

文章编号 2095-1531(2015)01-0121-09

位相差值法测量大气湍流格林伍德频率

瞿青^{1,2}, 曹召良^{1*}, 胡立发¹, 张红胜³, 赵晶丽⁴, 宣丽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;

3. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 光栅技术实验室, 吉林 长春 130033;

4. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所

光学系统先进制造技术中国科学院重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要: 为了利用位相差值法实现大气湍流格林伍德频率的准确测量, 研究了位相差值法的有效性、哈特曼探测器采样点数和采样频率的选取方法。首先给出了位相差值法的基本原理和测量噪声去除方法, 然后分析了哈特曼探测器采样点数和格林伍德频率的统计平均次数对测量精度的影响, 结果显示, 当采样点数大于400、统计平均次数大于400时, 可以实现大气湍流格林伍德频率的准确测量。研究了测量噪声的影响, 结果表明: 去除噪声后, 测量值的偏离误差从30%降低到0.6%。研究了算法的重复性精度, 得到测量值偏离量的RMS值为1.9 Hz, 占理论值的3%, 说明测量方法非常稳定。依据上述结果, 对8~108 Hz的湍流进行测量和分析, 结果显示, 当不考虑空气扰动时, 测量值与理论值基本一致。最后, 研究了哈特曼探测器采样频率和格林伍德频率之间的关系: 哈特曼探测器的采样频率越高, 能够准确测量的格林伍德频率也越高, 并得到了定量的经验公式。上述结果表明, 在满足采样点数、采样频率以及统计平均次数等条件下, 位相差值法可以实现大气湍流格林伍德频率的准确测量。该研究工作为大气湍流的格林伍德频率测量提供了应用依据。

关键词: 格林伍德频率; 大气湍流; 位相差值法; 测量噪声; 采样时间

中图分类号: O357.5+4 文献标识码: A doi: 10.3788/CO.20150801.0121

Greenwood frequency measurement of atmospheric turbulence by phase difference method

QU Qing^{1,2}, CAO Zhao-liang^{1*}, HU Li-fa¹, ZHANG Hong-sheng³, ZHAO Jing-li⁴, XUAN Li¹

(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;

3. Grating Technology Laboratory, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

4. Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: To measure the Greenwood frequency of the atmospheric turbulence accurately, the validity of

收稿日期: 2014-10-21; 修订日期: 2014-12-24

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

phase difference method and the selection of the sampling points and the sampling frequency of the Shack-Hartmann wavefront sensor (S-H WFS) have been studied. Firstly, the principle of the phase difference method and the noise elimination algorithm are given. Secondly, the effects of the sampling points of S-H WFS and the statistical times of Greenwood frequency on the measurement accuracy are investigated. The experimental results show that, while both the sampling points and the statistical times are more than 400, the Greenwood frequency can be measured accurately. Thirdly, the influence of the measurement noise is considered and the result shows that the deviation error of the measured value is reduced from 30% to 0.6% with the noise removed. Fourthly, the repeatability of the phase difference method is measured. It is shown that the deviation RMS error is 1.9 Hz which is 3% of the ideal value. Therefore, the Greenwood frequency can be measured accurately with the phase difference method. Based on the above results, the Greenwood frequency of the atmospheric turbulence is measured and analyzed with the range of 8 - 108 Hz. It indicates that the measured value is almost the same as theoretical value without consideration of the disturbance of the air in the Lab. At last, the relation between the sampling frequency of S-H WFS and the Greenwood frequency is investigated. It can be seen that the sampling frequency of the S-H WFS should be increased if the measured Greenwood frequency is enlarged. Furthermore, an empirical formula is achieved to calculate the needed sampling frequency of the S-H WFS. In a word, all the results show that, when it meets the demand of sampling points, sampling frequency and statistical times, the phase difference method can be used to measure the Greenwood frequency of atmospheric turbulence accurately.

