

引用格式: JING Gang, LIU Zhi, LIN Peng, et al. Boundary Layer Effect Simulation Based on Liquid Crystal Spatial Light Modulator[J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(2):0223001

景刚, 刘智, 林鹏, 等. 基于液晶空间光调制器的附面层效应模拟[J]. 光子学报, 2024, 53(2):0223001

# 基于液晶空间光调制器的附面层效应模拟

景刚<sup>1</sup>, 刘智<sup>2</sup>, 林鹏<sup>2</sup>, 刘树通<sup>3</sup>, 蒋青芳<sup>3</sup>

(1 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

(2 长春理工大学 空间光电技术国家地方联合工程研究中心, 长春 130022)

(3 长春理工大学 电子信息工程学院, 长春 130022)

**摘要:** 为了给航空动平台激光通信的附面层效应校正系统提供验证条件, 设计了一种基于液晶空间光调制器来模拟附面层效应的模拟器。首先, 从几何光学的角度分析附面层效应, 将其等效为负透镜。然后, 利用计算机对不同飞行条件下附面层效应与等效负透镜焦距之间的关系进行数值分析仿真。之后在液晶空间光调制器上导入不同焦距透镜的相位灰度图以实现变焦透镜的功能, 通过改变变焦透镜的焦距来模拟航空平台不同飞行条件下的附面层效应。最后通过实验验证模拟的准确性, 在环境温度下, 模拟附面层效应的液晶空间光调制器得到的光斑图像由红外相机拍摄, 之后进行图像处理分析实际光斑大小, 并与理论计算光斑大小比较, 得出误差曲线图。研究结果显示, 基于液晶空间光调制器模拟附面层效应引起散斑效应的理论光斑大小与实际光斑大小的均方根误差为 0.043 75, 验证了所提出的方法的可行性和有效性。

**关键词:** 光通信; 附面层效应; 光斑分析; 液晶空间光调制器; 液晶变焦透镜; 模拟器

中图分类号: TN929.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20245302.0223001

## 0 引言

无线激光通信具有高速传输、高度保密性和便携性等优势<sup>[1]</sup>。相较于卫星平台或地面平台, 航空平台空间激光通信设备面临平台强烈振动、复杂天空背景光大气信道以及高动态等挑战, 因此以航空平台为节点的激光通信链路技术受到了高度关注<sup>[2-3]</sup>。其中, 模拟和补偿大气对空间激光通信性能的影响至关重要。大气对航空动平台激光通信性能的影响主要体现在湍流效应、气动光学效应和散射效应等方面<sup>[4]</sup>。飞行器在飞行时, 外壁与大气相互作用引起气动加热, 产生温压不均的热流场和激波, 导致红外成像严重退化, 称为气动光学效应。附面层效应是气动光学中的第一类。温压不均导致形成一个不断变化且密度和温度分布不均的流场, 即大气附面层。这种流场对通信光产生的影响包括像模糊、光偏移和像抖动等, 进而影响通信效率<sup>[5-7]</sup>。因此在对于航空动平台激光通信的研究中, 必须要对各种校正设计技术进行验证测试, 建立相应的附面层效应仿真测试系统, 以验证理论模型的正确性, 其中的关键技术为附面层效应模拟技术。目前用于验证测试附面层效应校正系统的仿真方法大体可以分为两类, 一类是搭建风洞装置模拟, 另一类是实物与电脑仿真结合的方法<sup>[8]</sup>, 外场试验很少。最早报道的外场飞行试验是在 2011 年, 由美国圣母大学机载附面层效应实验室 (Airborne Aero-optics Laboratory, AAOL) 开展的跨音速平面窗口转台气动光学试验, 重点研究了高速飞行条件下, 外挂吊舱平面窗口的气动光学效应<sup>[9-11]</sup>。风洞技术是一种利用人工制造气流来模拟高速流动环境的技术, 其真实性非常高。然而, 由于风洞壁的存在, 这种技术可能会受到边界条件的影响。此外, 设备结构和动力等因素也对其产生了一定的限制, 并且风洞技术的设施较为复杂, 运行成本也相

基金项目: 国家自然科学基金叶企孙科学基金 (No. U2141231)

