

文章编号: 0253-2239(2008)09-1659-05

Shack-Hartmann 波前传感器用于闪烁和相位起伏效应的同时测量

苑克娥 朱文越 饶瑞中

(中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学特性研究室, 安徽 合肥 230031)

摘要 将每一个子孔径及相应的 CCD 面元作为一个光强探测系统, 可以将 Shack-Hartmann 波前传感器用于湍流大气闪烁效应的测量。分析了该测量方法的基本原理, 并结合其波前探测的功能, 在近地面水平 1 km 的湍流大气中, 同时进行了闪烁和相位起伏的实验研究。将闪烁测量得到的 C_n^2 与大口径闪烁仪测量的结果进行对比, 发现两者的相关系数达 0.838, 验证了 Shack-Hartmann 波前传感器用于闪烁效应测量的可靠性。对闪烁和相位起伏效应得到的 C_n^2 的日变化进行了对比, 结果表明, 两者在变化趋势上具有较好的一致性; 采用双对数坐标对两种结果进行相关性分析, 发现两者的相关系数达 0.798。这表明将 Shack-Hartmann 波前传感器用于闪烁和相位起伏效应的同时测量是可行的, 拓展了该传感器的使用功能。

关键词 大气湍流; Shack-Hartmann 波前传感器; 闪烁; 相位起伏; 折射率结构常数

中图分类号 P427.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082809.1659

Simultaneous Measurements on Scintillation and Phase Fluctuation of Light Propagation through Atmospheric Turbulence by Shack-Hartmann Wavefront Sensor

Yuan Ke'e Zhu Wenyue Rao Ruizhong

(Laboratory for Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract Shack-Hartmann wavefront sensor is used to explore irradiance scintillation effect of light propagation through atmospheric turbulence, whose subaperture and corresponding CCD element are regarded as intensity detector system. Its principle is analyzed. Experiments on phase fluctuation and scintillation are preliminarily carried out in atmospheric boundary layer over 1000 m horizontal path. Compared with the measurement results of traditional large-aperture scintillometer, it is found that the method of Shack-Hartmann wavefront sensor is reliable with correlation coefficient of 0.838. At the same time, the daily variation trend of the refractive index structure constants retrieved from the two atmospheric turbulence effects is compared. The correlation coefficient of the two C_n^2 reaches 0.798 in the log-log grid. All the experimental results indicate that simultaneous measurement of phase fluctuation and scintillation by Shack-Hartmann wavefront sensor is feasible, which extends the function of this sensor.

Key words atmospheric turbulence; Shack-Hartmann wavefront sensor; scintillation; phase fluctuation; refractive index structure constant

1 引 言

太阳辐射、人类活动等因素造就了大气的湍流运动, 导致大气的折射率发生随机起伏。当光在湍

流大气中传输时其相位和振幅会同时发生随机起伏, 从而产生波前畸变、光斑漂移以及光强起伏等一系列的湍流效应^[1~3]。因此, 湍流大气中光束的传

收稿日期: 2007-11-26; 收到修改稿日期: 2008-01-14

基金项目: 中国科学院方向性创新项目(KGCX2-SW-413)和国防预研基金(51403040605zk0901)资助课题。

作者简介: 苑克娥(1979-), 女, 博士研究生, 主要从事激光大气传输方面的研究。E-mail: yuanke0301@163.com

导师简介: 饶瑞中(1963-), 男, 研究员, 主要从事激光大气传输前沿物理问题、光辐射和图像的大气传输、大气湍流的光学特性及光学湍流测量方法等方面的研究。E-mail: rao@aiofm.ac.cn

输规律是许多激光应用工程中需要长期研究的一个十分重要的问题。

目前,闪烁探测法^[4]比较成功的实现了湍流大气中光束振幅起伏的测量研究;近年来逐渐发展成熟的自适应光学技术^[5,6]可以实时测量传输通道上湍流扰动引起的动态波前像差,并在一定程度上实现了畸变相位的校正。而对光束振幅和相位起伏的同时测量却未见详细报道。Shack-Hartmann 波前传感器(以下简称 S-H 波前传感器)具有较高的时间和空间分辨率,能够动态的提供大气湍流畸变波前的时间与空间分布,已经成为自适应光学系统的首选传感器。本文在其波前测量原理的基础上,通过统计每个子孔径内感光灰度值的起伏,实现了将其用于湍流大气中闪烁效应的测量,结合常规畸变波前测量的功能,可以对光束相位和光强起伏同时进行测量,并给出了两种效应推导的湍流折射率结构常数的对比分析。