Key words: greenwood frequency; atmospheric turbulence; phase difference method; measurement noise; sampling time

1 引言

大气湍流的扰动使得大口径地基望远镜成像分辨率较差,采用自适应光学系统可对其进行校正^[1-3]。在自适应光学系统设计^[4-5]及大口径地基望远镜选址^[6-7]过程中,大气湍流^[8]时间域参数-格林伍德频率可以为其提供参考依据^[9],因此需要进行准确测量。目前国内外测量格林伍德频率的方法主要有功率谱法^[10-12]和位相差值法^[13-14]。功率谱法是利用波面某几个采样点的相位功率谱来求解格林伍德频率,其统计样本数较多,统计时间较长,易将湍流特性平均化,测量精度低^[15]。本课题组在2009年采用该方法直接对室外大气湍流的格林伍德频率进行了测量,统计时间达70 s得出一个格林伍德频率,统计时间过长,早已将湍流特性平均化。位相差值法则是利用相邻两幅波面之间的位相差来计算格林伍德频率,其充分利用单幅波面信息,统计时间较短,

测量精度较高。因此目前大多采用位相差值法来测量大气湍流的格林伍德频率。

1990年,David L. Fried在计算自适应光学校正系统中由于时间延迟而导致的校正误差时,得出了波面位相差结构函数与格林伍德频率的关系,给出了位相差值法基本原理^[16]。2010年,Terry J. Brennan等人在Kolmogorov湍流理论的基础上,根据位相差值法,计算格林伍德频率时,发现由于哈特曼探测噪声的存在,实际获得的位相与理论位相相差较大,无法获得准确的格林伍德频率值,需要对原位相差值法进行去噪处理^[17]。

为了消除哈特曼探测器中斜率测量噪声对格林伍德频率计算的影响,2013年,Terry J. Brennan提出了斜率差函数的概念,以获得原始波面相位结构函数,并采用高帧频的哈特曼探测器直接进行了户外大气湍流的测量^[18],而Kolmogorov湍流模型和实际湍流还是存在一定差别,因此该判断方法有一定局限性,不能说明该大气湍流测量方

法的准确性和有效性。此外,该法也没有研究哈特曼探测器的采样频率和采样点数对大气湍流的测量准确性的影响。为此,本文拟在实验室内,利用大气湍流模拟器来严格验证位相差值法的有效性,并研究哈特曼探测器的采样频率和采样点数对大气湍流的测量准确性的影响。由于大气湍流模拟器可以准确产生不同格林伍德频率的大气湍流,因此,可以利用位相差值法对产生的模拟大气湍流进行检测,并把检测值和大气湍流模拟器的产生值进行比较,从而定量研究位相差值法的有效性和使用条件。通过这些研究,可为大气湍流的格林伍德频率测量提供应用依据。

2 位相差值法

2.1 基本原理

间隔时间为 τ 的两幅波面之间的位相差均方值与格林伍德频率 f_G 存在如下关系^[16]:

$$E_{\phi}^2 = (7.45f_G\tau)^{5/3}, \quad (1)$$

式中 E_{ϕ}^2 为相位结构函数,表示两波面相位的均方差值,是一个时间平均函数,其满足^[18]:

$$E_{\phi}^2 = \langle |\Phi(t+\tau) - \Phi(t)|^2 \rangle, \quad (2)$$

式中 $\Phi(t)$ 和 $\Phi(t+\tau)$ 分别为 t 及 $t+\tau$ 时刻的波面位相值,其可由区域法重构波前获得^[19]:

$$\Phi = A^+ G, \quad (3)$$

式中 G 是斜率矩阵,其可由哈特曼探测器测量获得, A 是几何矩阵。

将式(3)代入式(1)和(2)中,即可求出大气湍流的格林伍德频率。

2.2 噪声去除过程

实际测量中,由于哈特曼探测器存在探测噪声,因此需要分析噪声的影响并进行消除。假设测量过程中存在斜率误差 μ ,则测量得到的斜率可以表示为^[20]:

$$G = A\Phi + \mu. \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)中,可获得波前探测相位。

$$\hat{\Phi} = A^+(A\Phi + \mu) = A^+A\Phi + A^+\mu. \quad (5)$$

根据式(5)可知,探测波前位相包括实际波前位相和噪声项。对式(5)进行变换,可得实际

波前位相:

$$\Phi = (\hat{\Phi} - A^+\mu) / (A^+A). \quad (6)$$

由式(6)可以看出,要得到实际位相分布,需要知道探测斜率噪声。对于大气湍流, μ 可以近似看成均值为 0 的白噪声,则实际位相结构函数可以表示为^[21]:

$$E_{\phi}^2(\tau) = [E_{\phi}^2(\tau) - \beta_H\beta_D E_{\delta}^2(\tau)] / \beta_{\phi}, \quad (7)$$

