

液晶大气湍流模拟器*

刘永军^{1,2} 胡立发¹ 曹召良^{1,2} 李大禹^{1,2} 穆全全^{1,2} 鲁兴海¹ 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,长春 130033)

(2 中国科学院研究生院,北京 100039)

摘要 提出平行取向液晶器件作为大气湍流模拟器(ATS)的应用,研制出平行排列 TFT 型二维阵列液晶湍流模拟器(LC ATS). 基于 Zernike 多项式模拟大气湍流的理论,在 Zygo 干涉仪上,利用此湍流模拟器产生 Zernike 模式面形,能够很好的产生 Zernike 多项式的前 2~8 项模式面形. 并且选取前 231 项 Zernike 模式,进行湍流的计算模拟与液晶湍流模拟器的实验模拟,计算模拟与实验模拟的湍流结果比较接近,说明此类型液晶湍流模拟器可以模拟大气湍流.

关键词 大气湍流;液晶;大气湍流模拟器;Zernike 多项式

中图分类号 O753;P40 **文献标识码** A

0 引言

大气湍流造成空气折射率的随机分布,严重影响光束通过大气后的成像质量,并且随着天文成像、激光通讯、轨迹跟踪等高端技术的发展,这种影响越来越引起人们的重视^[1]. 野外实验费时费力、重复性差,因此在工程设计和实验中人们迫切需要能模拟大气湍流扰动的大气湍流模拟器,以便在实验室里就可以进行相应的实验. 有人利用空气或水^[2]等为介质,在温度梯度场中产生湍流的湍流池作为大气湍流模拟器. 尽管该方法具有制作简单、成本低等优点,但体积很难做得足够大,而在几立方厘米的小体积内很难获得低空间频率成分,另外,重复性较低,且系统的散热对光学仪器有不利影响. 也有人研究用位相屏制作湍流模拟器^[3],该方法产生的湍流波前具有一定的周期性,与实际大气湍流的差距较大.

液晶器件具有高像素密度、大面积、无热量产生、位相编程实时控制等优越性能,可以用来制作大气湍流模拟器,且可以解决湍流池和位相屏的上述缺点,引起了人们的高度重视. 然而很多人使用的是扭曲排列的液晶器件^[4,5],该类型器件对入射光波进行位相调制时伴有振幅变化,影响大气湍流的模拟. 而平行排列的液晶器件在位相调制时没有振幅变化. 本文提出利用平行排列的液晶器件作为大气湍流模拟器,选取前 231 项 Zernike 模式进行湍流的计算模拟与液晶模拟器的实验湍流模拟,得到较好的计算模拟和实验结果.

1 Zernike 多项式模拟大气湍流

模拟大气湍流的方法有 Zernike 方法^[6~8]、Fourier 方法^[9]、小波法^[10],由于 Zernike 多项式的低阶模式可以与低阶像差相对应,且物理概念清晰,很适合模拟光学波前,因此本文选择利用 Zernike 多项式模拟大气湍流.

圆域内的任何波前函数 $\phi(x, y)$ 都可以展开为 Zernike 多项式的形式^[6~8]

$$\phi(x, y) = \sum_{i=1}^{i=\infty} a_i \cdot z_i(x, y) \quad (1)$$

式中 a_i 为第 i 项的 Zernike 模式系数, z_i 为第 i 项 Zernike 模式. Zernike 多项式模拟大气湍流的实质就是生成各项模式系数 a_i , 使产生的波前符合 Kolmogorov 湍流理论.

Zernike 多项式系数可以认为是零均值的高斯型随机变量,在选定 Zernike 多项式模式数的情况 p 下,假设 A 为系数向量

$$A = [a_1, a_2, \dots, a_p]^T \quad (2)$$

由式(1)得

$$a_i = (\phi, z_i) \quad (3)$$

再由式(3)根据 Kolmogorov 湍流理论,可以得到系数 A 的协方差矩阵 C

$$\langle a_i a_j \rangle = c_{ij} \left(\frac{D}{r_0} \right)^{5/3} \quad (4)$$

$$C = [c_{ij}] \quad i=1, 2, \dots, p, j=1, 2, \dots, p \quad (5)$$

D 是望远镜的口径, r_0 是大气相关长度, r_0 的数值大小反映湍流的强弱. 在 D 确定的情况下, $(D/r_0)^{5/3}$ 在模拟时可以代入特定的数值,以反映湍流的强弱. 矩阵 C 是系数 A 的协方差矩阵.

