

基于 Shack-Hartmann 波前传感器的湍流大气光闪烁测量

苑克娥, 朱文越, 饶瑞中, 黄印博, 马晓珊, 钱仙妹

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

摘要: 根据 CCD 探测器的输出信号在动态测量范围内与入射光通量成线性的特点, 提出了将 Shack-Hartmann 波前传感器用于湍流大气光闪烁效应测量的方法, 并在 1 km 的水平湍流大气传输路径上开展了光强闪烁的初步测量。结果表明, 测量的光强起伏方差随时间的变化基本符合近地面湍流起伏特征, 在统计光强起伏过程中采用了将时间和空间序列的数据相融合的方法, 大大增加了统计样本数; 将传感器与大口径闪烁仪测量的折射率结构常数进行了对比, 发现两者在变化趋势上具有较好的一致性, 相关系数达到 0.84; 最后, 通过不同子孔径内光强起伏的功率谱分析, 进一步证明了 Shack-Hartmann 传感器用于光闪烁效应测量的可靠性。

关键词: 大气湍流; Shack-Hartmann 波前传感器; 光强闪烁; 功率谱

中图分类号: TN241 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2007)增(探测与制导)-0436-04

Measurement of scintillation effect of light propagating through atmospheric turbulence by Shank-Hartmann sensor

YUAN Ke-e, ZHU Wen-yue, RAO Rui-zhong, HUANG Yin-bo, MA Xiao-shan, QIAN Xian-mei

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

Abstract: Shack-Hartmann sensor is traditionally used for wave-front detection. The method that it is used to measure scintillation effect of light propagating through atmospheric turbulence is proposed based on the linearity characteristic of its charge-coupled device between output signal and light exposure in the dynamic range. Intensity scintillation experiments were preliminarily carried out in atmospheric boundary layer over 1000 meter horizontal path. Some measurement results were observed. Firstly, intensity fluctuation variance measured from experiments agrees with subaerial turbulence fluctuation attribute. Secondly, the comparison between Shack-Hartmann sensor and large aperture scintillometer shows the correlation coefficient of refractive index structure parameter reaches 0.838. Finally is the analysis of power spectrum of intensity fluctuation in different sub-apertures. So the reliability of Shack-Hartmann wave-front sensor used to measure scintillation effect of light in the atmospheric turbulence is firmly approved.

Key words: Atmospheric turbulence; Shack-Hartmann wave-front sensor; Intensity scintillation; Power spectrum

收稿日期: 2007-08-23

基金项目: 中国科学院方向性创新项目(KGCX2-SW-413); 中国科学院合肥物质科学研究院院长基金

作者简介: 苑克娥 (1979-), 女, 山东日照人, 博士, 主要从事激光大气传输的研究。E-mail: yuanke0301@163.com

导师简介: 饶瑞中 (1963-), 男, 安徽阜阳人, 研究员, 博士生导师, 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其光学湍流测量方法研究等。E-mail: rao@aiofm.ac.cn

0 引言

光在湍流大气中传输时,受大气折射率起伏变化的影响,光波的相位和振幅同时发生随机起伏,从而产生波前畸变,引起光强闪烁、质心漂移以及光斑破碎等一系列的湍流效应^[1-3],严重限制了不同激光工程系统的使用性能。因此,湍流大气中光波的传播规律是光传播理论及工程应用中需要长期研究的一个十分重要的课题。

近年来逐渐发展成熟的自适应光学技术^[4-5]可以实时测量传输通道上湍流扰动引起的动态波前像差,并在一定程度上较好的实现了畸变相位的校正补偿。Shack-Hartmann 波前传感器(以下简称 S-H 传感器)因其高光能利用率、高采样频率、高量子效率以及低噪声等优点成为自适应光学系统的首选传感器^[6-8]。其波前探测的原理为:入射到入射瞳内的波面被传感器的微透镜阵列分割为若干子波,会聚后分别成像到传感器的电荷耦合器(面阵 CCD 探测器)上,根据像素灰度值的大小和位置计算每个子波的质心坐标,与标准定标光束相比可求得入射的波前斜率,然后根据一定的波前复原算法来重构畸变波前相位^[9]。