$$\beta_D = \frac{n_G}{n_G - n_{\phi} + 2}, \quad (8)$$

$$\beta_H = \frac{1}{n_{\phi}} \text{Trace}[A^+(A^+)^T], \quad (9)$$

$$\beta_{\phi} = \frac{1}{n_{\phi}} \text{Trace}[A^+AA^T(A^+)^T], \quad (10)$$

式中 n_G 为测量的斜率数, n_{ϕ} 为重构波面的相位点数, Trace 表示矩阵的迹。

将式(7)带入式(1),即可得到大气湍流的格林伍德频率。

3 实验验证

3.1 实验光路

为了验证格林伍德频率测量方法的有效性,利用湍流模拟器产生不同频率的模拟湍流,利用哈特曼探测器测量斜率并重构出位相,最后利用位相差值法计算大气湍流的格林伍德频率。

实验中采用大气相干长度为 1 mm 的湍流模拟器,口径为 100 mm,通过控制转速,其可模拟 0~150 Hz 的大气湍流。哈特曼探测器的微透镜阵列数为 20×20,帧频为 1 kHz,口径为 4.1 mm。实验中模拟口径 1 m 望远镜对应的大气湍流,且大气相干长度为 10 cm。由于湍流屏的实际大气相干长度为 1 mm,因此湍流屏上的光斑直径应为 10 mm,具体实验光路如图 1 所示。从点光源发出的光经准直透镜 L_1 准直后,经过口径为 10 mm 的孔径光阑,入射到湍流模拟器上;然后再经过 L_2 和 L_3 的缩束,最终进入哈特曼探测器,以探测大气湍流。

3.2 波面空间采样点数对测量准确性的影响

式(2)中,波面相位结构是一个时间平均函数,需要对其空间采样点数进行合理的选取。

为了验证波面空间采样点数对格林伍德频率

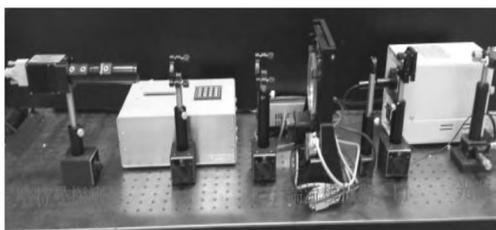


图 1 格林伍德频率测量的实验光路

Fig. 1 Optical setup for measuring Greenwood frequency

测量的影响,让湍流屏产生 108 Hz 的格林伍德频率,然后利用哈特曼探测器进行探测,最后选取不同的采样点数进行波前重构和格林伍德频率计算,结果如图 2 所示。可以看出,随着空间采样点的增加,测量的格林伍德频率值快速逼近理论值;当采样点数大于 300 时,逼近缓慢,曲线接近水平;当采样点数为 400 时,和理论值基本一致。因此,为了实现格林伍德频率的准确测量,须至少选取 400 个空间采样点对波面进行采样。

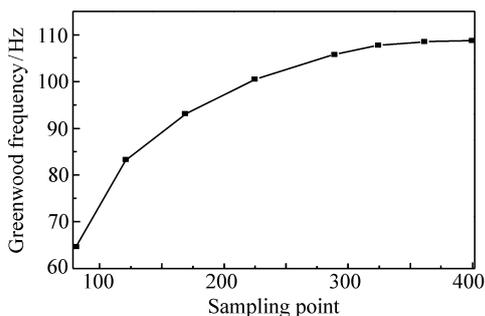


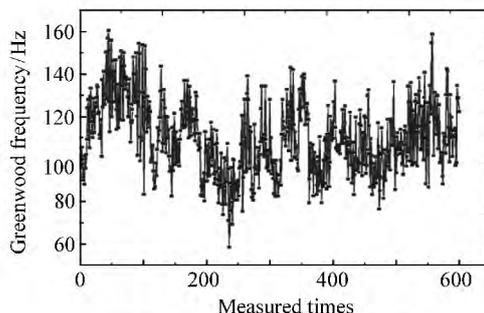
图 2 格林伍德频率随波面空间采样点数的变化

Fig. 2 Greenwood frequency as a function of sampling points

3.3 统计平均次数对测量准确性的影响

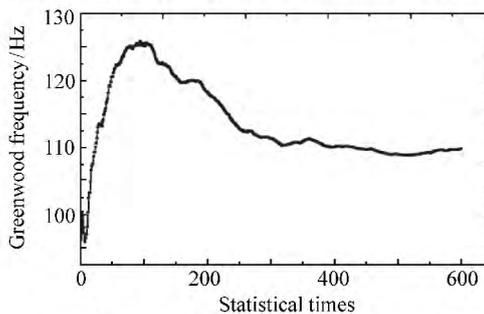
由于大气湍流是实时变化的,其仅满足统计规律,因而大气湍流的格林伍德频率是一个统计平均值。图 3 (a) 是对格林伍德频率 108Hz 的大气湍流的实时测量结果,可以看出,其随着时间的变化随机抖动。为了准确测量大气湍流的格林伍德频率,须进行统计平均,即截止到某次测量之前所有的测量值的平均值作为本次测量值。为了准确测量大气湍流的格林伍德频率,需要选取合理的统计次数进行统计平均。如图 3 (b) 所示,当统

