

文章编号 1004-924X(2013)04-0911-08

大气相干长度的稳定测量

陈浩^{1,2}, 宣丽^{1*}, 胡立发¹, 曹召良¹, 穆全全¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林, 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:采用传统的一对差分星点像运动法(DIMM)测量大气相干长度 r_0 时, 受统计星点对数的限制很难得到稳定的 r_0 数值。因此, 本文提出将对波面上的一对星点像运动的统计增加为对正方形分布的十二对星点像运动的统计, 并利用 Shack-Hartmann 波前探测器采集的光点阵列实现了这种统计。畸变波面上十二对点的差分运动统计方法从空间角度上增加了大气相干长度 r_0 采样的统计数量, 从空间群的概念来说增加了中心对称统计, 因此大幅降低了统计时间。实验显示: 仅使用 300 ms 采样 300 幅畸变波面即可完成对大气相干长度 r_0 的统计, 得出稳定而准确的 r_0 值, 而波动只有 $\pm 3\%$ 。该方法解决了长期以来大气相干长度 r_0 的统计量不确定、测定误差无法分析的问题, 有助于提高地基望远镜自适应光学系统成像的精度。

关键词:大气光学; 自适应光学; 大气相干长度; Shack-Hartmann

中图分类号: P412 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20132104.0911

Steady measurement of atmospheric turbulence coherence length

CHEN Hao^{1,2}, XUAN Li^{1*}, HU Li-fa¹, CAO Zhao-liang¹, MU Quan-quan¹

(1. State Key Laboratory of Applied Optics,
Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)
* Corresponding author, E-mail: xuanli@ciomp.ac.cn

Abstract: When atmospheric turbulence coherence length r_0 is measured by traditional Differential Image Motion Monitor(DIMM) method, it is difficult to obtain a stable r_0 value due to limitation of light spot pairs. Therefore, this paper proposes a statistical method to increase the statistical number of light spot pairs from one on a wavefront to twelve aligned in a square, and completes the statistics on a SHWFS light spot array captured by the Shack-Hartmann wavefront detector. The method spatially increases the statistical number of samplings and the spatial symmetry of r_0 measurement, so it decreases the statistical time greatly. The experiments show that only three hundred of wavefront samples gotten in 300 ms are enough to obtain the r_0 with a variation less than 3%. The presented method solves the large error problem in the traditional r_0 measurement for long time, and has contributed to

收稿日期: 2012-11-08; 修订日期: 2013-01-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 60736042, 11174274, 11174279)

the improvement of imaging accuracy of adaptive optical systems for ground-based telescopes

Key words: atmospheric optics; adaptive optics; atmospheric coherence length; Shack-Hartmann

1 引言

地球表面垂直方向上有 10~20 km 的大气层,由于温度的不均匀变化使得空气局部密度不同,导致大气折射率不均匀而形成大气湍流^[1]。利用天文望远镜对空间目标观测成像时,天文望远镜接收到的目标光波受到大气湍流的动态扰动会产生不同程度的波前畸变,从而严重影响成像质量^[2-4]。因此,自适应波前校正系统成为米级以上口径望远镜的必要设施。为了评价自适应波前校正系统应对大气湍流的能力,大气湍流强度的测量一直是自适应光学领域的重要课题。

大气相干长度 r_0 的数值能够表达光束在大气湍流中传输的空间相干性及大气湍流动态扰动的综合强度。大气相干长度 r_0 的值越小,表明大气湍流的动态扰动越剧烈,取值范围一般在几厘米至几十厘米之间。 r_0 值的定义为:光学波面在大气相干长度 r_0 的圆域或者子孔径内位相起伏的均方根值为 1 rad。

许多文献都报道了大气相干长度 r_0 的统计方法,并给出了实际测量结果^[5-9]。其中通过测量畸变波前的位相信息求出大气相干长度 r_0 ,即差分星点像运动法(DIMM),已被广泛采用。一般采用 Shack-Hartmann 波前探测器对畸变波面的位相信息进行直接测量^[10]。本实验室应用差分星点像运动法对大气相干长度 r_0 进行了大量测量,发现某一时刻的测量值经常会在数秒之内突然跃升 2~3 cm,偶而还可跃升近十厘米,这种现象与大气湍流动态扰动的自身特性相矛盾。分析其原因,应该是统计量不够造成的。因为波前的起伏剧烈程度在各方位上不同,而差分星点像运动法只统计固定位置上的两个子孔径光斑质心的运动,要想统计全面须花费较长时间。但是,增加统计量又会造成测量延时太长、湍流强度已经变化的问题。因此,传统的测量大气相干长度 r_0 的差分星点像运动法是有缺陷的。