第一作者: 景刚, 317528886@qq.com

通讯作者: 刘智, liuzhi@cust.edu.cn

收稿日期: 2023-07-10; 录用日期: 2023-08-31

<http://www.photon.ac.cn>

对较高。半实物仿真技术则利用光学设计软件ZEMZX中的相位面型拟合出不同状况下附面层效应所产生的畸变波面后进行编程,生成时变的图像并将其输入到变形镜(Digital Micromirror Devices, DMD)上,然后经过光学系统进行投射。但这种方式对变形镜的性能要求很高,并且计算瞬时的畸变波面难度较大。以上对附面层传输效应的机理研究主要基于非均匀的外流场对通信光束的影响来实现模拟<sup>[11-12]</sup>。2016年,李征威等针对2.5 Ma(飞行马赫数Ma表示飞行速度与飞行器所在位置的音速的比值)条件下附面层效应对通信光束的影响进行分析,在数值仿真基础上,提出将头罩外附面层效应等效为透镜的方法,并采用风洞验证试验验证了利用等效透镜方法对附面层传输效应分析的合理性和正确性<sup>[13]</sup>。本文在此基础上,从几何光学系统组合的角度,把外流场等效为光学透镜,再利用液晶空间光调制器(Liquid Crystal Spatial Light Modulator, LC-SLM)模拟变焦透镜,将相对应相位灰度图导入LC-SLM中来模拟附面层效应。

## 1 附面层效应的产生机理

当飞机高速行驶时,附面层效应从几何光学的角度上可以等效为一负透镜,形成一个附加焦距的效果。在平板表面,附面层引起聚焦效应的焦距值接近无穷,可以忽略不计,但曲面物体造成的曲面附面层聚焦效应则不可忽略,如图1。

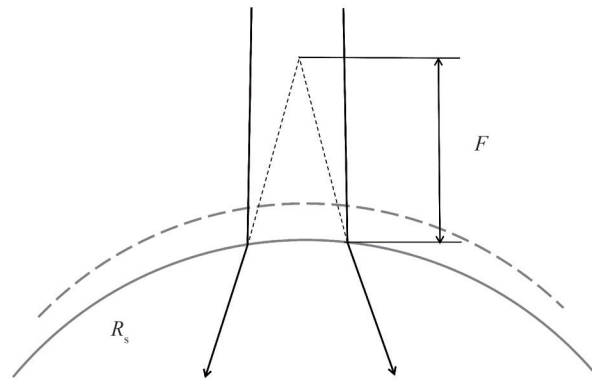


图1 附面层聚焦效应示意图

Fig. 1 Boundary layer focusing effect diagram

平行光入射经附面层时发生了折射,光线传播方向改变。由物像距可以近似表示为

$$\frac{n_1}{S_1} + \frac{n_2}{S_2} = \frac{(n_2 - n_1)}{R_s} \quad (1)$$

式中, $S_1$ 为物距和, $S_2$ 为像距; $R_s$ 为曲率半径; $n_1$ 为空气折射率、 $n_2$ 为介质折射率。假定附面层厚度远小于外边半径(即认为附面层的内外边曲率半径相等),光源为无穷远,则入射光平行, $S_1$ 为无穷大, $S_2$ 为最终点离开附面层与光轴交点的距离,即为有效焦距 $F$ ,有

$$\frac{F}{R_s} = \frac{n_w}{(n_w - n_\infty)} \quad (2)$$

式中, $n_w$ 为近壁面的折射率, $n_\infty$ 为当地大气自由流折射率。 $R_s$ 为窗口表面曲率半径。壁面附近折射率和当地自由折射率由航空平台的飞行速度、飞行海拔高度和天气状况等条件所决定。

经推导得附面层效应等效焦距 $F$ 与飞机表面曲率半径 $R_s$ 的比值可表示为

$$\frac{F}{R_s} = -\left(\frac{1}{K_{GD}\rho_\infty}\right)\left[5\gamma^{-1}(M_0)^{-1} + 1\right] - 5\gamma^{-1}(M_0)^{-2} \quad (3)$$