计平均次数为 400 时,格林伍德频率趋于恒定。因此,测量大气湍流格林伍德频率时,须选取大于 400 次的统计平均次数进行计算。



(a) 格林伍德频率随测量次数的变化

(a) Greenwood frequency as a function of measured times



(b) 格林伍德频率随统计平均次数的变化

(b) Greenwood frequency as a function of statistical times

图 3 格林伍德频率和统计次数的关系

Fig. 3 Relation between the Greenwood frequency and statistical times

3.4 噪声对测量准确度的影响

设定湍流模拟器的转速为 40 r/min,此时格

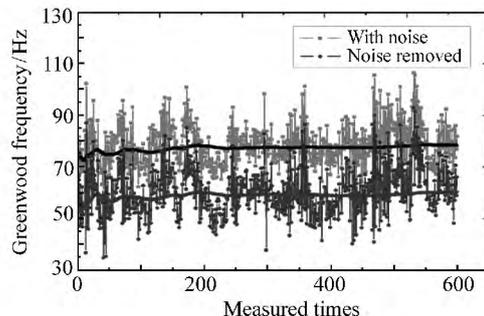


图 4 噪声对格林伍德频率的影响(实线是统计平均值)

Fig. 4 Effect of noise on the Greenwood frequency(the line represents the statistical value of Greenwood frequency)

林伍德频率为 62 Hz。利用哈特曼探测器进行测

量,然后分别利用去噪声和不去噪声的方法进行格林伍德频率的计算,结果如图 4 所示。可以看出,未去噪声时测得的格林伍德频率值约为 80 Hz,而去噪声后,其值为 61.5 Hz,与理论值基本一致。因此,在测量格林伍德频率时,需要进行去噪处理。

3.5 测量方法的重复性精度

为了验证重复性精度,利用大气湍流模拟器产生格林伍德频率 62 Hz 的湍流,然后测量 10 次,结果如图 5 所示。图中实线为理论产生的格林伍德频率值,点为测量值。可以看出,每次的测量值都和理论值非常接近。计算结果显示,测量值相对于理论值的波动量的 RMS 为 1.9 Hz,波动百分比为 3%。因此,可以认为,该测量方法具备良好的重复性。

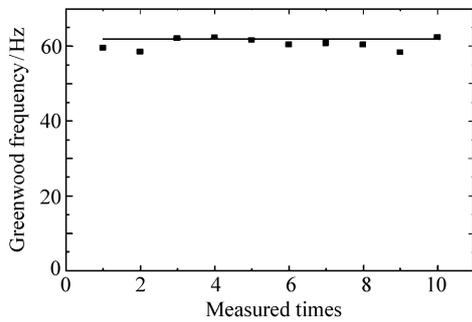


图 5 格林伍德频率和测量次数之间的关系(实线是理论值)

Fig. 5 Greenwood frequency as a function of measured times(the line represents the theoretical value)

3.6 实验结果

在上述工作的基础上,进行了格林伍德频率的测量实验。控制大气湍流模拟器的转速,使其产生格林伍德频率从 8 ~ 108 Hz 的大气湍流,频率间隔约为 7.7 Hz。然后,利用位相差值法进行测量,测量结果如图 6 所示。可以看出,存在噪声时,格林伍德频率测量值均与产生值相差较大。去除噪声后,当频率高于 60 Hz 时,测量值与理论值基本重合;当频率低于 60 Hz 时,与理论值存在一定的偏差,且频率越高,偏差越小。