文中在上述波前测量原理的基础上,结合其电荷耦合器件在动态测量范围内输出信号和曝光量成线性的特点,提出了将 S-H 传感器用于湍流大气中光闪烁效应测量的方法,该方法充分利用 CCD 探测器输出的灰度值信息,无需使用标准平行光束对传感器进行定标,拓展了 S-H 波前传感器的使用功能。

1 S-H 传感器用于光闪烁测量的原理

S-H 传感器用于光闪烁测量的原理如图 1 所示,将 CCD 面阵探测器对应微透镜阵列划分为若干区域,入射畸变波前的起伏使得每个子孔径内接收的光强发生随机变化,根据在动态测量范围内 CCD 的输出信号与曝光量成线性的特点,各个区域内像素的灰度值之和就正比于入射到该子孔径内的子波的光强值。这样每个入射子波、微透镜子孔径以及相应的 CCD 的子区域就构成了一个有限接收孔径的强度探测系统。统计每个子孔径内对应的像素的灰度值之和的起伏,并进行长时间的实验测量便可得到经湍流大气扰动的光束的时间、空间光强起伏,进行归一化

方差统计便得到光束在湍流大气中传输的光强起伏信息。实际测量中可以根据不同的天气状况在不同的时间段内设置面阵 CCD 的阈值,这一方面可以在一定程度上有效去除背景噪声对信号的干扰;另一方面可以检验入射光强是否超出了 CCD 的动态测量范围,假设 CCD 的分辨率为 $M \times N$,设置的阈值的大小为 a ,实测像素灰度值的大小为 b_{ij} ,只有满足:

$$a + b_{ij} < 255, i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

才能保证 CCD 工作在线性响应区间。

在此基础上,统计若干个子孔径内的灰度值之和便可得到任意形状和尺寸口径内的光强起伏方差,据此也可以研究孔径平滑效应的问题。

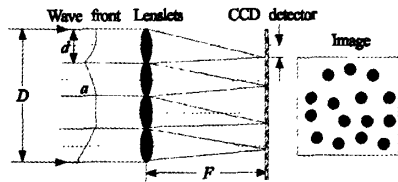


图 1 Shack-Hartmann 波前传感器的原理

Fig.1 Principle of Shack-Hartmann wave-front sensor

2 光闪烁测量的时、空间相关性分析

实际实验装置如图 2 所示,半导体激光器发出的中心波长为 $0.660 \mu\text{m}$ 、发散角约 2 mrad 、功率为 50 mW 的基模激光束,经过 1 km 的水平路径传输到接收端。接收装置为入射瞳直径为 120 mm 的 S-H 波前传感器,其每个子孔径的等效直径为 6.667 mm 。最后经图像采集卡将得到的时、空间序列的信号数据存储于计算机的硬盘中。传感器的面阵 CCD 采用加拿大 DALSA 公司生产的 CA-D6 型^[10],其基本性能指标为:分辨率 256×256 像素,每个像素的感光面积为 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$,最大拍摄速度为 955 帧/秒 。

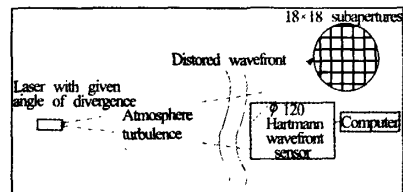


图 2 实验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of experimental setup

对于湍流效应的分析,通常需要大量的统计样

本,即需要进行大量的长时间的实验,致使以二进制形式存储的实验结果占用大量的计算机硬盘空间,并且影响后续数据处理的速度。假如可以将时间和空间采集的数据进行合并,便能大大增加统计样本数,既可以提高数据处理速度,又使得实验结果更加精确可靠。对光强起伏方差可以按以下两种方法进行统计:

方法一:首先计算每一帧图像得到的 18×18 有效网格数 N_{eff} 的归一化起伏方差 σ_{ij}^2 :

$$\sigma_{ij}^2 = \frac{1}{N_{\text{eff}} \langle I_j \rangle^2} \sum_{i=1}^{N_{\text{eff}}} (I_{ij} - \langle I_j \rangle)^2, \quad (2)$$

其中 I_{ij} 为第 j 帧图像的第 i 个子孔径内的光强灰度值, $\langle I_j \rangle$ 为第 j 帧图像的有效网格内的平均光强值。然后对连续采集的 N_{frame} 幅图像求平均值,得到光强归一化起伏方差 σ_i^2 。

方法二:首先分别对每一个子孔径内的数据进行 N_{frame} 帧图像的归一化起伏方差统计,得到 18×18 个有效网格的归一化光强起伏方差 σ_{ii}^2 :

$$\sigma_{ii}^2 = \frac{1}{N_{\text{frame}} \langle I_i \rangle^2} \sum_{j=1}^{N_{\text{frame}}} (I_{ij} - \langle I_i \rangle)^2, \quad (3)$$

然后对 18×18 有效网格 N_{eff} 数据进行平均,也得到光强归一化起伏方差 σ_i^2 。

图 3 为利用上述分析的两种方法对实验数据处理得到的光强闪烁方差的相关性分析(图中 R 表示两者的相关系数, SD 表示线性拟合的标准偏差),从图中可以看出,拟合的相关系数为 $0.995\ 01$,斜率为 $1.084\ 45$,皆接近于数值 1 ,这说明这两种方差统计方法具有很好的自治性,由此可以将S-H传感器得到的时空间序列的数据进行合并,以大大增加统计样本数。

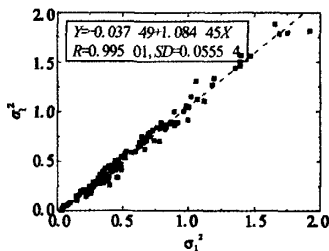


图 3 两种方法求得的起伏方差的相关性

Fig.3 Correlation of σ_i^2 derived from the two methods

3 光强闪烁方差的实测结果与分析

结合上面的分析,对激光的 1 km 水平大气传输

进行了初步的实验测量,选取每 $3\ 000$ 帧即 3.1 s 采集的数据作为一个统计样本,这样每个统计样本包含的样本点接近 $18 \times 18 \times 3000$,两次数据采集的时间间隔设为 5 min 。

3.1 与大口径闪烁仪测量结果的对比

实验过程中,利用大口径闪烁仪进行了同时测量,将两者得到的大气折射率结构常数进行了对比(如图4(a)所示),这里在求得 C_n^2 值时用到了有限接收孔径面积上光强起伏方差的公式^[11]。从图4(a)比较的结果来看,S-H波前传感器测量得到的 C_n^2 与大口径闪烁仪测量的 C_n^2 在变化趋势上具有较好的一致性,还可以看出传感器测量的 C_n^2 略小于闪烁仪测量的结果,这主要由于两仪器的系统偏差造成的。对传感器和闪烁仪测量的 C_n^2 进行了相关性分析,如图4(b)所示,结果表明两者的相关系数高达 0.838 。

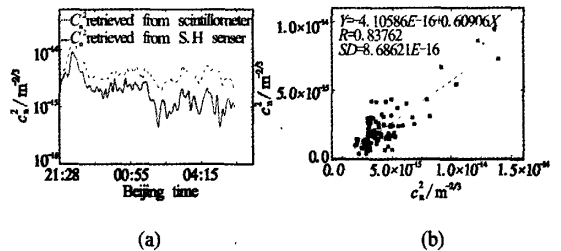


图 4 S-H 传感器与大口径闪烁仪测量的 C_n^2 的对比

Fig.4 Comparison of C_n^2 derived from H-S wave-front sensor and large aperture scintillometer