2000 年中科院安徽光机所饶瑞中采用三星点像(三孔)运动法^[11]来弥补一对星点像运动统计的不全面。2007 年饶瑞中研究组又报道了采

用互为垂直的两对(四孔)差分星点像运动法^[12],并在 2010 年报道了 Dome 效应对四孔大气相干长度仪系统性能的影响^[13]。在 2010 年的文章中统计量是(4+2)对星点像 * 200 幅图,测得的 r_0 的变化速度大幅减缓,约 0.6~0.7 (cm/min),但仍然无法证实这个统计量是否充分,即 r_0 的变化是否真实,是否有局地异性随时间变化的影响。

近年来,为了在实验室中模拟大气湍流动态扰动现象,不同形式的位相板大气湍流模拟器应运而生。位相板大气湍流模拟器能够独立地、可重复地展现大气湍流动态扰动表现出的强度特性、随机特性和时间连续性,能够保证 r_0 在测量期间湍流强度不会发生变化,也没有类似 Dome 效应的干扰影响,有助于对大气相干长度 r_0 的测量方法的考量与分析。本文基于差分星点像运动法测量大气相干长度 r_0 的基本原理,采用位相板大气湍流模拟器发出特定 r_0 值的湍流,然后进行了 r_0 统计方法的探索。

2 差分星点像运动法的测量原理

大气相干长度 r_0 是从空间角度评价大气湍流强度的重要参数,也称为弗瑞德参数。它描述了大气湍流的空间密度与强度,说明口径大于 r_0 的天文望远镜,其极限分辨率不会超过口径为 r_0 的天文望远镜。Fried 通过研究大气湍流引起星点像抖动的现象,提出了大气相干长度 r_0 这一描述大气湍流空间特性的概念。

差分星点像运动法是统计 r_0 的一种重要方法,由 Stock 和 Keller 于 1960 年提出。F. Roddie 在 Fried 理论研究的基础上,应用差分星点像运动法推导出计算大气相干长度 r_0 的基本公式,并被广泛采用^[14]。1986 年, Sarazin 和 Roddier 研制了首台基于差分星点像运动法原理的大气相干长度监测仪,并用于欧南台 VLT 望远镜的选址工作。差分星点像运动法测量大气相干长度 r_0 的原理如图 1 所示。

在天文望远镜的入瞳位置放置一块挡板,挡板上开具 2 个尺寸为 T 的子孔径,2 个子孔径之间的距离为 Z ,要求两子孔径之间的距离 Z 远大

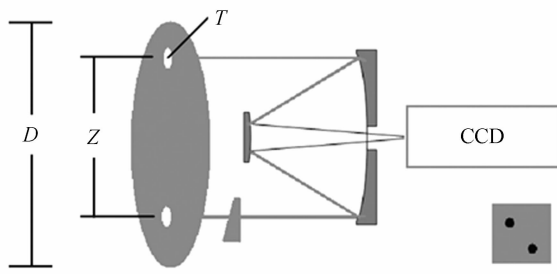


图1 DIMM原理图

Fig. 1 DIMM schematic diagram

于子孔径直径 T 。在其中一个子孔径的后方设置一块光楔,待观测目标的波前光束经过设置光楔的子孔径后将产生一定程度的倾斜。此时,来自大气通道另一端的点目标光束经过 2 个子孔径到达观测 CCD 相机后会分为两个独立的星点像。在一定时间内,通过实时记录由大气湍流动态扰动导致的两个像点之间相对距离的变化,就能够得出大气相干长度 r_0 的统计值。

大气相干长度 r_0 的计算公式为:

$$r_0 = \left[\frac{2f^2\lambda^2(0.358D^{-1/3} - 0.242Z^{-1/3})}{\langle \Delta L_q^2 \rangle - \langle \Delta L_q \rangle^2} \right]^{3/5}, \quad (1)$$