由协方差矩阵 C 可知 Zernike 模式之间不是统计独立的. 为了产生湍流随机波前,必须将其表述为有确定方差的随机量的组合,因此利用 Karhunen-

*国家自然科学基金(50473040, 59973020, 60277033, 19974046)和吉林省科委基金(20020603, 20010579)资助
Tel: 0451-82519754 Email: liuyuj@ciomp.ac.cn
收稿日期: 2005-08-11

Loeve 多项式作为转换. 把协方差矩阵 C 奇异值分解得到

$$C=VSV^T \tag{6}$$

式中 S 为对角阵, V 为酉矩阵, 也是 Karhunen-Loeve 多项式用 Zernike 多项式的展开系数. 可以产生零均值且方差阵为 S 的高斯型随机向量 B , 得到

$$A=VB \tag{7}$$

式中 B 是波面 $\phi(x, y)$ 利用 Karhunen-Loeve 多项式展开的系数. 至此可以得到具有零均值的高斯型随机向量 A , 通过式(1)就可得到符合 Kolmogorov 湍流理论的大气湍流.

2 实验结果与讨论

2.1 液晶大气湍流模拟器的设计

本文研制的液晶大气湍流模拟器是 TFT 型, 具有 $640 \times 480 \times 3$ 像素, 像素单元 $100 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$, 像素间距 $10 \mu\text{m}$, 涂覆在有导电电极玻璃基板上的液晶取向膜成反平行摩擦, 液晶层厚为 $5 \mu\text{m}$, 液晶的折射率各向异性在波长 632.8 nm 处为 0.198 .

2.2 Zernike 模式面形

利用美国 Zygo 公司的非索型 GPI1000 干涉仪, 进行 Zernike 多项式面形的产生实验, 实验的光路如图 1.

Zygo 干涉仪的 632.8 nm He-Ne 激光被部分反射镜 TF 分成反射和透射两束光: 反射光被反射

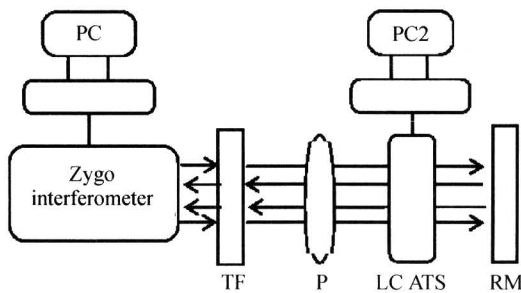


图 1 实验光路图
Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

回干涉仪内部称为参考光; 透射光经偏振片 P 后变为与液晶的排列方向相同的线偏振光, 垂直经过 LC ATS 后被部分反射镜 RM 反射回干涉仪内部, 称为物光. 物光与参考光发生干涉, 通过分析干涉条纹可以计算求得物光波的位相变化, 计算机 PC2 根据需要通过控制驱动电路施加相应的灰度级信号于 LC ATS 上.

图 2(a) 是利用上述的实验光路产生的 Zernike 多项式的前 2~8 项模式面形, 均产生最大幅值是 0.2λ , 且均是去除背底影响的实验结果, 此影响是由于液晶大气湍流模拟器本身基板的不平和加工工艺的限制造成的. 图 2(b) 是与图 2(a) 相对应的计算模拟结果.

图 2(a) 中每个子图的底面表示干涉仪 CCD 的像素, 纵轴表示波前相位的起伏程度, 单位是波长. 图 2(a)、(b) 中的 (1)、(2) 表示波前倾斜, (3) 表示波