2 基本原理

S-H 波前传感器主要由微透镜阵列和面阵 CCD 探测器构成。微透镜阵列将入射到传感器内的畸变波前采样分割为若干子波,分别会聚在其焦平面上形成一个光斑阵列,用面阵 CCD 进行感光探

测,如图 1 所示。每一个子光斑的质心相对于理想标定光束的像点发生位移,位移量与子孔径内入射的子波的平均斜率成正比,然后根据特定的波前重构算法即可得到入射的畸变波前^[7],这就是 S-H 波前传感器常规用于相位探测的原理。

图 1 还可以看出,包含湍流大气畸变信息的光波被每一个微透镜定义的子孔径接收,在焦平面上由相应的 CCD 面元感光成像。根据电荷耦合器件(CCD)在动态测量范围内具有较好的线性度,即输出信号与曝光量成线性的特点,将每一块 CCD 面元内所有像素的灰度值求和,就可以得到入射到每个子孔径内的相对光强值。这样,每一个入射子波、子孔径透镜以及相应的 CCD 面元就构成了一个光强探测系统,而整个传感器类似于一个紧密排列在一起的阵列探测器件^[8],每个探测器单元的等效口径为: $d=D/N$,这里 D, N^2 分别为传感器的入射瞳直径和子孔径数目。对得到的相对光强进行归一化统计处理便能得到归一化的光强起伏方差。只要 S-H 传感器的采样频率足够高,同时 CCD 的动态测量范围足够宽,就可以实现湍流大气闪烁效应的测量。这就是 S-H 波前传感器用于闪烁效应测量的基本原理。与以往的闪烁仪测量相比较,该方法不仅能测量光强的时间起伏信息,而且也能得到光强的空间起伏情况。

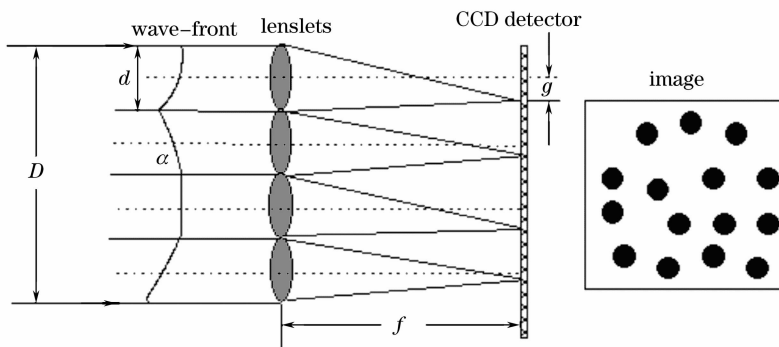


图 1 S-H 波前传感器的原理

Fig. 1 Principle of Shack-Hartmann wavefront sensor

根据光传播理论,在 Roytov 近似和 Kolmogorov 湍流谱条件下,球面波的光强起伏方差 σ_{IR}^2 和相位起伏方差 σ_{SR}^2 (去除波前倾斜项)与大气湍流强度的关系为^[9]

$$\sigma_{\text{IR}}^2 = 2.24k^{7/6} \int_0^L C_n^2(z) (z/L)^{5/6} (L-z)^{5/6} dz, \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{SR}}^2 = 0.0567k^2 D^{5/3} \int_0^L C_n^2(z) (z/L)^{5/3} dz, \quad (2)$$

其中 k 为光波波数, L 为光在湍流大气中的传播距离, D 为接收装置的口径。在水平传输条件下,通常认为湍流强度沿路径均匀分布,即 C_n^2 等效为常数。则(1)式、(2)式可简化为

$$\sigma_{\text{IR}}^2 = 0.496C_n^2 L^{11/6} k^{7/6}, \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{SR}}^2 = 0.0213k^2 D^{5/3} C_n^2 L, \quad (4)$$

显然,利用 S-H 波前传感器对光传输相位起伏和闪烁效应的同时测量,就可以利用(3)式、(4)式分别进行折射率结构常数的计算。

3 实验结果与分析

在水平 1000 m 的近地层湍流大气中进行了初步的实验测量,实验装置由三部分构成:光源、S-H 波前传感器和用于数据采集存储的计算机(如图 2 所示)。功率为 50 mW 的半导体激光器发出中心波长为 0.6328 μm 、发散角约 2 mrad 发散光束,经过 1000 m 的水平大气传输到达 S-H 波前传感器,光束离下垫面的高度约 5 m。传感器的入射瞳口径为 120 mm,微透镜阵列数目为 18×18 ,这样每个探测