3.2 光强闪烁方差随时间的变化

实际得到的光强闪烁方差随时间的起伏变化如图5所示。本次实验选择在2007年4月12日,天气状况晴朗,对应的时间段分别为:8:40~10:20; 12:20~14:15; 16:15~17:45; 19:30~20:50。

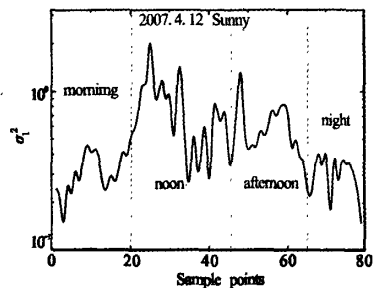


图 5 光强起伏方差的日变化

Fig.5 Daily change of intensity fluctuation variance

从图中可以看出,全天的闪烁方差跨越了近两个量级,起伏强度从早上起逐渐变大,至中午前后达到最大,傍晚和晚上逐渐减小,并且在实验时间范围内除中午起伏方差较大以外,全天基本处于弱起伏状态($\sigma_t^2 < 1$),这基本符合近地面湍流起伏的统计特征^[3]。

3.3 闪烁起伏的频谱分析

借助于确定湍流大气中光闪烁起伏频谱无标度区间的五段线性拟合方法^[12],对不同子孔径内光强起伏的频谱进行了分析。图6为功率谱分析的结果,其中图6(a)为07年3月29日20:30实验的两个不同的子孔径信号的谱,图6(b)为6月12日14:10中心子孔径信号的谱。前者可以看出同一次实验不同子孔径的谱具有较好的一致性,输出信号的频谱低频段对数频谱基本为常数,频率大于150 Hz的高频段为噪声频谱,中间高频段对应湍流无标度区间。对比图6(a)、(b)看出湍流较强的中午频谱的无标度区间向高频段移动,甚至没有出现高频的噪声区,这与系统采样频率低有关。另外大量的统计结果表明,传感器求得的无标度区间的斜率的绝对值要比Kolmogorov理论的-8/3幂率的绝对值要大一些,差别的原因除了与湍流状况密切相关之外,还与探测器的尺寸以及光源特性有关^[13],有关这方面的研究有待于进一步长时间大量的实验统计。

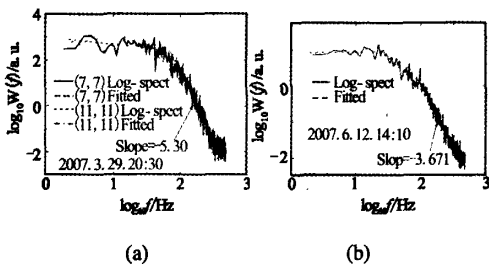


图6 不同子孔径不同时间实验数据的五段谱拟合
Fig.6 Five piece power law fitting of experiment data at different time and different sub-apertures

4 总结

提出了利用S-H波前传感器测量湍流大气中光闪烁效应的方法。利用S-H波前传感器进行了水平大气1 km光传输实验,结果表明:

(1) 可以将S-H波前传感器时间和空间的输出数据合并处理,增大了统计样本数;

(2) 与大口径闪烁仪测量的折射率结构常数在变化趋势上具有较好的一致性;