3.7 测量结果误差分析

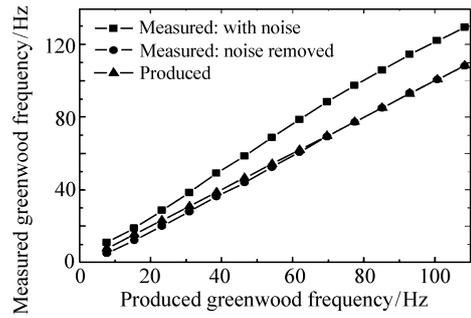
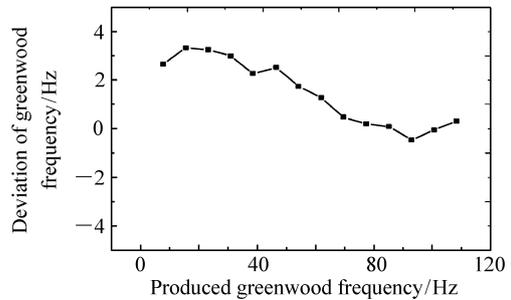


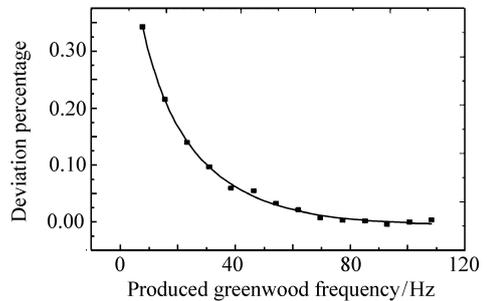
图 6 不同强度湍流的格林伍德频率测量值和理论值之间的关系

Fig. 6 Relation between the measured and theoretical Greenwood frequency for different strength of atmospheric turbulence

利用去噪的相位差值法测量得到的格林伍德频率与理论值频率值之间的误差如图 7 (a) 所示,在弱湍流情况下存在 2 ~ 3 Hz 的差异,随着湍流强度的增大,其格林伍德频率值越来越大,测量误



(a) 格林伍德频率测量误差值
(a) Deviation of greenwood frequency



(b) 误差占理论值的百分比
(b) Deviation percentage

图 7 大气湍流格林伍德频率的测量误差

Fig. 7 Measuring error of Greenwood frequency of atmospheric turbulence

差减小,当频率值增大到 60 Hz 以上时,测量误差

基本可以忽略不计,由图 7(b) 可以看出,随着湍流格林伍德频率的增大,误差所占的百分比越来越小,在中高频时误差百分比趋于 0,测量值与理论值一致。

分析认为可能是由于室内空气扰动所致。于是在湍流模拟器静止时,利用哈特曼探测器进行测量并利用位相差值法计算格林伍德频率,结果如图 8 所示。可以看出,室内空气的扰动能够产生格林伍德频率约 2 Hz 的大气湍流。由于在低频区域,室内空气产生的扰动和测量的目标值非常接近,因此影响较大;当被测的格林伍德频率较大时,室内扰动占有比重较小,基本可以忽略。因此才会出现如图 6 所示的测量结果,但是最终在望远镜上进行大气湍流的格林伍德频率测量时,整个通道都是大气湍流,不存在室内空气影响的问题。因而可以认为,去噪声的位相差值法可以有效地实现大气湍流格林伍德频率的准确测量。

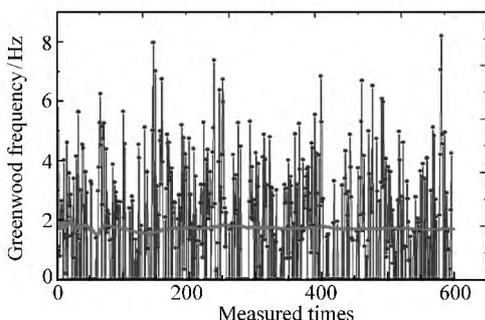


图 8 室内空气的格林伍德频率

Fig. 8 Greenwood frequency of the air indoor

4 哈特曼探测器的有效采样频率分析

式(1)在对数坐标下可以表示为如下形式:

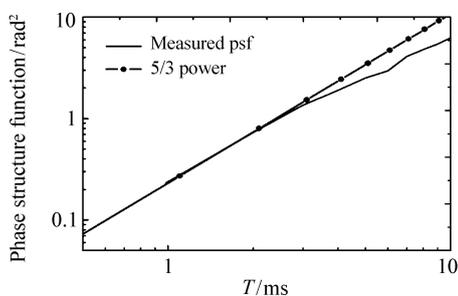
$$\lg E_{\phi}^2 = \frac{5}{3} \lg(7.45 f_G) + \lg \tau^{5/3}. \quad (11)$$