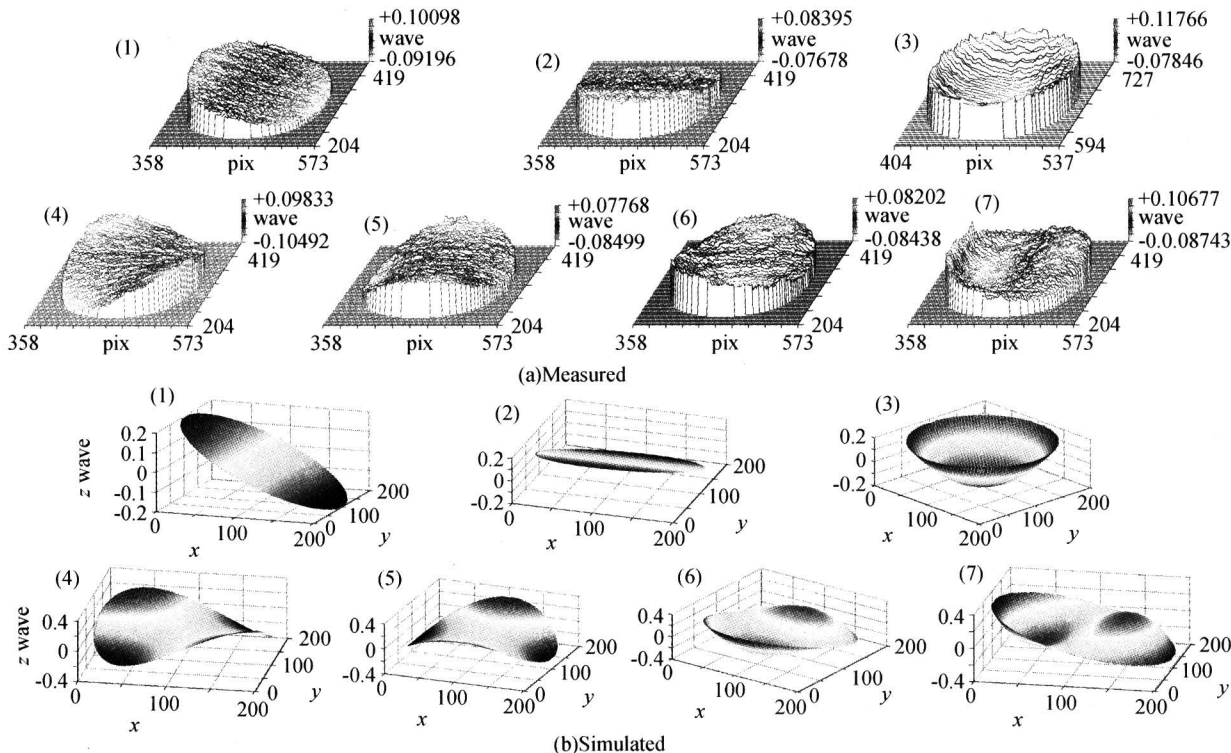


图 2 Zernike 模拟的产生与模拟
Fig.2 Production of Zernike

前离焦,(4)、(5)表示波前像散,(6)、(7)表示波前慧差.

可以看出,利用液晶大气湍流模拟器通过计算机控制,可以产生与真实 Zernike 模式面形很接近的面形,说明可以通过计算机控制模拟器实现光波波前的控制.这为进一步模拟大气湍流提供了可靠的依据.