(3) 根据传感器子孔径对应灰度值的变化得到了光强闪烁方差随时间的变化,基本满足近地面弱湍流起伏的统计特性。

(4) 对实验结果进行了五段谱拟合,结果与湍流大气中光闪烁频谱具有一致的变化趋势。

以上理论与初步的实验结果表明将S-H传感器用于光闪烁效应的测量具有可靠性,可以将其用于湍流大气中光闪烁效应的测量。

致谢:在工作中得到了中科院成都光电所的饶学军研究员和缪洪波助理研究员,以及中科院安徽光机所的姚永帮研究员和詹杰副研究员的大力支持和帮助,在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] TATARSKII. Wave propagation in a turbulent media [M]. Beijing: Science Press, 1978.
- [2] 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] 宋正方. 应用大气光学基础[M]. 北京: 气象出版社, 1978.
- [4] TYSON R K. Principles of Adaptive Optics [M]. New York: Academic press, 1997.
- [5] 王英俭, 吴毅, 龚知本. 自适应光学系统的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 1994, 6(1): 59-64.
- [6] PRIMMERMAN C A, PRICE T R., HUMPHREYS R A., et al. Atmospheric-compensation experiments in strong-scintillation conditions[J]. Applied Optics, 1995, 34(12): 2081-2088.
- [7] 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] 姜文汉, 鲜浩, 杨泽平, 等. 哈特曼波前传感器的应用[J]. 量子电子报, 1998, 15(2): 228-235, 1998, 15(2): 228-235.
- [9] JIANG Wen-han, LI hua-gui. Hartmann-Shack wave-front sensing and wave-front control algorithm[C]//Proceedings of SPIE, 1271 Adaptive Optics and Optical Structures, 1990.
- [10] CA-D6-xxxxW Camera User's Manual[Z].
- [11] CHURNSIDE J H. Aperture averaging of optical scintillations in the turbulent atmosphere[J]. Appl Opt, 1991, 30(15): 1982-1994.
- [12] 饶瑞中, 王世鹏, 刘晓春, 等. 实际大气中激光闪烁的频谱特征[J]. 中国激光, 1999, 26(5): 411-414.
- [13] RAO Rui-zhong, WANG Shi-peng, LIU Xiao-chun. Turbulence spectrum effect on wave temporal-frequency spectra for light propagating through the atmosphere [J]. J Opt Soc Am A, 1999, 16(11): 2755-2762.

基于Shack-Hartmann波前传感器的湍流大气光闪烁测量

作者: 苑克娥, 朱文越, 饶瑞中, 黄印博, 马晓珊, 钱仙妹, YUAN Ke-e, ZHU Wen-yue,
RAO Rui-zhong, HUANG Yin-bo, MA Xiao-shan, QIAN Xian-mei
作者单位: 中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学研究室, 安徽, 合肥, 230031
刊名: 红外与激光工程 **ISTIC EI PKU**
英文刊名: INFRARED AND LASER ENGINEERING
年, 卷(期): 2007, 36(z2)
被引用次数: 1次

参考文献(13条)

1. TATARSKII Wave propagation in a turbulent media 1978
2. 饶瑞中 光在湍流大气中的传播 2005
3. 宋正方 应用大气光学基础 1978
4. TYSON R K Prindples of Adaptive Optics 1997
5. 王英俭, 吴毅, 龚知本 自适应光学系统的数值模拟[期刊论文]-强激光与粒子束 1994(01)
6. PRIMMERMAN C A, PRICE T R, HUMPHREYS R A Atmospheric-compensation experiments in strong-scintillation conditions[外文期刊] 1995(12)
7. 李新阳, 姜文汉, 王春鸿 湍流大气中哈特曼传感器的模式波前复原误差[期刊论文]-强激光与粒子束 2000(02)
8. 姜文汉, 鲜浩, 杨泽平 哈特曼波前传感器的应用[期刊论文]-量子电子学报 1998(02)
9. HANG Wen-ban, LI hua-gui Hartmann-Shack wave-front sensing and wave-front control algorithm 1990
10. CA-D6-xxxxW Camera User' S Manual
11. CHURNSIDE J H Aperture averaging of optical scintillations in the turbulent atmosphere 1991(15)
12. 饶瑞中, 王世鹏, 刘晓春 实际大气中激光闪烁的频谱特征[期刊论文]-中国激光 1999(05)
13. RAO Rui-zhong, WANG Shi-peng, LIU Xiao-chun Turbulonce spectrum effect on wave temporal-frequency spectra for light propagating through the atmosphere 1999(11)

引证文献(1条)

1. 苑克娥, 朱文越, 饶瑞中 Shack-Hartmann波前传感器用于闪烁和相位起伏效应的同时测量[期刊论文]-光学学报 2008(9)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_hwyjggc2007z2111.aspx