由上式可知,当格林伍德频率 f_G 一定时,公式右边的第一项是一个常数项,因此,波面位相均方差应该与哈特曼探测器采样时间的 $5/3$ 次方成正比。而采样频率为采样时间的倒数,求出采样时

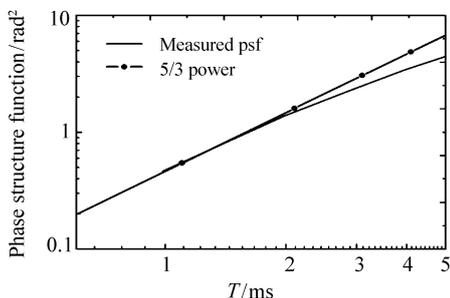
间即可得到采样频率。为了研究有效采样时间,

可以在一个固定的格林伍德频率下,逐渐增大哈特曼探测器的采样时间,并相应计算位相的均方差,这样便可以得到波面位相均方差与哈特曼探测器采样时间的关系。利用测量曲线和理论的 $5/3$ 次方曲线进行对比,重合的区域即为有效区域,该区域对应的最大采样时间即为哈特曼探测器的有效采样时间。

依据上述方法,分别选取理论值为 62 Hz, 108 Hz 的湍流进行测量分析,获得两种强度湍流的位相结构函数与采样时间的关系如图 9 所示。可以看出,对于图 9(a) 和 (b),其都和 $5/3$ 次方曲线有重合,即测量的位相结构函数在一定采样时间内,满足 $5/3$ 次方定律。对于 62 和 108 Hz 的湍流,其在重合区域内对应的最大采样时间约分别为 2.4 和 1.7 ms,即:如果能够准确测量 62 和 108 Hz 的湍流,其要求哈特曼探测器的最小采样频率分别为 417 和 588 Hz。当哈特曼探测器的采



(a) 湍流频率为 62 Hz
(a) $f_G = 62$ Hz



(b) 湍流频率为 108 Hz
(b) $f_G = 108$ Hz

图 9 相位结构函数与采样间隔时间的关系

Fig. 9 Relation between the phase structure function and the sampling time

样频率小于这些值时,便不能准确测量对应的格

林伍德频率。

为了定量研究格林伍德频率和采样时间之间的关系,对其它不同格林伍德频率下的最大容许采样时间也进行测量和计算,结果如图10所示。可以看出,采样时间决定了其能够测量的最大格林伍德频率值,采样时间越长,能够测量的格林伍德频率越低。同时,采样时间和格林伍德频率之间是非线性关系,为此采用下式进行拟合:

$$\tau = \frac{f_G}{af_G - b} \quad (12)$$

图10中的实线是拟合曲线,拟合结果为 $a = 0.82$ $b = 25$ 。可以看出,采样时间(和格林伍德频率 f_G 之间是一个近似的双曲线关系。而利用式(1)可以推导出采样时间 τ 和格林伍德频率 f_G 之间是一个双曲线关系。因此,说明实验结果和理论近似一致,从而为证明式(12)有效。利用式(12)便可以计算出任一格林伍德频率对应的哈特曼探测器的最大采样时间,从而为哈特曼探测器的采样频率选取提供依据。例如,如果需要测量的最大格林伍德频率为100 Hz,则要求哈特曼探测器的最大采样时间为1.76 ms,即采样频率至少为570 Hz。

