

大气相干长度的稳定测量方法

申请号：[201210264328.5](#)

申请日：2012-07-27

申请(专利权)人 [中国科学院长春光学精密机械与物理研究所](#)

地址 [130033 吉林省长春市东南湖大路3888号](#)

发明(设计)人 [宣丽 胡立发 穆全全 曹召良 彭增辉 杨程亮 陈浩 刘永刚](#)
[姚丽双 李大禹 夏明亮 鲁兴海](#)

主分类号 [G01J9/00\(2006.01\)I](#)

分类号 [G01J9/00\(2006.01\)I](#)

公开(公告)号 [102778300A](#)

公开(公告)日 [2012-11-14](#)

专利代理机构 [长春菁华专利商标代理事务所 22210](#)

代理人 [南小平](#)



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102778300 B

(45) 授权公告日 2014. 07. 09

(21) 申请号 201210264328. 5

(22) 申请日 2012. 07. 27

(73) 专利权人 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

地址 130033 吉林省长春市东南湖大路 3888 号

(72) 发明人 宣丽 胡立发 穆全全 曹召良
彭增辉 杨程亮 陈浩 刘永刚
姚丽双 李大禹 夏明亮 鲁兴海

(74) 专利代理机构 长春菁华专利商标代理事务所 22210

代理人 南小平

(51) Int. Cl.

G01J 9/00 (2006. 01)

(56) 对比文件

US 5537209 A, 1996. 07. 16, 全文.

JP 2004-309201 A, 2004. 11. 04, 全文.

CN 101017207 A, 2007. 08. 15, 全文.

US 5343287 A, 1994. 08. 30, 全文.

CN 101813523 A, 2010. 08. 25, 全文.

黄宏华, 等. 四孔差分像运动测量大气相干长度的方法研究. 《强激光与粒子束》. 2007, 第 19 卷 (第 3 期), 357-360.

汪建业, 等. 大气相干长度的对比度实验研究. 《中国激光》. 2005, 第 32 卷 (第 1 期), 64-66.

John bally, et al. A hartmann differential image motion monitor (H-DIMM) for atmospheric turbulence characterisation. 《Publ. astron. soc. aust.》. 1996, 第 13 卷 (第 1 期), 22-27.

WEI NINGHUA, et al. the comparision of methods of two measuring atmospheric coherent length. 《PROCEEDINGS OF SPIE》. 2005, 第 5832 卷 66-72.

审查员 刘娟

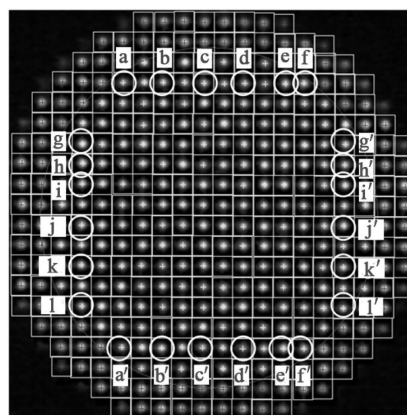
权利要求书1页 说明书4页 附图2页

(54) 发明名称

大气相干长度的稳定测量方法

(57) 摘要

本发明属于光学技术领域, 是一种大气相干长度 r_0 的稳定测量方法。根据大气湍流的时空几率一致特性, 在哈特曼波前探测器上选取正多边形对称分布的多对子孔径, 以增加空间统计几率, 同时减少采样时间。为了继续利用公式 (1) 来计算 r_0 , 选取多对子孔径的方法是保持每一对子孔径的中心间距都严格相同, 同时满足一对子孔径的选取原则, 这样在哈特曼波前探测器结构的限制下正多边形对称分布的多对子孔径就简化为正方形分布。利用 1 秒时间内采集的数百幅湍流波面的光斑阵列信号, 将每幅光斑阵列信号上正方形对称分布的多对像点的差分运动均代入公式 (1) 中进行全同统计平均, 得出准确的、带有即时特征的大气相干长度 r_0 值。