其中: D 为天文望远镜的入瞳直径, f 为天文望远镜的焦距, Z 为天文望远镜上两光瞳的中心间距, ΔL_q 为两成像点重心距离之差, $\langle \rangle$ 表示系综平均。

3 测量大气相干长度 r_0 的实验

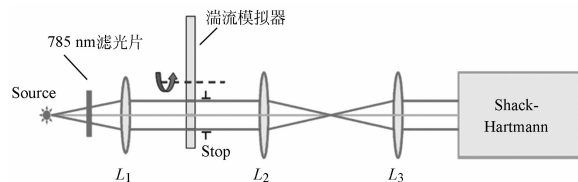
Shack-Hartmann 波前探测器具有实时探测、易操作、可脱离参考光工作、体积小、结构简单、抗干扰能力强、可直观显示波前畸变分布等优点。被广泛地用作自适应光学系统的波前信息探测、大气湍流统计特性表征、光学元件检测等众多领域^[15-17]。基于差分星点像运动法应用 Shack-Hartmann 波前探测器光点阵中一对点即可对大气相干长度 r_0 完成统计分析。

实验系统中所用 Shack-Hartmann 波前探测器帧频为 1 020 Hz,感光元件为 Intevac Photonics 公司的 MicroVista-NIR 背照明式 CMOS 相机,量子效率在 600 ~ 700 nm 的波段上接近 90%。该相机的有效像素数达到 1 280 × 1 024 个,单个像素尺寸为 10.80 μm × 10.80 μm。该 CMOS 相机能够工作在感兴趣区(Region of Interest, ROI)模式下,可以选取一个较小区域进行

信号输出。微透镜阵列数为 20 × 20 个,每个微透镜对应 7 × 7 个像素数,共使用 CMOS 相机的像素数为 140 × 140 个。该 Shack-Hartmann 波前探测器的静态测量精度 PV 值为 $\lambda/20$, RMS 值为 $\lambda/100$ 。

Lexitek 公司生产的位相板大气湍流模拟器从改变位相的角度实现对大气湍流动态扰动现象的模拟。利用步进电机使位相板大气湍流模拟器绕其中心旋转,通过控制其转动速度进而发出不同强度状态下的大气湍流动态扰动现象。位相板大气湍流模拟器通过傅里叶变换滤波技术能够发出 Kolmogorov 等多种形式的大气湍流动态扰动模型。

本实验利用位相板大气湍流模拟器产生 Kolmogorov 湍流动态波前,大气相干长度 r_0 设定为 5 cm,位相板转速 20 r/min,对应格林伍德频率为 31 Hz,口径为 500 mm。由于大气相干长度 r_0 与波长 λ 密切相关,而本实验室研制的自适应系统的中心校正波长为 785 nm,因此位相板大气湍流模拟器发出的湍流中心波长也设置为 785 nm。依据这样的湍流参数,位相板上的光斑直径应为 10 mm,所以从位相板大气湍流模拟器到 Shack-Hartmann 波前探测器通光孔径处的缩束比约为 2.5 倍。

图2 测量大气相干长度 r_0 的室内实验装置Fig. 2 Laboratory measurement setup of atmospheric coherence length r_0

大气相干长度 r_0 的测量实验光路如图 2 所示。卤素灯光源发出的球面光波经中心波长 λ 为 785 nm 的单色滤光片成为单色光,再经双胶合透镜 L_1 准直为平行光后入射到大气湍流模拟器的旋转位相板上进行位相调制。孔径光阑设置在紧贴位相板大气湍流模拟器位置处,其孔径可以在 1 ~ 15 mm 连续调节,能够直接控制入射到位于位相板大气湍流模拟器上的光斑直径,设置光斑直径为 10 mm。将位相板大气湍流模拟器上的光斑作为物,再经双胶合透镜 L_2 、双胶合透镜 L_3 缩

束为与 Shack-Hartmann 波前探测器匹配的口径,由于此处的缩束比约为 2.5 倍。选定双胶合透镜 L_2 的焦距为 250 mm,双胶合透镜 L_3 的焦距为 100 mm,使全口径波前能够全部进入 Shack-Hartmann 波前探测器。