式中, $K_{GD}$ 为 Gladstone-Dale 参数,航空动平台激光通信采用1 550 nm波段的 $K_{GD}$ 约为0.219 2; $\rho_\infty$ 为自由流密度(在仿真中环境密度约为大气密度),与飞行高度相关; $\gamma$ 为绝热指数; $M_0$ 为自由气流马赫数;负号表明附面层效应等效为负透镜,使入射光产生发散。等效焦距 $F$ 绝对值越大,附面层对入射光的影响越小<sup>[14-15]</sup>。

## 2 基于液晶空间光调制器对附面层效应的模拟

### 2.1 基于LC-SLM实现附面层模拟的原理

液晶会对入射光产生双折射效应。在施加电场时,液晶分子光轴发生偏转,外加电场电压的大小决定了其不同的偏转角度,此时o光(寻常光)的折射率 $n_o$ 不随偏转角度改变,而e光(非寻常光)的折射率 $n_e$ 则随偏转角度 $\theta$ 变化,即

$$n_e(\theta) = \frac{n_e \times n_o}{\sqrt{n_e^2 \sin^2 \theta + n_o^2 \cos^2 \theta}} \quad (5)$$

假设入射光波长为 $\lambda$ ,经过晶片厚度为 $d$ 的相位差 $\varphi_0$ 可以表示为

$$\varphi_0 = \pi d (n_e - n_o) / \lambda \quad (4)$$

液晶空间光调制器(LC-SLM)是由一个个液晶分子组成的一维或二维的阵列,每个液晶分子都可独立受光信号或电信号控制(本文所使用的电寻址),所以用LC-SLM对入射光相位调制前,需先根据光场的相位分布得到相位分布灰度图,灰度图中显示的灰度深度代表了相位调制量,LC-SLM会根据灰度信息控制各个像素所加电压大小使不同像素处折射率变化,对光波进行特定的相位调制。

通过去附面层聚焦效应的分析,附面层可以等效为一负透镜,利用空间光调制器加载负透镜相位分布所对应的相位调制灰度图,即可实现对航空动平台附面层的模拟。

透镜复振幅透过率函数为

$$t(x_0, y_0) = \exp\left(-j \frac{\pi}{\lambda f} (x_0^2 + y_0^2)\right) \quad (6)$$

式中, $x_0, y_0$ 是以透镜中心为坐标原点建立坐标系中的某一位置, $f$ 为透镜焦距。相位因子以 $2\pi$ 为周期,即

$$\varphi(x_0, y_0) = \left[ \frac{\pi(x_0^2 + y_0^2)}{\lambda f} \right] \quad (7)$$

因此要对相位函数 $\varphi(x_0, y_0)$ 进行 $2\pi$ 模除,得到透镜连续相位分布,即

$$\varphi'(x_0, y_0) = \text{mod}_{2\pi}[\varphi(x_0, y_0)] \quad (8)$$

把透镜的相位分布做 $2\pi$ 的周期化处理之后,通过改变 $f$ 的值就可得到焦距为 $f$ 的相位调制灰度图,加载入液晶空间光调制器即可达到模拟不同焦距 $f$ 的透镜<sup>[16-17]</sup>。

### 2.2 LC-SLM模拟附面层效应准确性测量

采用的LC-SLM模拟器的功能是生成一个等效于附面层效应影响的负透镜,引起光斑扩散。对选定模拟器进行仿真,并分析所生成透镜的效果。主要思路是用计算机编程生成不同飞行条件下附面层效应所对应焦距的透镜的相位调制灰度图,并导入LC-SLM,测量以LC-SLM模拟透镜的焦距与理论计算焦距的误差,来判断模拟器的性能。

由于附面层等效焦距非常大,至几米甚至几十米,用LC-SLM模拟透镜实际焦距不方便测量,因此采用在近处接收,分析计算光斑大小与实际光斑大小,代替模拟透镜焦距上的误差,如图2所示。