1. 大气相干长度 r_0 的稳定测量方法, 其特征在于, 该方法为:

将 Shack-Hartmann 波前探测器与一天文望远镜光学对接, 使望远镜接收到的任意一恒星的光束能够全口径、且与 Shack-Hartmann 波前探测器接收口径相同、平行入射 Shack-Hartmann 波前探测器;

在 Shack-Hartmann 波前探测器测得的光斑阵列上的两个垂直方向分别选取正方形对称分布的 10 ~ 14 对子孔径, 以增加空间统计几率, 同时减少采样时间;

利用公式:

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

公式中的 f 为测量系统的焦距, λ 为接收光的中心波长, D 为子孔径的直径, Z 为每对子孔径的中心间距, 且 $Z > 3r_0$, Z_q 为两子孔径的成像点质心间距, $\langle \rangle$ 为时间统计平均符号;

选取多对子孔径的方法是保持公式中的 Z 值不变, 即每一对子孔径的中心间距都严格相同; Shack-Hartmann 波前探测器的采样频率不得小于 500Hz, 连续采集 300 ~ 500 幅湍流波面的光斑阵列信号; 将 300 ~ 500 幅阵列上每一对像点的质心间距 Z_q 均代入公式中进行统计平均, 得出稳定的、带有即时特征的大气相干长度 r_0 值。

2. 根据权利要求 1 所述的大气相干长度 r_0 的稳定测量方法, 其特征是: Shack-Hartmann 波前探测器帧频为 1020Hz。

3. 根据权利要求 2 所述的大气相干长度 r_0 的稳定测量方法, 其特征是: 在 Shack-Hartmann 波前探测器上获得的光斑阵列图, 其两个垂直方向上分别选择间距 12 个光斑即 12 倍 r_0 的 6 对光斑, 形成正方形分布的 12 对子孔径的星点像, 连续采集 300 幅光斑阵列数据, 将每对星点像的质心间距 Z_q 代入权利要求 1 所述的公式中, 统计计算出 r_0 。

大气相干长度的稳定测量方法

技术领域

[0001] 本发明属于自适应光学领域,涉及大气通道的自适应校正效果的评价参数,具体地说是大气湍流强度参数即大气相干长度的稳定测量方法。

背景技术

[0002] 地球表面垂直方向上有 10~20 公里的大气层,由于温度的不均匀变化使得空气局部密度不同,即而导致大气折射率不均匀,从而形成大气湍流对光波前的动态扰动现象。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而产生不同程度的波前畸变,严重影响成像质量。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。

[0003] 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,表征大气湍流的动态扰动越剧烈,取值范围一般在几个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 为直径的圆域或者说是子孔径内位相起伏的均方根值 RMS 是 1rad。当光学波面的直径超过大气相干长度 r_0 值的尺度时,光学波面的畸变量将降低光学接收系统的成像分辨率。

[0004] 通常采用两种方法测量大气相干长度 r_0 :一种是通过测量大气湍流折射率结构常数进而求出大气相干长度 r_0 ,需要经过长期观测才能得到折射率结构常数的统计规律;另一种是通过测量畸变波前的位相信息求出大气相干长度 r_0 ,就是所谓的差分星点像运动法(DIMM),已被广泛采用。

[0005] 差分星点像运动法(DIMM)由 Stock 和 Keller 于 1960 年提出,其测量原理为:在天文望远镜的入瞳位置处放置一块挡板,挡板上开具有两个子孔径,两个子孔径之间的距离远大于子孔径直径。来自大气通道另一端的点目标光束经过两个子孔径到达观测 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,就能够计算出大气相干长度 r_0 的值。F. Roddier 在 Fried 理论研究的基础上,推导出计算大气相干长度 r_0 的基本公式【F. Roddier, The effects of atmospheric turbulence in optical astronomy, [J]. Prog. Optics, 1981, 19:281~376】:

$$[0006] \quad r_0 = \left[\frac{2f^2 l^2 (0.358D^{1/3} - 0.242Z^{1/3})}{\langle Z_q^2 \rangle - \langle Z_q \rangle^2} \right]^{3/5}$$