Shack-Hartmann 波前探测器记录的一幅光斑阵列如图 3 所示,在光斑阵列上选择距离为 12 个 r_0 的 2 个子孔径的星点像,如图中标记圆圈的一对点。

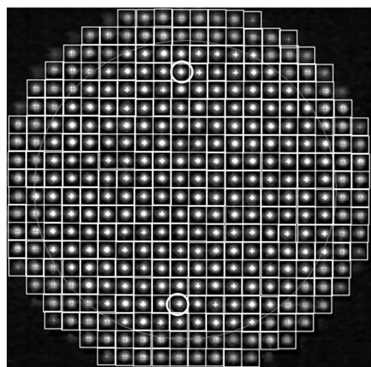


图 3 Shack-Hartmann 上的光点阵列及差分星点像运动法的一对点选择

Fig. 3 Selection of a pair of light spots for DIMM on the light spot array of Shack-Hartmann

基于传统差分星点像运动法对湍流模拟器发出的大气相干长度 r_0 进行统计。在已有文献报道中,根据式(1)统计计算的一个大气相干长度 r_0 值最少需要 200 幅畸变波面^[13],因此本实验中也采用每 200 幅畸变波面统计计算一个大气相干长度 r_0 值。位相板的转速为 20 (r/min),即周期为 3 s,采样时间只有位相板的 1/15 周期,不会出现周期性影响。为了考察传统差分星点像运动法的稳定性,令 Shack-Hartmann 波前探测器连续采集 10 s,共 10 000 幅波面。绘制出 r_0 随时间变化的曲线如图 4 所示,看出在 200 幅统计量内大气相干长度 r_0 的跳跃幅度接近 3 cm,起伏周期约 1 s,而位相板的周期为 3 s,所以这种 r_0 的跳跃不是湍流模拟器的周期性造成,而是统计方式问题;另外 r_0 的平均值约为 5.5 cm,也与位相板大气湍流模拟器发出的 5 cm 的大气相干长度 r_0 值相差较大。因此,须重新确定对大气相干长度 r_0 的统计量。将 Shack-Hartmann 波前探测器采集的每 200 幅畸变波面作为计算一个大气相干长度 r_0 的统计依据。将前 200 幅畸变波面(0~200 ms)

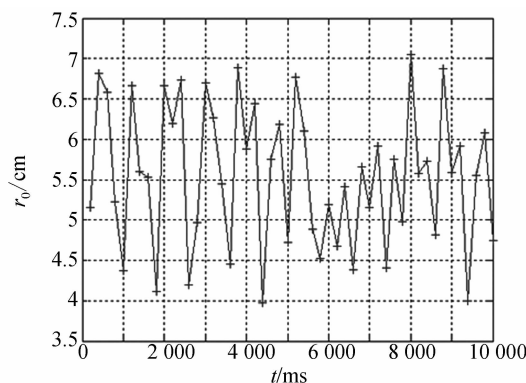


图 4 用 DIMM 法在 200 幅统计量下测得的大气相干长度 r_0 的波动曲线

Fig. 4 r_0 as a function of time for statistical number of 200 with DIMM

计算的大气相干长度 r_0 值记为 r_{01} ,将第 201 幅畸变波面到第 400 幅畸变波面(201~400 ms)计算的大气相干长度 r_0 值记为 r_{02} ,将 r_{01} 与 r_{02} 加和取平均作为前 400 ms 统计时间的大气相干长度 r_0 值;将第 401 幅畸变波面到第 600 幅畸变波面(401~600 ms)计算的大气相干长度 r_0 值记为 r_{03} ,将 r_{01} 、 r_{02} 与 r_{03} 加和取平均作为前 600 ms 的大气相干长度 r_0 值……