假设所模拟的是一个薄透镜,平行入射光半径为 $y_1$ , $f$ 为负透镜焦距, $L$ 是透镜到像面的距离, $y_2$ 则是 $L$ 距离所对应的像高。由三角形公式可得

$$y_2 = y_1 + \theta L \quad (9)$$

近轴光线方程为

$$n'u' = nu - y\varphi \quad (10)$$

式中, $n'$ 与 $n$ 分别为像空间和物空间折射率,由于模拟的是薄透镜且放置于空气中,故有 $n' = n = 1$ ;  $u'$ 与 $u$ 分别为入射光和出射光的偏折角度,这里为平行光入射,所以 $u = 0$ ,出射光偏转角为 $u' = \theta$ , $y$ 为在透镜上入射点高度; $\varphi$ 为透镜光焦度,与模拟透镜焦距 $f_{lc-slm}$ 互为倒数。由(9)、(10)可推出实际焦距 $f_{lc-slm}$ 的大小为

$$f_{lc-slm} = \frac{y_1 L}{y_2 - y_1} \quad (11)$$

入射光半径  $y_1$  及成像距离  $L$  都已知,测量焦距问题则转化为在距离  $L$  点测量像高  $y_2$  的问题。

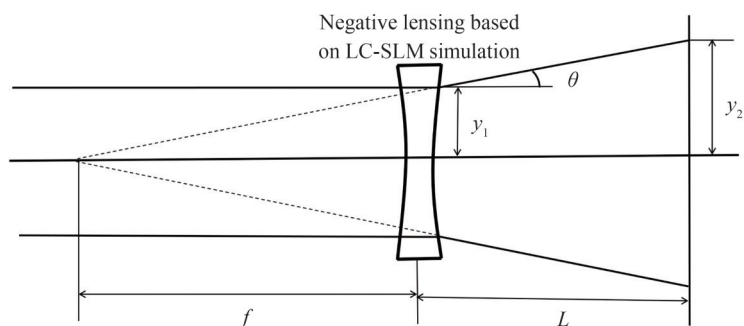


图2 测量实际焦距方法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the method for measuring the actual focal length

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 附面层效应的仿真分析

影响附面层效应的因素分别为航空平台的飞行高度( $H$ )、飞行马赫数( $Ma$ )以及飞机壁面的曲率半径( $R_s$ )。壁面曲率半径取决于航空平台外形结构,给定壁面曲率半径为190 mm,分别从航空平台飞行高度和速度入手,利用计算机仿真程序计算其对附面层效应的影响。

##### 3.1.1 航空平台飞行速度对附面层效应的影响分析

航空平台的飞行速度取决于多种因素,如平台类型、负载重量、气象条件、航线长度和飞行高度。一般来说,商用客机的最低飞行速度为250~300 km/h(0.2~0.24 Ma),而军用战斗机的飞行速度则可以超过400~2 400 km/h(0.3~2 Ma),例如F-16、苏-27等型号,超音速飞机的巡航速度较快,一般在900~1 200 km/h(0.7~0.9 Ma)左右,例如SR-72黑鸟战略侦察机等。设置飞行马赫数区间为0~5 Ma,分析飞行高度为海平面、5 km、10 km、15 km的条件下马赫数与附面层等效为负透镜的焦距的关系,如图3。

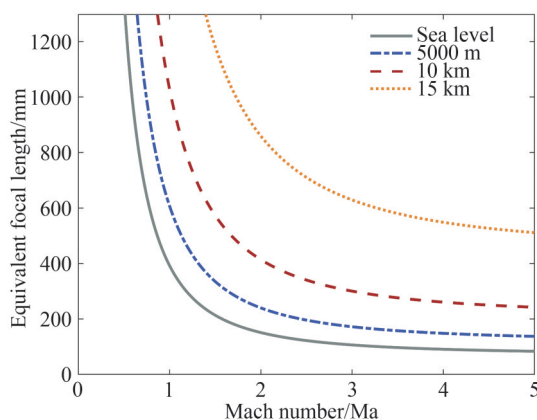


图3 飞行马赫数与附面层等效为负透镜的焦距的关系

Fig. 3 The relationship between flight Mach number and the equivalent focal length of the boundary layer as a negative lens