[0007] 其中, f 为测量系统的焦距, λ 为接收光的中心波长, D 为子孔径的直径, Z 为两子孔径的中心间距,且 $Z \gg r_0$, Z_q 为两子孔径的成像点质心间距, $\langle \rangle$ 为时间统计平均符号。像点质心坐标 (c_x, c_y) 的求算方法依据【Francois Roddier, Adaptive optics in astronomy, Cambridge University Press, 1999, Part two, pp99】:

$$[0008] \quad c_x = \frac{\sum_{i,j} x_{i,j} I_{i,j}}{\sum_{i,j} I_{i,j}}, c_y = \frac{\sum_{i,j} y_{i,j} I_{i,j}}{\sum_{i,j} I_{i,j}} \quad (2)$$

[0009] 其中 i, j 是 CCD 相机像素构成的直角坐标系上像素的序号, $x_{i,j}$ 与 $y_{i,j}$ 分别为 (i, j) 像素的两个坐标分量, $I_{i,j}$ 为 (i, j) 像素的光强。

[0010] 实际上采用 Shack-Hartmann 波前探测器即可对 r_0 进行 DIMM 法的测量【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】。使用约千赫兹采样频率的 Shack-Hartmann 波前探测器, 选择其上距离足够远的两个子孔径, 通常这两个子孔径的位置在接收波面上呈中心对称。测量时连续采集 10s、约 10000 幅大气通道上的光点阵列, 然后只考虑每一幅上被选择的两个子孔径的星点像质心距离, 按照 (1) 式统计计算 r_0 。

[0011] 但是, 采用 DIMM 法在某一个时刻测得的大气相干长度 r_0 值经常会在数秒之后突然跃升二、三厘米, 偶然还可跃升近十厘米。这种现象与大气湍流的速度特性并不相符。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个方位上都是不同的, DIMM 法只统计固定位置上的两个子孔径像点质心的运动, 要想统计全面必须花费较长时间。如果统计 1 万次也难以保证 r_0 测量的准确性, 说明 1 万次的统计量还不够; 但是再增加统计量, 也有可能造成采样时间过长, 超过 r_0 保持恒定的时间, 平均掉 r_0 的变化。因此传统测量大气相干长度 r_0 的 DIMM 方法是有缺陷的。

[0012] 2000 年饶瑞中采用三孔、即三对星点像差分运动法【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.】, 尝试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孔 (四孔)、即六对星点像差分运动法【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.】, 并在 2010 年的文章中【倪志波, 黄宏华, 黄印博, 朱文越, 饶瑞中 [J]. Dome 效应对四孔大气相干长度仪系统性能的影响, 强激光与粒子束, 2010, 22(11):2551-2555.】统计了 6 对星点像 $\times 200$ 幅图的差分结果, 测得的 r_0 变化速度大幅减缓, 约 $0.6 \sim 0.7 \text{ cm/min}$, 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, 是否有波前局地异性随时间变化的影响; 另外这 6 对孔径中每两子孔径的中心间距不尽相同, 须改造公式 (1) 的统计计算方法, 使计算量增加。

发明内容

[0013] 本发明为了克服大气相干长度 r_0 统计方法的缺陷, 提出在 Shack-Hartmann 波前探测器测得的光斑阵列上选取正多边形对称分布的多对子孔径, 大幅增加系综统计几率, 同时保持公式 (1) 的统计计算方法有效, 目的是提供一种准确而简便的大气相干长度 r_0 的稳定测量方法。

[0014] 下面详述本发明。将 Shack-Hartmann 波前探测器与一天文望远镜光学对接, 使望远镜接收到的任意一恒星的光束能够全口径、且与 Shack-Hartmann 波前探测器接收口径相同、平行入射 Shack-Hartmann 波前探测器。根据大气湍流的时空几率一致特性, 在 Shack-Hartmann 波前探测器测得的光斑阵列上选取正多边形对称分布的多对子孔径, 以增加空间统计几率, 同时减少采样时间。为了继续利用公式 (1) 来计算 r_0 , 选取多对子孔径的