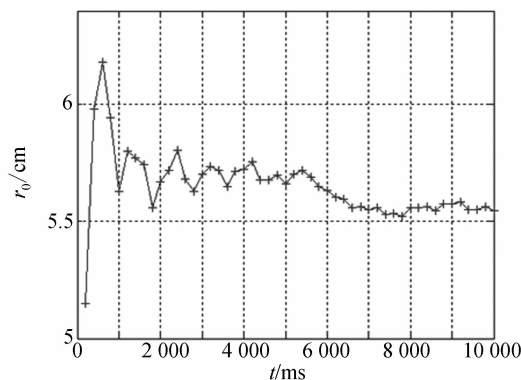


图 5 用 DIMM 法得出的大气相干长度 r_0 随统计波面数增加的收敛性

Fig. 5 r_0 as a function of statistical number with DIMM

按照上述方法对帧频为 1 020 Hz 的 Shack-Hartmann 波前探测器采集 10 s、10 000 幅的湍流畸变波面数据进行统计,得出大气相干长度 r_0 的统计曲线,如图 5 所示。从图中得出,在前 1 000 ms 的统计时间内大气相干长度 r_0 的数值起伏较大;在 1 000~6 000 ms 内起伏略有减小;在 7 000~10 000 ms 内大气相干长度 r_0 趋于稳定,而 7 000~10 000 ms 的统计时间远远超出了湍流

特性的描述时间。



图 6 畸变波面位相图

Fig. 6 Distorted wavefront

图 6 所示为 Shack-Hartmann 波前探测器任意采集的一幅畸变波面位相图,能够看出在波面的不同方位角上位相起伏的剧烈程度不同。传统差分星点像运动法是采用 Shack-Hartmann 波前探测器光点阵中某个方位角上一对点的抖动状态对大气相干长度 r_0 进行统计,很难保证整个波面上的统计充分性。当位相板大气湍流模拟器绕其中心旋转时,另一对点的抖动状态就会有所不同,因此一对点采集得到的畸变波面信息并不能充分反映大气湍流波面的全部信息。统计时间的增加也不能弥补空间上统计几率的缺失。也就是说,传统差分星点像运动法采用波面上上一对点对大气相干长度 r_0 进行统计是有局限性的。

4 正方形分布的十二对点的 r_0 的统计实验

为了克服传统差分星点像运动法一对点统计大气相干长度 r_0 的局限性,将一对点 * 数百~数千幅的统计改为单幅畸变波面正方形分布的十二对点的平均统计,标号相同的一对点作为计算大气相干长度 r_0 的采样点,如图 7 所示。将十二对点分布在正方形上是为避免每对点间隔距离不同造成式(1)的失效。为了继续利用式(1)来计算 r_0 ,十二对点中每一对点间隔的微透镜个数必须相同,使式(1)中的 Z 值不变,满足一对子孔径的选取原则,简化计算。

图 8 是单幅畸变波面上十二对点平均得出的大气相干长度 r_0 值,在 10 s 内,纵坐标表示第 N

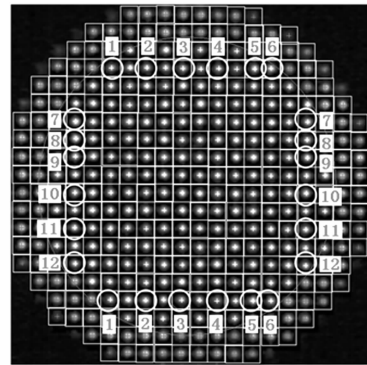


图 7 在 Shack-Hartmann 的点阵图上多对点的选取方法

Fig. 7 Selection method of several pairs of light spot array on SHWFS

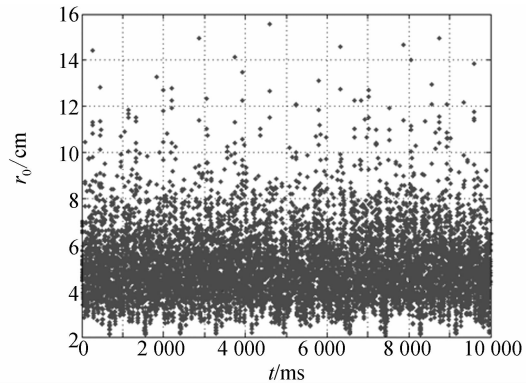


图 8 单幅畸变波面上十二对点(PLSSP)平均统计的大气相干长度 r_0

Fig. 8 Statistical r_0 results for 12 pairs of light spots of SHWFS

幅畸变波面的大气相干长度 r_0 平均值(其中 $N < 10\ 000$)。从图 8 中能够得出,单幅畸变波面十二对点平均算出的大气相干长度 r_0 更加分散,大多分布在 3~7 cm 之内,还有一些大气相干长度 r_0 值分布在 8~16 cm 之间,但平均线已与位相板大气湍流模拟器发出的 5 cm 的大气相干长度相符,说明空间的对称统计更容易反映大气湍流动态扰动的真实状况,只是需要增加统计量。