实际上,附面层效应等效的透镜焦距为负值。为了方便分析,取等效焦距值的绝对值。从图3中可以看出,当马赫数趋近于零时,焦距趋近于无穷大,这意味着透镜相当于平面镜。因此,入射光的影响越小,附面层效应也就越弱。随着马赫数的不断增加,焦距值随之下降。由于焦距为负值,入射光会发生发散。焦距值越小,发散角越大,接收探测器上的接收光功率也越弱,进而影响通信系统的误码率。从变化率的角度来看,在0~1.5 Ma范围内曲线斜率变化明显,1.5 Ma后斜率变化逐渐稳定,附面层效应影响也达到极限。

### 3.1.2 航空平台飞行高度对附面层效应的影响分析

除了飞行速度,飞行高度也是影响附面层效应的一个非常重要的因素,不同飞行高度的大气密度计算方式也不同。分析对流层(高度为0~11 km)、平流层较低位置和较高位置(11~20 km,20~32 km),速度在1 Ma以内,飞行高度与等效透镜焦距的关系,如图4。可以看出,随着飞行高度的增加,大气分子之间的距离变大,导致大气压力逐渐降低且温度也会降低。这使得大气空气密度减小,从而附面层聚焦效应也相应减小,11 km以上时等效透镜焦距已经非常大了,基本可以忽略。

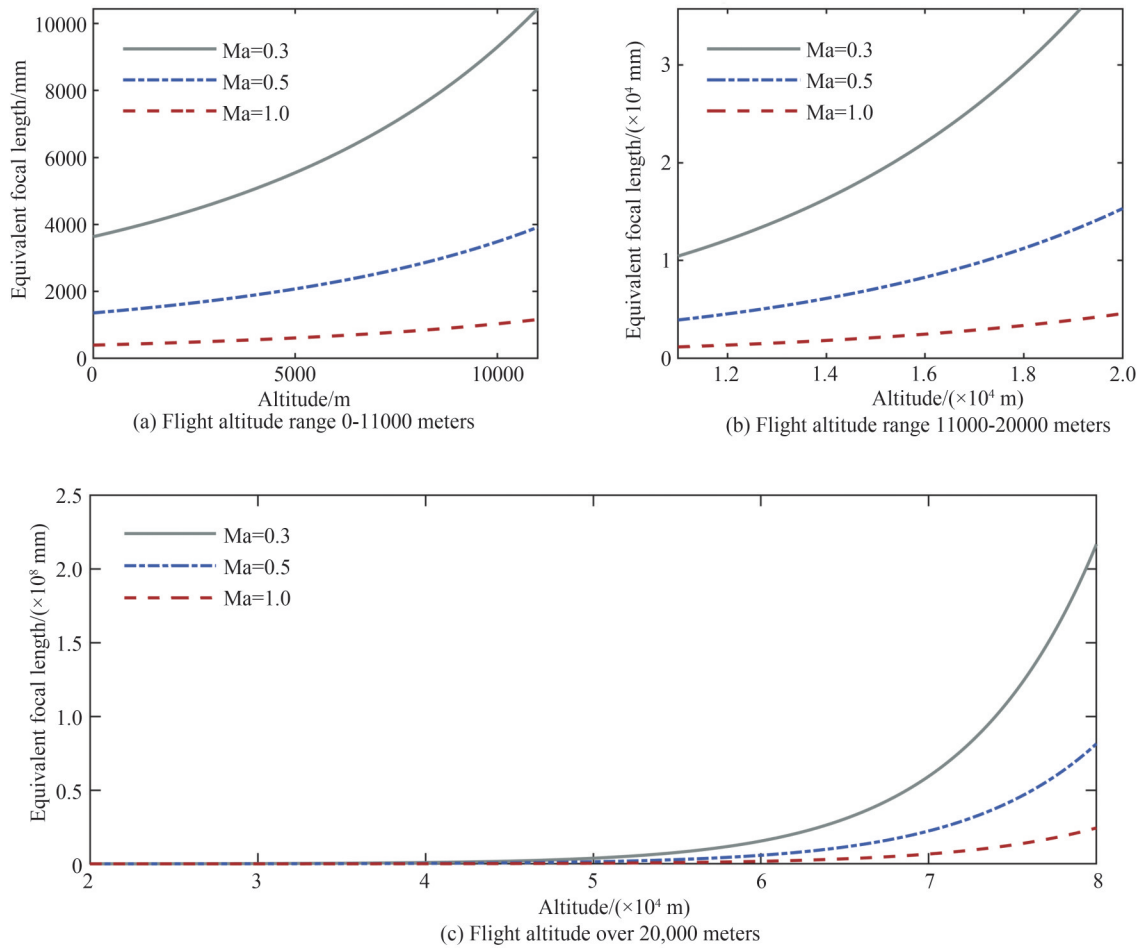


图4 飞行海拔与附面层等效为负透镜的焦距的关系

Fig. 4 The relationship between flight altitude and the equivalent focal length of the boundary layer as a negative lens