方法是保持公式(1)中的 Z 值不变,即每一对子孔径的中心间距都严格相同,且远大于 r_0 。这样在 Shack-Hartmann 波前探测器结构的限制下正多边形对称分布的多对子孔径就只能简化为如图 1 所示的正方形、或六角形分布,选择其上 10 ~ 14 对子孔径。Shack-Hartmann 波前探测器的采样频率不得小于 500Hz,连续采集 300 ~ 500 幅湍流波面的光斑阵列信号。将 300 ~ 500 幅阵列上每一对像点的质心间距 Z_q 均代入公式(1)中进行统计平均,得出误差小于 3% 的、带有即时特征的大气相干长度 r_0 值。

附图说明

[0015] 图 1 为本发明中利用大气湍流模拟器测量大气相干长度 r_0 的室内实验光路示意图。其中 1 为卤素灯点光源,2 为 785nm 波长的单色滤光片,3 为第一透镜,将点光源的光准直为直径合适的平行光,4 为大气湍流模拟器的旋转位相板,5 为孔径光阑,6 为第二透镜,7 为第三透镜,二者组成缩束透镜组,8 为 Shack-Hartmann 波前探测器,全口径接收大气湍流模拟器扰动后的光束,9 为与 Shack-Hartmann 波前探测器 8 相连的计算机,读出与存储所采集的光斑阵列图数据。

[0016] 图 2 为本发明中在 Shack-Hartmann 的光斑阵列图上 12 对点的选取方法。在光斑阵列两个垂直方向上分别选择间距 12 个光斑即 12 倍 r_0 的 6 对光斑,形成正方形分布的 12 对子孔径的星点像,用字母标记成对光点:a 与 a', b 与 b', c 与 c', d 与 d', e 与 e', f 与 f', g 与 g', h 与 h', i 与 i', j 与 j', k 与 k', l 与 l'。

[0017] 图 3 为本发明具体实施例中对 Shack-Hartmann 的光斑阵列图上分别选取 1 对点和 12 对点,获得的 r_0 随统计量的变化曲线,其中曲线 A 是 1 对点的结果,曲线 B 是 12 对点的结果。

具体实施方式

[0018] 1) 按照图 1 搭建测量 r_0 的实验光路。其中卤素灯点光源 1 发出的球面光波经波长为 785nm,经单色滤光片 2 成为单色光,再经第一透镜 3 准直为平行光后入射到大气湍流模拟器的旋转位相板 4 上,孔径光阑 5 设置在紧靠大气湍流模拟器的旋转位相板的通光口径处,孔径光阑 5 的孔径设置为 10mm,通过孔径光阑 5 的光束再经第二透镜 6、第三透镜 7 缩束 2.5 倍成为 4mm 口径的平行光束进入到 Shack-Hartmann 波前探测器 8 的通光窗口内切圆上,计算机 9 与 Shack-Hartmann 波前探测器 8 相连,读出与存储所采集的光斑阵列图数据。

[0019] 2) 步骤 1) 中所述大气湍流模拟器为 Lexitek 公司产品,通过控制位相板上的通光口径来确定大气相干长度 r_0 ,通过控制位相板转动速度来确定湍流频率即格林武德频率:首先设定湍流中心波长为 785nm,然后设定望远镜口径为 500mm,大气相干长度 r_0 设定为 5.0cm,在该产品的使用手册上查找到相应位相板上的光斑直径为 10mm,选择湍流频率即格林武德频率 31Hz,在该产品的使用手册上查找到相应位相板转速为 20 转/min。