因此,不断增加畸变波面的采样幅数考察十二对点法对大气相干长度 r_0 的统计收敛性。方法类似图 5 曲线的统计方法,将第 1 幅畸变波面中十二对点计算的大气相干长度 r_0 值记为 r_{001} ,并将其作为前 1 ms 的大气相干长度 r_0 值;将第 2 幅畸变波面中十二对点计算的大气相干长度 r_0 值记为 r_{002} ,将 r_{001} 与 r_{002} 加和取平均作为前 2 ms

的大气相干长度 r_0 值;将第 3 幅畸变波面中十二对点计算的大气相干长度 r_0 值记为 r_{003} ,将 r_{003} 、 r_{002} 与 r_{001} 加和取平均作为前 3 ms 的大气相干长度 r_0 值……。

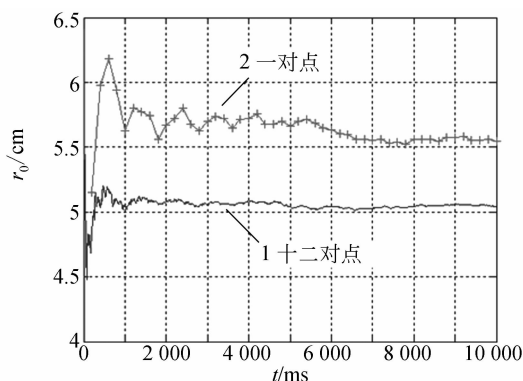
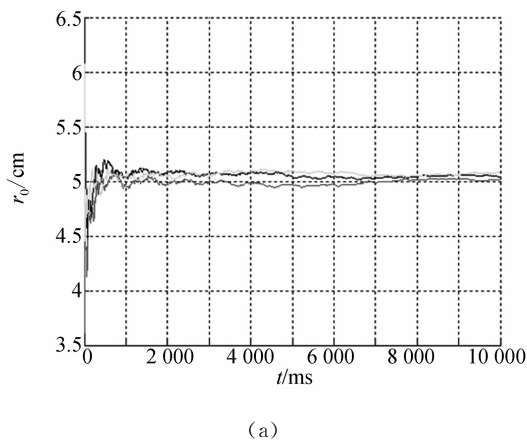


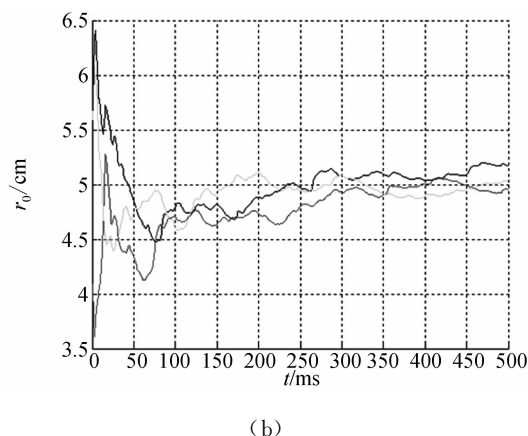
图 9 一对点法与十二对点法对大气相干长度 r_0 的统计收敛性比较

Fig. 9 Comparison of r_0 results between 1 and 12 pairs of light spots on SHWFS

结果如图 9 所示,其中曲线 1 为十二对点法、曲线 2 为一对差分星点像运动法获得的大气相干长度 r_0 随统计幅数的波动曲线。十二对点法在 300 ms 的统计时间内即可使大气相干长度 r_0 收敛到 5 cm,完成动态统计,在时间上远小于传统一对点的差分星点像运动法。也就是说,十二对点法从空间上充分增加了大气相干长度 r_0 采样点的统计数量,从空间群的概念来说中心对称统计较完全,增加了统计的有效比例,进而大幅降低传统差分星点像运动法的统计时间,能够反映大气湍流强度的即时性。