因此可知,在飞行高度相同的情况下,飞行速度越大,附面层效应的影响就越大;而当飞行速度相同时,飞行高度越接近地面,附面层效应就会更加明显。

### 3.2 基于LC-SLM模拟附面层效应的实验验证

以第2节与3.1节的分析及结论为基础,从几何光学系统组合的角度出发,深入探讨附面层效应。为了研究该现象在接收系统中的影响,搭建了一个基于LC-SLM的附面层效应模拟系统。该系统是基于附面层效应导致的接收系统离焦模拟而构建的,能够产生由附面层效应引起的像抖动和像模糊。其核心部件为空间光调制器(LC-SLM)。依靠计算机分析计算航空平台不同时刻的飞行速度和高度对应的附面层效应等效透镜的焦距大小,根据负透镜的相位分布函数,利用算法得到该焦距下相位调制灰度图,导入空间光调制器,可在接收像面上产生抖动和模糊。示意图如图5。

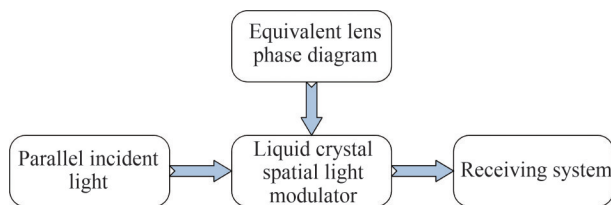


图5 基于液晶空间光调制器的附面层效应模拟器示意图

Fig. 5 Schematic diagram of boundary layer effect simulator based on liquid spatial light modulator

### 3.2.1 基于LC-SLM模拟附面层效应的性能验证

LC-SLM采美国Meadowlark公司相位型LC-SLM,其具体性能参数如表1。LC-SLM调制深度不是理想的 $2\pi$ ,且调制深度与加载灰度值大小并非理想映射的关系,使得模拟透镜设计焦距值与实际焦距值不一致。为测试模拟透镜性能,采用附面层效应理论计算的设计焦距值与基于LC-SLM模拟实际透镜焦距进行对比,以体现模拟的准确性。

表1 LC-SLM性能参数

Table 1 LC-SLM performance parameters

Output power/mW	Pixel count	Pixel size/ $\mu\text{m}$	Aperture/mm	Refresh rate/Hz
0~20	1 920×1 152	9.2×9.2	17.7×10.6	31

图6是测试系统示意图。激光器为连续性,波长为1 550 nm,受接收相机阈值功率的影响,需先接入光衰,出射光功率为65.98 nW;经过准直扩束器后出射平行光半径为3.5 mm;后通过偏振片,得到能被LC-SLM调制的线性偏振光后进入LC-SLM。计算机将计算焦距值生成的透镜相位灰度图(类似于菲涅尔波带片图样)导入空间光调制器。最后使用相机接收得到光斑图并分析光斑大小,相机性能参数如表2。再由2.2节理论推导实际焦距大小。

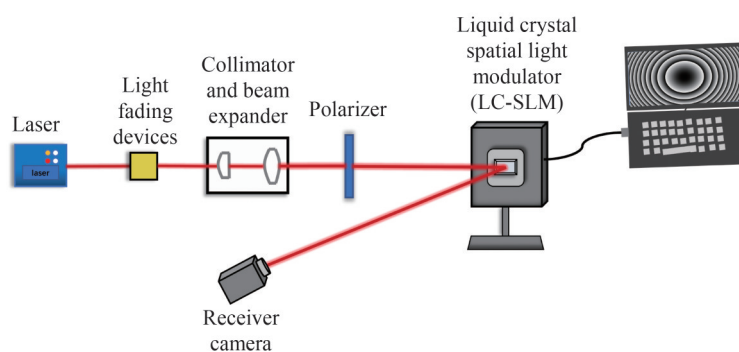


图6 空间光调制器模拟附面层效应的性能验证实验示意图

Fig. 6 Experimental diagram of performance verification of a spatial light modulator simulating boundary layer effects