2.3 大气湍流的模拟

根据 Zernike 多项式模拟大气湍流的理论,利

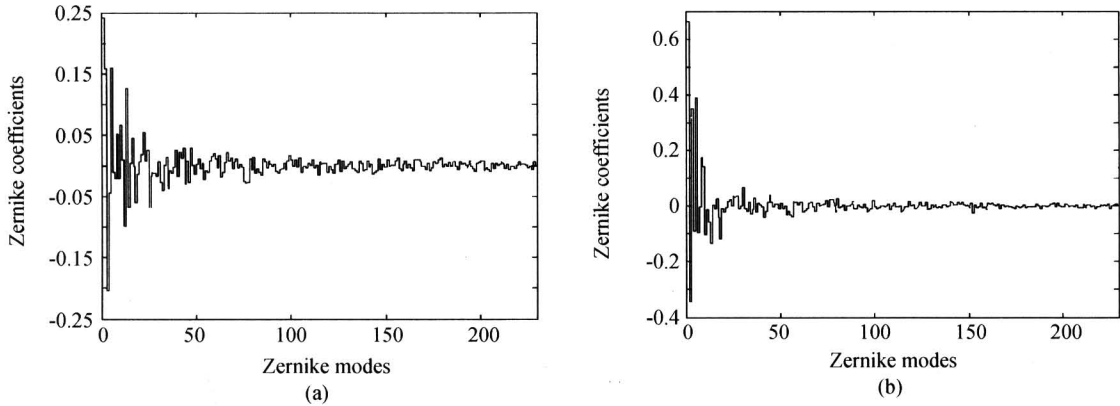


图 3 Zernike 模拟系数
Fig. 3 The coefficients of Zernike modes

由图 3 中(a)和(b)的 Zernike 模式系数,根据式(1),分别得到大气湍流模拟的计算结果,如图 4 (a)中的(1)和(2).

用 MATLAB 语言进行了大气湍流的计算模拟,分别选取 $(D/r_0)^{5/3}$ 为 2、4,选取前 231 项 Zernike 模式.图 3 得到的两组 Zernike 模式系数(a)、(b)分别对应着 $(D/r_0)^{5/3}$ 选取 2、4 的情况.从图 3 可以看出,低阶 Zernike 模式系数较大,且随着模式的增高系数变得很小,这也说明了在大气湍流中,低频成分权重较大,而高频成分权重较小的理论^[6].计算时去除了 Zernike 多项式中的第一项,此项是平移项对成像质量没有影响.

利用图 1 中的实验光路,进行液晶大气湍流模拟器模拟湍流的实验,如图 4 (b)是与(a)计算模拟结果相对应的实验结果.实验的结果已去除背底.

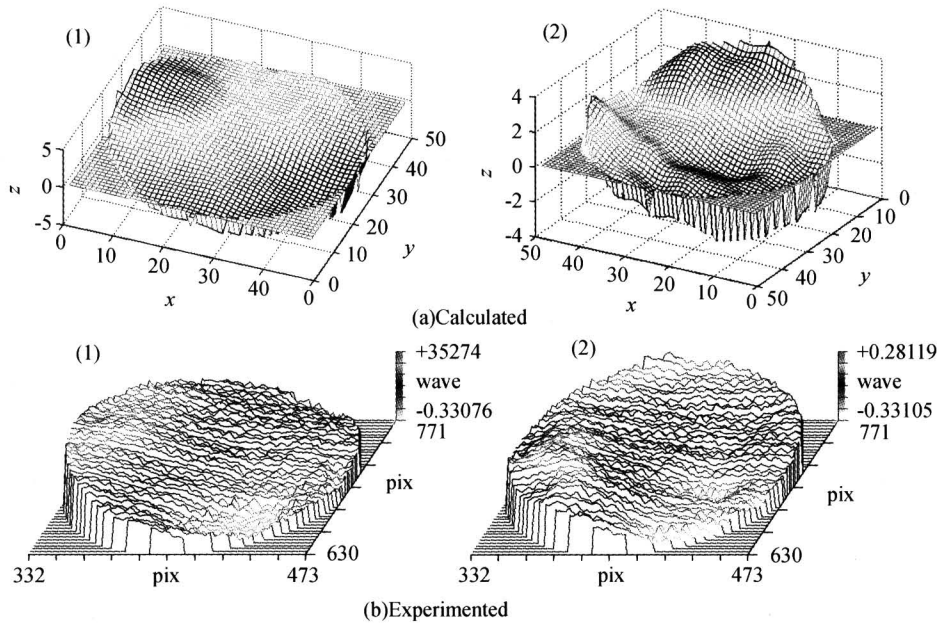


图 4 大气湍流的计算模拟与实验模拟结果
Fig. 4 The result of calculated and experimented simulation for atmosphere turbulence

可以看出计算模拟与实验模拟的结果比较接近,计算和实验得到的湍流范围都在 0.6λ 左右,两者比较接近,本液晶大气湍流模拟器的平整度和调制准确度以及响应速度在文章^[11]中有介绍.

本液晶大气湍流模拟器在液晶层厚度和液晶折

射率各项异性的限制下,位相的调制量只接近 1λ ,所以只是模拟弱湍流的情况.在对器件响应速度影响不大的情况下,增大液晶层的厚度和选择较大折射率的液晶可以改善器件的模拟范围.