(a)



(b)

图 10 在不同时刻十二对点法统计大气相干长度 r_0 的收敛性曲线

Fig. 10 Atmospheric coherence length r_0 results for 12 pairs of light spots at different time

为了确认十二对点法的时间收敛性,令位相板大气湍流模拟器发出大气相干长度 r_0 为 5 cm 的湍流,在不同的 3 个时刻、相同采样时间(10 s)进行统计,统计结果如图 10(a)所示。将图 10(a)中前 500 幅畸变波面(500 ms)统计曲线放大,如图 10(b)所示,不同 3 个时刻的前 300 幅畸变波面(300 ms)统计得出的大气相干长度 r_0 值都基本达到 5 cm 左右的稳定状态,只在其平均值 $\pm 3\%$ 的范围内波动。说明无论什么时刻,十二对点法的时间收敛性都很好,此法在 300 幅畸变波面(300 ms)统计下得出的大气相干长度 r_0 值具有普适的稳定性。

实际上大气湍流的强度应该在尽量短的时间内完成统计。统计时间越短,结果与大气湍流的即时状况越相符。从 3 组实验的统计结果能够得出,畸变波面上正方形分布的十二对点差分运动法统计出的大气相干长度 r_0 ,准确度较高。

5 结 论

采用传统的一对差分星点像运动法对大气相干长度 r_0 进行统计测量,在 7 s 的统计时间下大气相干长度 r_0 才能达到稳定值,且不符合大气湍流模拟器发出的真实 r_0 值。说明传统差分星点像运动法在波面上只采用一对点对大气相干长度 r_0 进行统计是有局限性的。为此提出畸变波面上正方形分布的十二对点的差分运动统计方法,从空间角度上增加了大气相干长度 r_0 采样的统

计数量,同时从空间群的概念来说增加了中心对称统计,大幅降低了统计时间,仅使用 300 ms 采样 300 幅畸变波面即可完成对大气相干长度 r_0

的统计,得出稳定而准确的 r_0 值,其波动范围只有 $\pm 3\%$,解决了长期以来大气相干长度 r_0 的统计量不确定、测定误差无法分析的问题。

参考文献:

