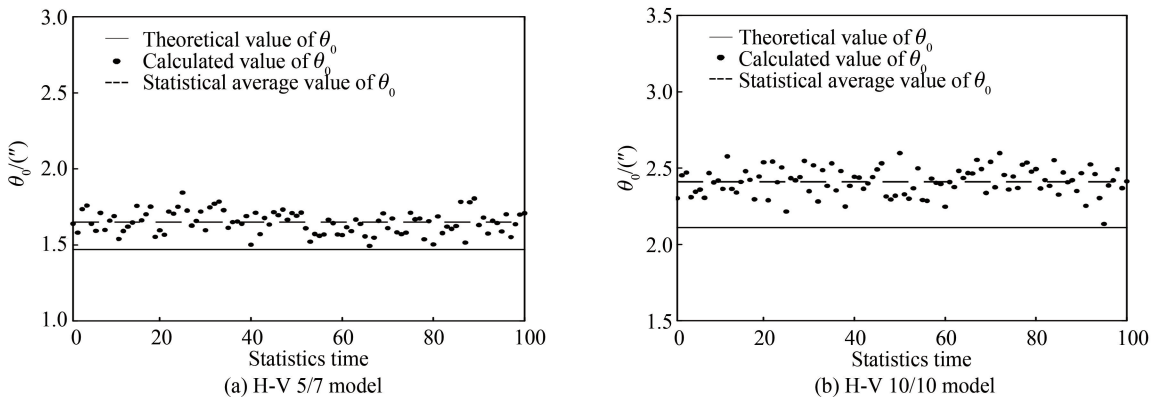


图 8 两种大气湍流廓线模型下的 θ_0 计算结果

Fig.8 Calculation results of θ_0 under two kinds of atmospheric turbulence profile models

3 结论

本文对太阳望远镜稳像系统的非等晕性进行了研究,建立了包含从光在大气湍流中传输到太阳扩展目标非等晕成像的数值模型.为了验证模型的准确性,分别对 H-V 5/7 和 H-V 10/10 两种强弱湍流模型下的大气相干长度 r_0 及等晕角 θ_0 进行了统计验证,在 H-V 5/7 模型下, r_0 和 θ_0 分别为 0.06 m 和 1.65";在 H-V 10/10 模型下, r_0 和 θ_0 分别为 0.12 m 和 2.41". r_0 和 θ_0 与理论值相比的绝对误差分别在 0.02 m 和 0.3" 以内.由于实际台址的大气条件随着时间快速变化,大气湍流强度也会有相应的起伏,本数值模型的误差已经能够明显地区分强弱不同的大气湍流效应,满足稳像研究中的实际应用需求.下一步将在此非等晕成像模型的基础上,分析探测视场大小,探测目标类型等对稳像系统实时校正的影响.

参考文献

- [1] RAO Chang-hui, JIANG Wen-han, LING Ning, *et al.* Tracking algorithm for low contrast extended object[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2001, **42**(3): 329-338.
饶长辉,姜文汉,凌宁,等. 低对比度扩展目标跟踪算法[J]. 天文学报,2001,**42**(3):329-338.
- [2] BOS J P, ROGGEMANN M C. Technique for simulating anisoplanatic image formation over long horizontal paths[J]. *Optical Engineering*, 2012, **51**(10): 101704.
- [3] HARDIE R C, POWER J D, LEMASTER D A, *et al.* Simulation of anisoplanatic imaging through optical turbulence using numerical wave propagation with new validation analysis[J]. *Optical Engineering*, 2017, **56**(7): 071502.
- [4] SHAO W Y, XIAN H. An iterative algorithm for the position of time-varying phase screens in the atmospheric turbulence[C]. SPIE, 2016, **10154**: 1015403.
- [5] LUO Xi, LI Xin-yang. Investigation of anisoplanatic effect in atmospheric turbulence probing with beacon I: Numerical modeling[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(6): 238-247.
罗曦,李新阳. 信标湍流探测中波前非等晕问题的研究 I: 数值建模[J]. 中国激光,2014,**41**(6):238-247.
- [6] HE Chao-lan, WEI Hong-gang, SHEN Mang-zuo. Numerical analysis of anisoplanatism of wide-field-of-view telescope imaging through turbulent atmosphere[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, **38**(12): 13-17.
何超兰,魏宏刚,沈忙作. 宽视场望远镜大气非等晕性的数值分析[J]. 光电工程,2011,**38**(12): 13-17.
- [7] REN Bin, CHEN Chun-yi, YANG Hua-min. Survey of studies on numerical simulations of optical-wave propagation in atmospheric turbulence[J]. *Journal of System Simulation*, 2017, **29**(8): 1631-1640.
任斌,陈纯毅,杨华民. 大气湍流光波传输数值仿真技术研究综述[J]. 系统仿真学报,2017,**29**(8):1631-1640.
- [8] SCHMIDT J D. Numerical simulation of optical wave propagation with examples in MATLAB[M]. Bellingham: SPIE, 2010: 87-184.
- [9] GLINDEMANN A. Principles of stellar interferometry[M]. Berlin: Springer, 2011: 172-173.
- [10] PARENTI R R, SASIELA R J. Laser-guide-star systems for astronomical applications[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1994, **11**(1): 288-309.
- [11] LOU Ke, LIU Zhong, WU Ming-chan, *et al.* Site test for infrared solar tower in yunnan[J]. *Publications of Yunnan Observatory*, 2002(4): 60-67.
楼柯,刘忠,吴铭贻,等. 云南红外太阳塔选址及其结果[J]. 云南天文台台刊,2002(4):60-67.
- [12] WALLNER E P. Optimizing the locations of multiconjugate wavefront correctors[C]. SPIE, 1994, **2201**: 110-116.
- [13] BUFTON J L. Comparison of vertical profile turbulence structure with stellar observations[J]. *Applied Optics*, 1973, **12**(8): 1785-1793.
- [14] SHAO Wen-yi, XIAN Hao. Reduced-scale experiment of beam propagation under multilayer atmosphere model along inhomogeneous turbulent path[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(8): 221-232.
邵文毅,鲜浩. 非均匀湍流路径下光束分层传输缩比实验研究[J]. 中国激光,2016,**43**(8):221-232.
- [15] ASSÉMAT F, WILSON R W, GENDRON E. Method for simulating infinitely long and nonstationary phase screens with optimized memory storage[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(3): 988-999.
- [16] FRIED D L. Statistics of a geometric representation of wavefront distortion[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1965, **55**(11): 1427-1435.
- [17] National astronomical observatory of japan. solar granulation [EB/OL]. (2007-01-10) [2019-10-18] <http://darts.isas.jaxa.jp/solar/hinode>.
- [18] XU Wen-qiang, ZONG Fei, QIANG Xi-wen, *et al.* Several critical qualifications in measurement of atmospheric coherence length[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, **34**(3): 469-472.
许文强,宗飞,强希文,等. 大气相干长度测量中几个关键技术指标的分析[J]. 应用光学,2013,**34**(3):469-472.
- [19] FRIED D L. Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1966, **56**(10): 1372-1379.