另外,本液晶大气湍流模拟器的液晶像素较大,

这样对大气湍流高频成份的模拟会有所失真,如果增大液晶器件的像素密度,利用更多的 Zernike 模式模拟湍流,能够产生更接近真实的大气湍流。

3 结论

研制出可以模拟大气湍流的平行排列液晶湍流模拟器,选取前 231 项 Zernike 模式进行不同强度湍流的计算模拟与液晶湍流模拟器的实验模拟,得到了较好的计算模拟与实验模拟结果。尽管液晶器件作为大气湍流模拟器有很多的不足,但可以看出其在大气湍流模拟方面的潜在应用。且随着电子学和微电子学技术的发展,很快将能加工出适合用于模拟大气湍流的高质量液晶器件。

参考文献

- 1 张逸新,陶纯堪. 湍流大气传输高斯谢尔光束的到达角起伏. 光子学报,2005,34(3):424~427
Zhang Y X, Tao C K. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(3):424~427
- 2 张骏,曾宗泳,肖黎明,等. 用于波前补偿实验的对流湍流系统的光学特性. 光学学报,1997,17(9):1259~1263
Zhang J, Zeng Z Y, Xiao L M, et al. *Acta Photonica Sinica*, 1997, 17(9):1259~1263
- 3 杨连臣,沈忙作,郭永洪. 天体目标斑点成象的模拟. 光子学报,2000,29(12):108~1112
Yang L C, Shen M Z, Guo Y H. *Acta Photonica Sinica*, 2000, 29(12):108~1112
- 4 Micheal K G, Anthony S, Mikhail A V, et al. Setting up a liquid crystal phase screen to simulate atmospheric turbulence. *SPIE*, 2000, 4124:89~97
- 5 Matthew R B, Matthew E G. Atmospheric simulation using a liquid crystal wavefront controlling device. *SPIE*, 2004, 5553:258~268
- 6 Robert J N. Zernike polynomials and atmospheric turbulence. *J Opt Soc Am*, 1976, 66(3):207~211
- 7 Nicolas R. Atmospheric wavefront simulation using Zernike polynomials. *Opt Eng*, 1990, 29(10):1174~1180
- 8 胡朝晖,姜文汉. 受大气湍流影响的光学波前模拟. 光电工程,1995,22(2):50~56
Hu Z H, Jiang W H. *Opto-Electronic Engineering*, 1995, 22(2):50~56
- 9 Vieceilli J A, Canfield E H. Functional representation of power-law random fields and time series. *J Comp Phys*, 1991, 95(8):29~39
- 10 Kevin W B, William T R. Application of wavelets to wavefront reconstruction in adaptive optical systems. *SPIE*, 1997, 3126:288~299
- 11 Hu L F, Xuan L, Liu Y J, et al. Phase-only liquid crystal spatial light modulator for wave-front correction with high precision. *Opt Express*, 2004, 12(26):6403~6409

Liquid Crystal Atmosphere Turbulence Simulator

Liu Yongjun^{1,2}, Hu Lifa¹, Cao Zhaoliang^{1,2}, Li Dayu^{1,2}, Mu Quanquan^{1,2}, Lu Xinghai¹, Xuan Li¹

1 State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033

2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

Received date: 2005-08-11

Abstract We presented parallel alignment liquid crystal (LC) devices for an application of Atmosphere Turbulence Simulator (ATS). A novel ATS with a parallel alignment LC TFT was fabricated. Based on theory of atmosphere turbulence simulation with Zernike polynomial, different turbulence wavefronts were produced with the ATS. And the results were measured with the Zygo interferometer. The produced wavefront based on the first 2nd to 8th Zernike polynomial were very good. The 231 Zernike polynomials were used to simulated atmosphere turbulence. The calculated result and experimented result were fitted very well. It indicated that the parallel alignment LC ATS was promising to be used to simulate atmosphere turbulence.

Keywords Atmosphere turbulence; Liquid crystal; Atmosphere turbulence simulator; Zernike polynomial



Liu Yongjun received his B. S. degree in Physics from Inner Mongolia University in 2001. Currently, he is working for the Ph. D. degree in State Key Laboratory of Applied Optics in CIOMP, Chinese Academy of Sciences. His research interests include LC device and its optical application.