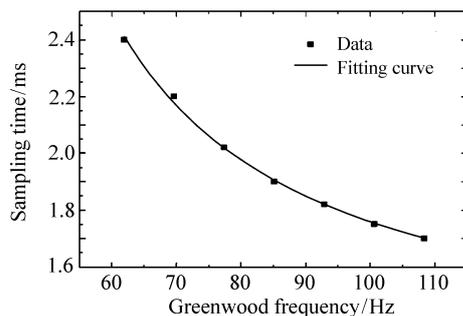


图10 格林伍德频率与采样时间的关系

Fig. 10 Relation between the Greenwood frequency and the sampling time

5 结 论

利用大气湍流模拟器,在实验室对位相差值法测量大气湍流格林伍德频率的有效性和使用条件进行研究。首先研究了哈特曼探测器采样点数对格林伍德频率测量准确性的影响。结果显示,当波面采样点数大于400时,可以实现格林伍德频率的准确测量。然后研究了统计平均次数对测量准确性的影响,结果表明,当统计平均次数大于400时,可以对格林伍德频率实现稳定测量。接着分析了测量噪声对测量精度的影响,当存在测量噪声时,测量值偏离理论值约30%;去除测量噪声后,测量值和理论值几乎一致,偏离约0.6%,可以实现格林伍德频率的准确测量。对测量方法的重复性精度进行了研究,结果显示,测量值相对于理论值的波动量的RMS为1.9 Hz,波动百分比为3%,说明测量方法非常稳定。在上述研究的基础上,对不同强度的模拟湍流进行测量,结果显示,实测格林伍德频率值与理论值基本一致,仅在弱湍流区域存在1~2 Hz的偏差。通过误差分析和实验证实了该偏差由室内空气的低频扰动所致。因此,位相差值法可以对大气湍流的格林伍德频率实现准确测量。

最后,通过波面位相结构函数与哈特曼探测器采样时间的关系,研究了不同湍流格林伍德频率准确测量所需的采样时间,获得了格林伍德频率和哈特曼探测器采样时间之间的经验关系公式,为大气湍流格林伍德频率测量时,哈特曼探测器采样频率的选取提供依据。

本文在实验室严格验证了位相差值法测量大气湍流格林伍德频率的有效性,同时给出了测量大气湍流时,哈特曼探测器的采样点数和采样频率的选取依据,以及为了实现准确测量所需的统计平均次数。通过本文的研究,为位相差值法测量大气湍流格林伍德频率提供了应用依据,从而可以服务于望远镜站址的选取和自适应光学系统的设计。

参考文献:

- [1] 卫沛锋,刘欣悦,林旭东,等.自适应光学系统校正后实际分辨率评价指标[J].中国光学,2014,7(4):672-678.

- WEI P F ,LIU X Y ,LIN X D *et al.*. Temporal simulation of atmospheric turbulence during adaptive optics system testing [J]. *Chinese Optics* 2013 6(3):371-377. (in Chinese)
- [2] 林旭东,薛陈,刘欣悦,等.自适应光学波前校正器技术发展现状[J].中国光学 2012 5(4):337-351.
LIN X D ,XUE C ,LIU X Y *et al.*. Current status and research development of wavefront correctors for adaptive optics [J]. *Chinese Optics* 2012 5(4):337-351. (in Chinese)
- [3] 张逸新,朱拓,陶纯堪.湍流大气成像系统分辨率的研究[J].光学与光电技术 2004 4(2):1-4.
ZHANG Y X ,ZHU T ,TAO CH R. Study of the optical resolution of imaging system in turbulence [J]. *Optics & Optoelectronic Technology* 2004 2(4):1-4. (in Chinese)
- [4] GREENWOOD D P. Bandwidth specification for adaptive optics systems [J]. *J. Opt. Soc. Am.* ,1977 67(3):390-393.
- [5] TYLER G A. Bandwidth considerations for tracking through turbulence [J]. *J. Opt. Soc. Am. A* ,1994 ,11(01):358-367.
- [6] 侯金良.天文选址的主要参数及测量方法[J].天文学进展 ,1994 ,12(2):126-132.
HOU J L. Site testing parameters and their measurements [J]. *Process in Astronomy* ,1994 ,12(2):126-132. (in Chinese)
- [7] 吴晓庆.地基天文光学望远镜选址[J].安徽师范大学学报(自然科学版) 2013 36(5):414-418.
WU X Q. Site testing for ground-based optical telescope [J]. *J. Anhui Normal University(Natural Science)* ,2013 ,36(5):414-418. (in Chinese) .
- [8] 陈冬,王江安,王乐东.激光雷达湍流大气探测[J].光学与光电技术 2012 10(1):63-66.
CHEN D ,WANG J A ,WANG L D. A new method for atmosphere turbulence detection by lidar [J]. *Optics & Optoelectronic Technology* 2012 ,10(01):63-66.
- [9] 刘超,胡立发,穆全全,等.校正水平湍流波面的自适应光学系统的带宽需求[J].光学精密工程 2010 ,18(10):2137-2142.
LIU CH ,HU L F ,MU Q Q *et al.*. Bandwidth requirements of adaptive optical system for horizontal turbulence correction [J]. *Opt. Precision Eng.* 2010 ,18(10):2137-2142. (in Chinese) .
- [10] 李新阳,姜文汉,王春红,等.激光实际大气水平传输湍流畸变波前的功率谱分析 II:波前相位与格林伍德频率[J].光学学报 2000 20(8):1035-1042.
LI X Y ,JIANG W H ,WANG CH H *et al.*. Power spectra analysis of the disturbed wavefront in laser beam horizontal atmospheric propagation II: wavefront phase and greenwood frequency [J]. *Acta Optica Sinica* ,2000 ,20(8):1035-1042. (in Chinese)
- [11] 穆全全.液晶自适应光学技术的工程化研究[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 2010.
MU Q Q. Engineering research of the liquid crystal adaptive optics technology [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics ,Fine Mechanics and Physics ,Chinese Academy of Sciences 2010. (in Chinese) .
- [12] 刘超.提高液晶自适应光学系统校正速度的研究[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 2012.
LIU C. Study on increasing the correction bandwidth of liquid crystal adaptive optics systems [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics ,Fine Mechanics and Physics ,Chinese Academy of Sciences 2012. (in Chinese)
- [13] BRENNAN T J. Turbulence characterization with a Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. *SPIE* 2010 ,1117(2):01-03
- [14] BRENNAN T J ,DAYTON D C. Estimation of optical turbulence characteristics from Shack Hartmann wavefront sensor measurements [J]. *SPIE* 2010 ,7816:781602
- [15] 陈浩.大气湍流中光波前的时空特性探测研究[D].长春:长春光学精密机械与物理研究所 2012.
CHEN H. Investigation on measurement technique of wavefront temporal and spatial characteristics distorted by atmospheric turbulence [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics ,Fine Mechanics and Physics ,Chinese Academy of Sciences 2012. (in Chinese)
- [16] FRIED D L. Time-Delay-Induced mean-square error in adaptive optics [J]. *J. Opt. Soc. Am. A* ,1990 ,7(7):1224-1225.
- [17] BRENNAN T J. Anatomy of the slope discrepancy structure function: characterization of turbulence [J]. *SPIE* 2003 ,5087:103-114.