表2 相机性能参数

Table 2 Camera performance parameters

Resolution	Image size/ $\mu\text{m}$	Spectral range/nm
640×512	25×25	900~1 700

以航空平台飞机表面曲率半径为190 mm,选取了三种航空动平台飞行状态,分别为静止时,飞行速度为0.2 Ma、飞行高度为10 km,速度为0.3 Ma、飞行高度为5 km,附面层效应等效透镜焦距为-206 622.330 1 mm,它的相位分布灰度图和接收相机接收到的光斑变化如图7。

利用Matlab软件图像处理提取光斑边缘<sup>[18-21]</sup>,Hough圆变换拟合光斑边缘,从而计算光斑大小。以0.2 Ma,10 km光斑图为例,接收相机CCD传送至电脑中的原始光斑图像存在很多噪声,会影响对光斑大小分析的准确性,因而需先对原始光斑图像进行处理。图8为预处理前的原始激光光斑图像以及能量分布三维图。

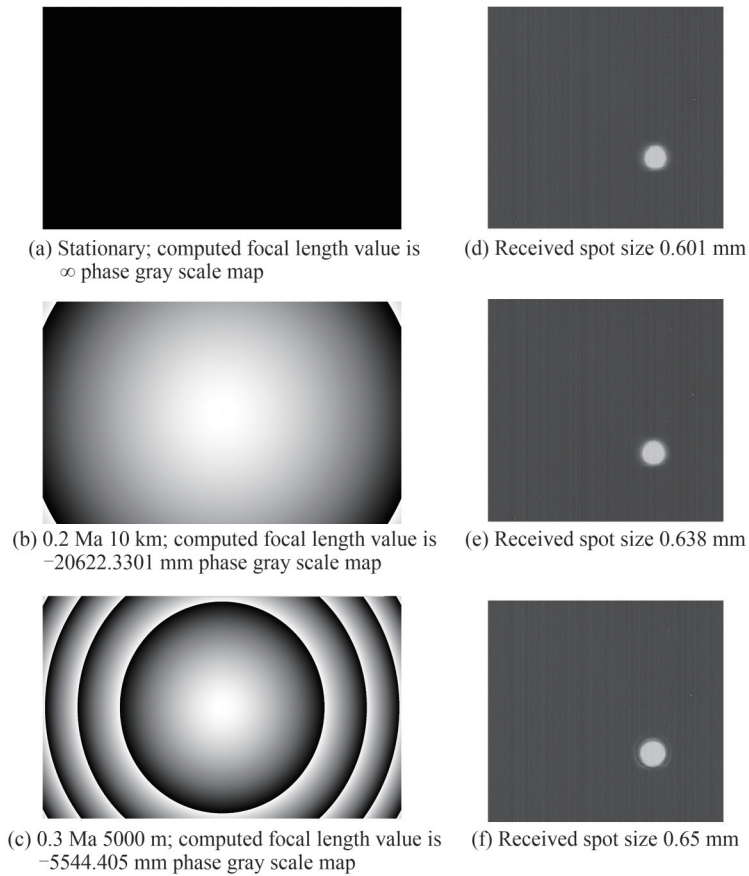


图7 相位分布灰度图和相机接收到的光斑

Fig. 7 The phase distribution gray scale and the light spot received by the camera