器单元的等效口径约为 6.667 mm;面阵 CCD 采用的是加拿大 DALSA 公司生产的 CA-D6 型,其采样频率为 955 Hz。

实验中每隔 10 min 采集一次,每次采集 3000 帧,将时间和空间得到的样本点即 $18 \times 18 \times 3000$ 个数合并求得归一化起伏方差^[10],分别得到光强起伏和相位起伏方差的一个统计样本,由(3)式、(4)式即可得到两种湍流效应对应的湍流折射率结构常数的起伏。

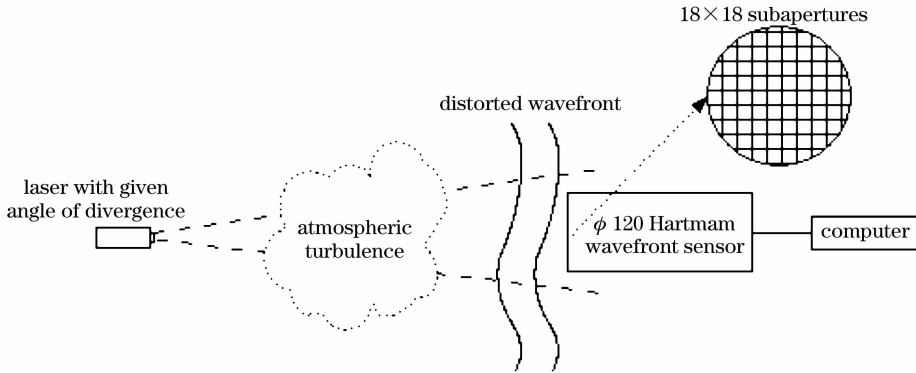


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

3.1 与闪烁仪测量结果的对比

为了验证 S-H 波前传感用于光传输闪烁效应的可靠性,同时进行了大口径闪烁仪($\phi 130$ mm)的实验。两系统使用相同波长的光源,实验在同样的传播距离和传播高度上进行,两光源的横向距离约为 500 mm。大口径闪烁仪在一定程度上克服了闪烁饱和现象^[11],可认为获得的 C_n^2 是准确的。

图 3 为两仪器测量结果的对比,实线为 S-H 波

前传感器测量得到的结果,虚线为闪烁仪对应的结果,这里对闪烁仪考虑了孔径平滑效应^[12]。可以看出,两种方法测量的结果在变化趋势上具有较好的一致性(数值上的微小差别主要由两仪器的系统偏差所致),线性拟合的相关系数达 0.838。由此表明 S-H 波前传感器的测量是可靠的,可以用于湍流大气光闪烁效应的测量。

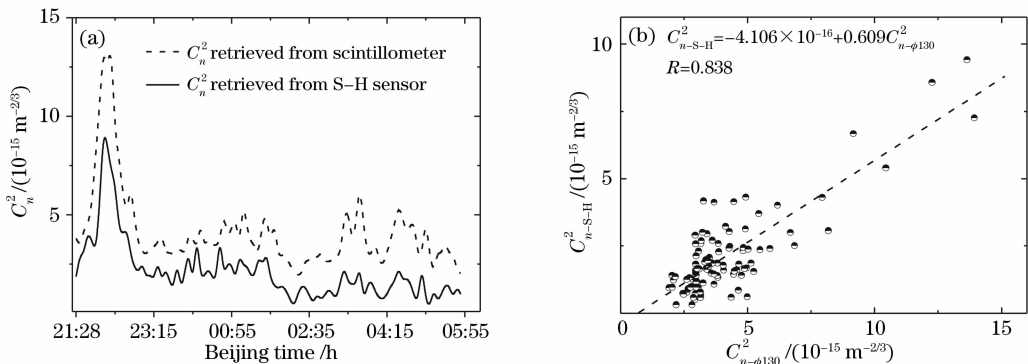


图 3 S-H 传感器与大口径闪烁仪测量的 C_n^2 的对比

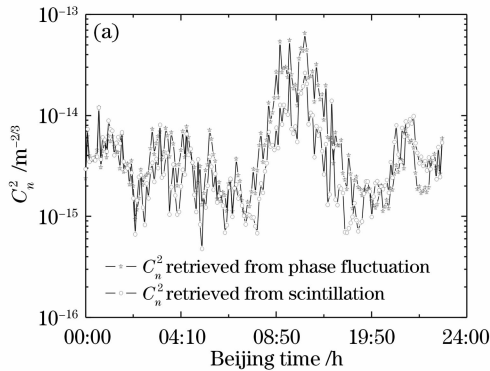
Fig. 3 Comparison of C_n^2 derived from Shack-Hartmann wavefront sensor and large-aperture scintillometer