[0020] 3) 孔径光阑 5 的孔径可以在 1mm 到 15mm 范围内连续调节,能够控制入射到大气湍流模拟器旋转位相板 4 上的光束直径。

[0021] 4) Shack-Hartmann 波前探测器 8 帧频为 1020Hz,感光元件为 Intevac Photonics 公司的 MicroVista-NIR 背照明式 CMOS 相机,该相机的像素数达到 1280×1024 个,微透镜

数为 20×20 个、以方格阵列排列,每个微透镜对应 7×7 个像素,共使用 CMOS 相机的像素数为 140×140 个,对应窗口为 $4\text{mm} \times 4\text{mm}$ 。

[0022] 5)第一透镜 3、第二透镜 6、第三透镜 7 均为消色差双胶合透镜,其中第一透镜 3 的口径为 40mm ,焦距为 270mm ,使到达位相板上的光斑直径为 10mm ,以模拟口径为 500mm 的波前;第二透镜 6、第三透镜 7 的口径分别为 40mm 和 25mm ,焦距分别为 250mm 、 100mm ,以使光束缩束 2.5 倍,其口径与 Shack-Hartmann 波前探测器 8 的通光口径相同。

[0023] 6)开启点光源 1 后,Shack-Hartmann 波前探测器 8 获得的光斑阵列如图 2,在光斑阵列两个垂直方向上分别选择间距 12 个光斑即 12 倍 r_0 的 6 对光斑,形成正方形分布的 12 对子孔径的星点像,如图 2 中标记字母的成对光点。

[0024] 7)开启大气湍流模拟器旋转位相板 4 后,连续采集 10000 幅光斑阵列数据,在光斑阵列图上分别选取 1 对点和 12 对点,计算出每对星点像的质心间距 Z_q 代入公式(1)中,获得的 r_0 随统计量的变化曲线如图 3 所示,其中曲线 A 是 12 对点的结果,曲线 B 是 1 对点的结果,看出曲线 A 中 300 幅光斑阵列数据统计出来的 r_0 已经收敛,为 5.1cm ,与 r_0 设定值 5.0cm 相比只有 2% 误差,而曲线 B 则到 6500 幅以后才收敛,且收敛到 5.5cm ,与 r_0 设定值 5.0cm 相比有 10% 的误差。