- [18] BRENNAN T J. Characterization of propagation statistics from Shack Hartmann Wavefront sensor data[J]. *Imaging and Applied Optics* 2013.
- [19] 周仁忠. 自适应光学[M]. 北京:国防工业出版社,1996.
ZHOU R Z. *Adaptive Optics* [M]. Beijing: National Defense Industry Press,1996,168-174. (in Chinese)
- [20] 李新阳,姜文汉,王春红,等. 湍流大气中哈特曼传感器的模式波前复原误差 II [J]. *强激光与粒子束*,2000,12(3):319-323.
LI X Y,JIANG W H,WANG CH H *et al.* Modal reconstruction error of the hartmann sensor on measuring the atmosphere disturbed wavefront II [J]. *High Power Laser and Particle Beams* 2000,12(3):319-323. (in chinese)
- [21] BRENNAN T J,WITTICH D J. Statistical analysis of Airborne Aero-Optical laboratory optical wavefront measurements [J]. *Optical Engineering* 2013,52(7):071416

作者简介:



瞿青(1989—),女,湖北荆州人,硕士研究生,2012年于吉林大学获得学士学位,主要从事大气湍流格林伍德频率测量方法的研究。E-mail: quqing890926@163.com



张红胜(1961—),男,吉林长春人,高级实验师,主要从事光电仪器设计及优化分析、高精度光学编码器设计与检测等方面的研究。E-mail: zhanghs@ciomp.ac.cn



曹召良(1974—),男,河南济源人,博士,研究员,1998年于河南师范大学获得学士学位,2003年、2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事液晶自适应光学、光学设计和衍射光学等方面的研究。E-mail: caozlok@ciomp.ac.cn



赵晶丽(1962—),女,吉林长春人,高级实验师,主要从事光刻复制工艺及衍射元件设计制作方面的研究。E-mail: zha-
ojingli111@sina.cn



胡立发(1974—),男,湖北武汉人,博士,研究员,博士生导师,2003年于西北有色金属研究院超导材料研究所获得博士学位,主要从事液晶自适应光学校正成像、液晶大气湍流模拟器等方面的研究。E-mail: hulifa@ciomp.ac.cn



宣丽(1957—),女,吉林长春人,博士,研究员,博士生导师,1983年于吉林大学获得学士学位,1986年于中国科学院长春物理研究所获硕士学位,1998年于日本东北大学获得博士学位,主要从事液晶应用光学、液晶自适应光学工程、液晶器件物理、液晶合成及相关器件的光化学方面的研究。E-mail: xuanli@ciomp.ac.cn