3.2 闪烁和相位起伏效应的同时测量

图 4 为 S-H 波前传感器同时测量闪烁和相位起伏效应对应的 C_n^2 的日变化情况,实验时间为 2007 年 7 月 20 日 0:00 到 24:00,天气状况晴朗,夜

间有微风。初步的实验结果来看,湍流强度的起伏在全天跨越了近两个量级,最大值小于 $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$,夜间起伏较弱,白天的起伏较强,而且正午左右起伏最强,日出日落前后起伏最弱,这基本符合近地面弱

湍流起伏的统计特征^[3]。从图 4(a)可以看出,两种效应对应的 C_n^2 在全天的变化趋势上基本保持一致。以相位起伏推导的 C_n^2 为横坐标,以闪烁推导的 C_n^2 为纵坐标,采用双对数坐标对实验结果进行了线性



回归分析[图 4(b)所示],其中 SD 为拟合的标准偏差, R 为相关系数,可以看出两者的相关系数达 0.798。由此表明利用 S-H 波前传感器进行闪烁和相位起伏效应的同时测量是可行的。

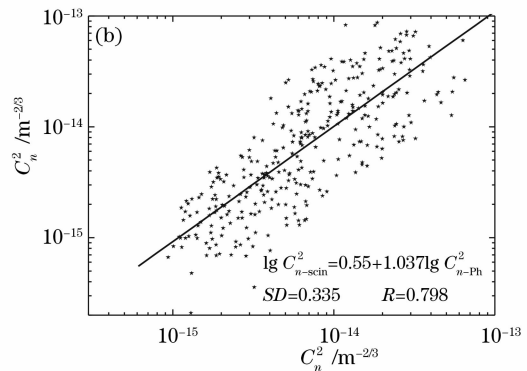


图 4 闪烁和相位起伏效应分别对应的 C_n^2 的日变化

Fig. 4 Daily change of C_n^2 retrieved from scintillation and phase fluctuation respectively

另外,从图 4(b)的拟合结果还可以看出两种效应对应的 C_n^2 满足指数为 1.037 的指数关系。由指数函数的性质可知,随湍流强度的增加,两效应对应的 C_n^2 偏离程度也越大。究其原因主要在于:根据湍流理论的知识,相位起伏主要对传输路径中的大尺度湍涡敏感,而闪烁则主要受小尺度湍涡的支配^[13],尽管在数据处理中我们采用了假定湍流内外尺度分别为零和无穷大的 Kolmogorov 湍流谱,实际湍流大气中的内外尺度是随时间时刻变化的^[14],只有在湍流惯性区内才满足理想的 Kolmogorov 湍流谱,这样就造成了两种方法推导的 C_n^2 不可能完全一致,而且无论是相位起伏求得的 C_n^2 大于光强闪烁求得的 C_n^2 ,还是光强闪烁求得的 C_n^2 大于相位起伏求得的 C_n^2 ,都是有可能出现的。但整体上来说,两者对应的 C_n^2 随时间的变化趋势基本是一致的。

4 结 论

基于面阵 CCD 在动态测量范围内的输出信号与入射光强成正比的特点,实现了 S-H 波前传感器用于闪烁效应的测量,与大口径闪烁仪的测量对比表明了该方法具有可靠性。虽然与具有高速 A/D 转换器装置的闪烁仪相比,以 CCD 为探测器的 S-H 波前传感器的采样频率通常较低,但由于后者可以将空间阵列和时间序列的数据进行合并,大大增加了统计样本点。例如假设要得到光强起伏方差的一个值需要的样本点即光强值为 M ,那么闪烁仪和 S-H 波前传感器需要的测量时间 Δt_{Scin} 、 $\Delta t_{\text{S-H}}$ 满足: $\Delta t_{\text{Scin}} = f_{\text{S-H}} \times N^2 / f_{\text{Scin}} \times \Delta t_{\text{S-H}}$,这里 f_{Scin} 、 $f_{\text{S-H}}$ 分别

为二者的采样频率。如果取 $f_{\text{S-H}} = 955$; $f_{\text{Scin}} = 2000$; $N = 18$,可得 $\Delta t_{\text{Scin}} = 154.71 \Delta t_{\text{S-H}}$,从这个意义上来说 S-H 波前传感器比闪烁仪的时间分辨率要大得多。