- [1] VALLEY G C. Isoplanatic degradation of tilt correction and short-term imaging systems [J]. *Appl. Opt.*, 1980, 19:574.
- [2] BABCOCK H W. The possibility of compensating astronomical seeing [J]. *Publ Astron. Soc. Pac.*, 1953, 65:229-236.
- [3] 陈浩,宣丽,胡立发,等. 1 200 mm 望远镜开环液晶自适应光学系统设计[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1):29-36.
CHEN H, XUAN L, HU L F, *et al.*. Design on open-loop liquid crystal adaptive optical system for 1 200 mm telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1):29-36. (in Chinese)
- [4] 陈浩,宣丽,胡立发,等. 望远镜的紧凑型闭环液晶自适应光学系统设计[J]. *液晶与显示*, 2010, 25(3):379-385.
CHEN H, XUAN L, HU L F, *et al.*. Design on compact type closed-loop liquid crystal adaptive optical system for telescope [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays.*, 2010, 25(3):379-385. (in Chinese)
- [5] SLAVIN A C, WELLS A L, FUGATE R Q, *et al.*. A comparison of three methods of measuring the atmospheric coherence length [C]. *Proc. SPIE*, 1997, 3125:241-249.
- [6] DAVID D, BOB P, BRIAN S. Atmospheric structure function measurement with a Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. *Optics Letters*, 1992, 17(24):1737-1739.
- [7] TRAVOUILLON T, ASHLEY M C B, BURTON M G, *et al.*. Automated Shack-Hartmann seeing measurements at the south pole [J]. *A&A*, 2003, 409:1169-1173.
- [8] LUHE O V. Estimating Fried's parameter from a time series of an arbitrary resolved object imaged through atmospheric turbulence [J]. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 1984, 1(5):510-519.
- [9] TOKOVININ A. From differential image motion to seeing [J]. *The Astronomical Society of the Pacific*, 2002, 114: 1156-1166.
- [10] 饶长辉,姜文汉,凌宁. 应用哈特曼-夏克波前传感器测量大气湍流参数[J]. *光学学报*, 2000, 20(9):1201-1207.
- RAO CH H, JIANG W H, LING N. Atmospheric parameters measurements for Non-Kolmogorov turbulence with Hartmann-Shack sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(9):1201-1207. (in Chinese)
- [11] 饶瑞中,王世鹏,刘晓春,等. 湍流大气中的激光束漂移的实验研究 [J]. *中国激光*, 2000, 27(11):1011-1015.
RAO R ZH, WANG SH P, LIU X CH, *et al.*. Experimental study of spot dancing of laser beam in a turbulent atmosphere [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, 27(11):1011-1015. (in Chinese)
- [12] 黄宏华,姚永帮,饶瑞中. 四孔差分像运动测量大气相干长度的方法研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(3):357-360.
HUANG H H, YAO Y B, RAO R ZH. Measurement of atmospheric coherent length by four-aperture differential image motion method [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(3):357-360. (in Chinese)
- [13] 倪志波,黄宏华,黄印博,等. Dome 效应对四孔大气相干长度仪系统性能的影响 [J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(11):2551-2555.
NI ZH B, HUANG H H, HUANG Y B, *et al.*. Influence of Dome effect on system performance of four-aperture coherent length monitors [J]. *High power laser and particle beams*, 2010, 22(11):2551-2555. (in Chinese)
- [14] RODDIER F. The effects of atmospheric turbulence in optical astronomy [J]. *Prog. Optics.*, 1981, 19:281-376.
- [15] SEIFERT L, LIESENER J, TIZIANI H J. The adaptive Shack-Hartmann sensor [J]. *Opt. Comm.*, 2002, 163:313-319.
- [16] 母一宁,刘泉,于林韬,等. 哈特曼技术在序列光斑检测中的应用 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(9):2197-2204.
MU Y N, LIU Q, YU L T, *et al.*. Application of Hartmann technique in sequence spot detection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9):2197-2204. (in Chinese)

- [17] 樊志华,王春鸿,姜文汉. 基于累加器的哈特曼-夏克波前斜率处理器[J]. 光学精密工程, 2011, 19(3):501-507.

FAN ZH H, WANG CH H, JIANG W H. Accu-

mulator-based wavefront slope processor for Shack-Hartmann sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(3):501-507. (in Chinese)

作者简介:



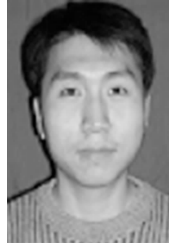
陈浩(1985—),男,吉林长春人,博士研究生,2007年于长春理工大学获学士学位。主要从事大气湍流的液晶自适应光学系统设计、Shack-Hartmann波前探测器转接镜头设计、大气湍流时空特性统计方法等方面的研究工作。E-mail:chha7@126.com



胡立发(1974—),男,湖北武汉人,博士,研究员。1997年、2003年于东北大学分别获得学士、博士学位。主要从事液晶自适应光学控制技术的研究工作。E-mail:hulifa@ciomp.ac.cn



曹召良(1974—),男,河南济源人,博士,副研究员。1998年于河南师范大学获学士学位,2003年、2008年于中科院院长春光学精密机械与物理研究所分别获硕士、博士学位,主要从事液晶自适应光学技术理论、光学系统总体设计及液晶光学器件调试方面的研究。E-mail:caozlok@yahoo.com.cn



穆全全(1980—),男,山西吕梁人,博士,副研究员。2003年于南开大学获学士学位,2010年于中科院院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位。主要从事自适应光学系统总体设计、液晶材料折射率及自适应光学核心器件等方面的研究。E-mail:muquanquan@ciomp.ac.cn

导师简介:



宣丽(1957—),女,江苏常州人,博士,研究员,博士生导师,中国物理学会液晶分会常务副主任。1983年于吉林大学获学士学位,1986年于长春物理研究所获硕士学位;1998年于日本东北大学获博士学位,主要从事液晶自适应光学、液晶光学器件及液晶高分子化学等方面的研究工作。E-mail:xuanli@ciomp.ac.cn

(本栏目编辑:曹金)
(版权所有 未经许可 不得转载)