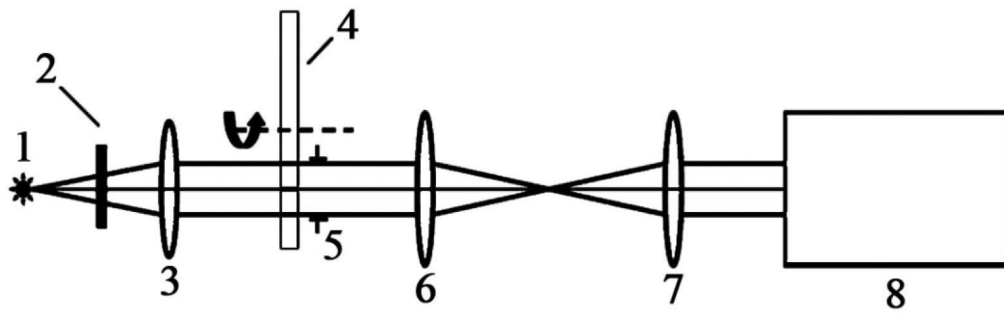


图 1

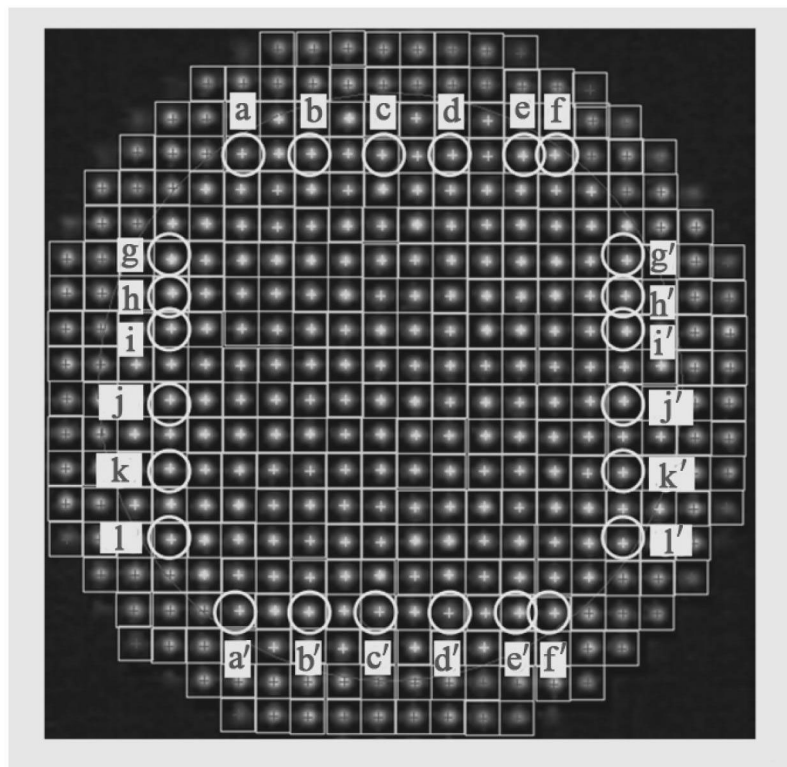


图 2

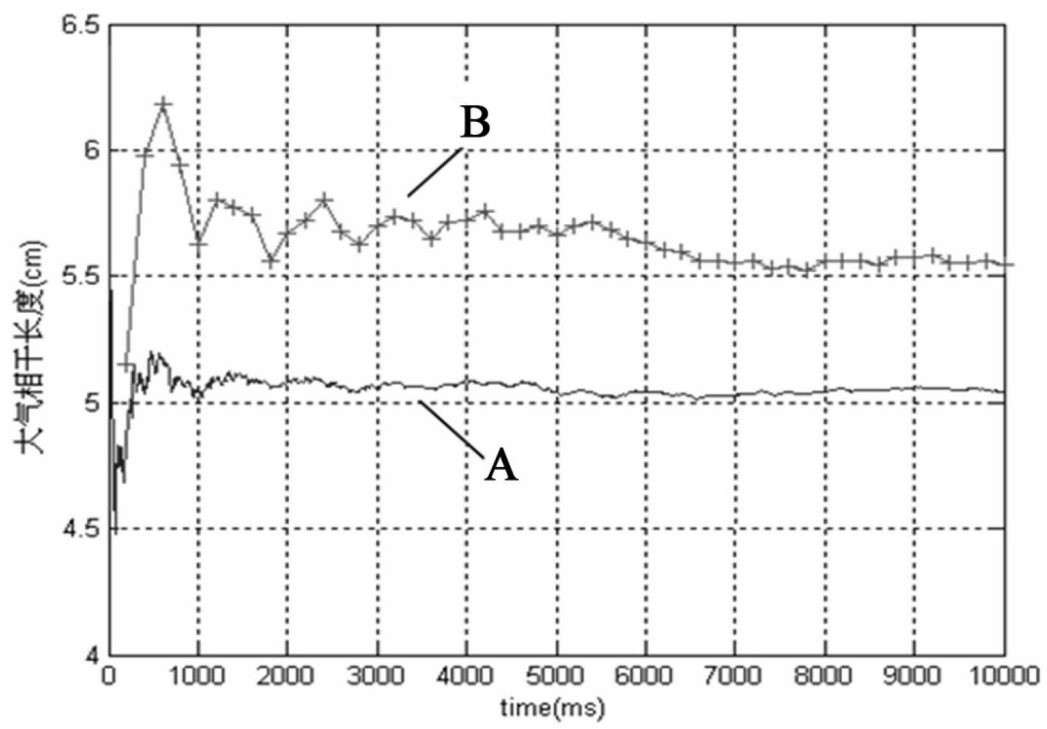


图 3