利用 S-H 波前传感器实现了闪烁和相位起伏效应的同时测量,对两效应对应的 C_n^2 进行了对比分析,结果表明二者的日变化趋势基本一致,实验所得结果基本符合近地面弱湍流起伏的统计特征,充分说明可以利用 S-H 波前传感器进行闪烁和相位起伏效应的同时测量。后续的实验研究尝试探讨在湍流起伏较强时,即当闪烁达到饱和后相位起伏是否也达到饱和的问题。

综上分析,该方法不仅拓展了传感器的使用功能,而且避免了不同仪器同时测量大气湍流参数带来的系统偏差,具有重要的工程意义。

参 考 文 献

- 1 Tatarskii. *Wave Propagation in a Turbulent Media* [M]. Wen Jingsong, Song Zhengfang, Zeng Zongyong et al. transl., Beijing: Science Press, 1978
塔塔尔斯基. 湍流大气中波的传播理论[M]. 温景嵩,宋正方,曾宗泳等译,北京:科学出版社,1978
- 2 Rao Ruizhong. *Light Propagation in the Atmospheric Turbulence* [M]. Hefei: Anhui Science & Technology Press, 2005
饶瑞中. 光在湍流大气中的传播[M]. 合肥:安徽科学技术出版社,2005
- 3 Song Zhengfang. *Foundation of Applied Atmospheric Optics* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1978
宋正方. 应用大气光学基础[M]. 北京:气象出版社,1978
- 4 Rao Ruizhong, Gong Zhiben, Wang Shipeng et al.. Aperture averaging of saturated scintillation of laser propagation in the atmosphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1): 36~40
饶瑞中,龚知本,王世鹏等. 激光大气闪烁饱和的孔径平均效应

- [J]. 光学学报, 2002, **22**(1): 36~40
- 5 Robert K. Tyson. *Principles of Adaptive Optics* [M]. New York: Academic Press, 1997
- 6 Jiang Wenhan, Li Huagui. Hartmann-Shack wavefront sensing and wavefront control algorithm[C]. *Proc. SPIE*, 1990, **1271**: 82~93
- 7 Li Xinyang, Jiang Wenhan, Wang Chunhong *et al.*. Modal reconstruction error of the Hartmann sensor on measuring the atmosphere disturbed wavefront [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(2): 145~148
李新阳, 姜文汉, 王春鸿等. 湍流大气中哈特曼传感器的模式波前复原误差[J]. *强激光与粒子束*, 2000, **12**(2): 145~148
- 8 Rao Ruizhong, Wang Shipeng, Liu Xiaochun *et al.*. Experimental study of spot dancing of laser beam in a turbulent atmosphere[J]. *Chin. J. Lasers*, 2000, **27**(11): 1011~1015
饶瑞中, 王世鹏, 刘晓春等. 湍流大气中激光束漂移的实验研究[J]. *中国激光*, 2000, **27**(11): 1011~1015
- 9 Charles A. Primmerman, Thomas R. Price, Ronald A. Humphreys *et al.*. Atmospheric compensation experiments in strong-scintillation conditions[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(12): 2081~2088
- 10 Yuan Kee, Zhu Wenyue, Rao Ruizhong *et al.*. Measurement of scintillation effect of light propagating through atmospheric turbulence by Shack-Hartmann sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(suppl.): 436~439
苑克娥, 朱文越, 饶瑞中等. 基于 SHWS 的湍流大气光闪烁测量[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(增刊): 436~439
- 11 James H. Churnside. Aperture averaging of optical scintillations in the turbulent atmosphere[J]. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(15): 1982~1994
- 12 Ma Xiaoshan, Zhu Wenyue, Rao Ruizhong. Annular-aperture averaging factor of optical scintillations in turbulent atmosphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1543~1547
马晓珊, 朱文越, 饶瑞中. 湍流大气中光波闪烁的圆环孔径平滑因子[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1543~1547
- 13 Ma Xiaoshan, Zhu Wenyue, Rao Ruizhong. Comparison of refractive index structure constants of atmospheric turbulence deduced from scintillation and beam wander effects[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(4): 538~542
马晓珊, 朱文越, 饶瑞中. 利用闪烁和漂移效应测量大气折射率结构常数的对比分析[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(4): 538~542
- 14 Mei Haiping, Rao Ruizhong, Zhu Wenyue. Evaluating refractive index structure constant and characterizing spectrum of atmospheric turbulence [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(12): 1155~1158