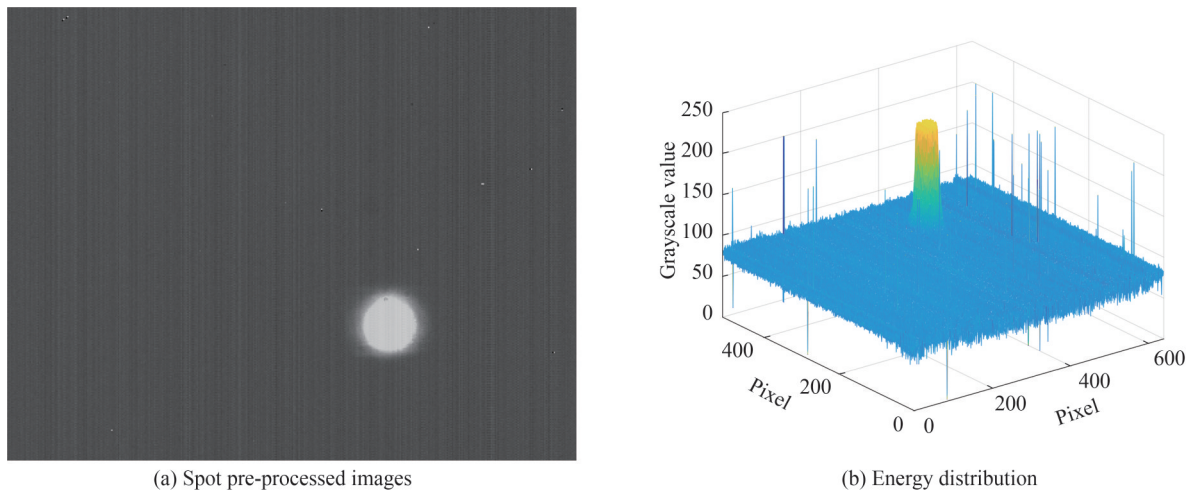


图8 预处理前的原始激光光斑图像以及能量分布

Fig. 8 The original laser spot image and energy distribution before pretreatment

由能量分布可以看出有大量由随机噪声产生的毛刺;同时原始光斑图像中背景灰度值不是理想的0,约为60,主要由暗噪声形成。所以首先要进行灰度调整和中值滤波来抑制噪声,如图9。

然后对图像进行二值化以分开图像和背景,由于二值化后的图像边缘具有较大的噪声,因此还需进行形态学中的开运算和闭运算处理,使光斑边缘平滑。接着提取光斑边缘,最后把提取的边界左边进行Hough变换圆拟合,其流程如图10。

最后得到光斑半径为 0.638 mm,实际焦距值为 195 68.889 mm,实际焦距值与计算焦距值相差

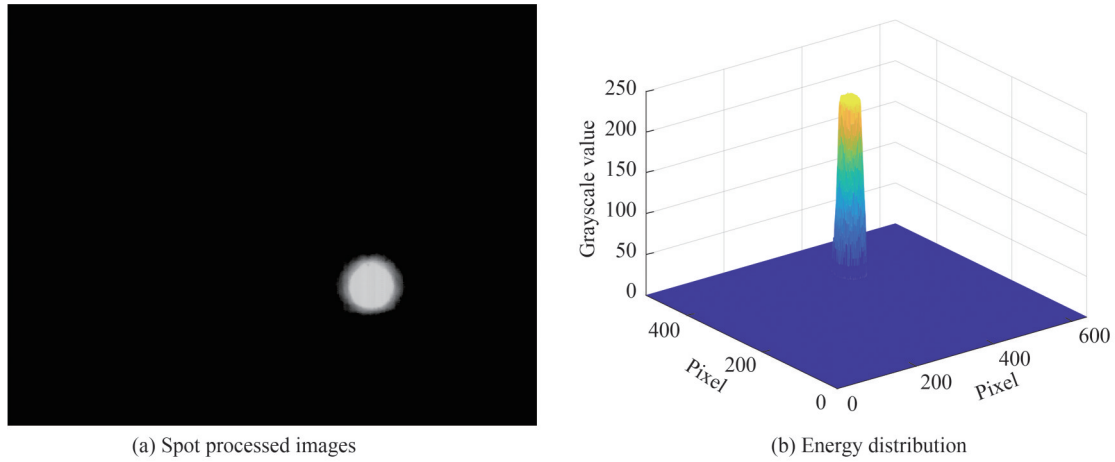


图9 灰度调整和中值滤波后光斑图与能量分布  
Fig. 9 Spot image and energy distribution after grayscale adjustment and median filtering

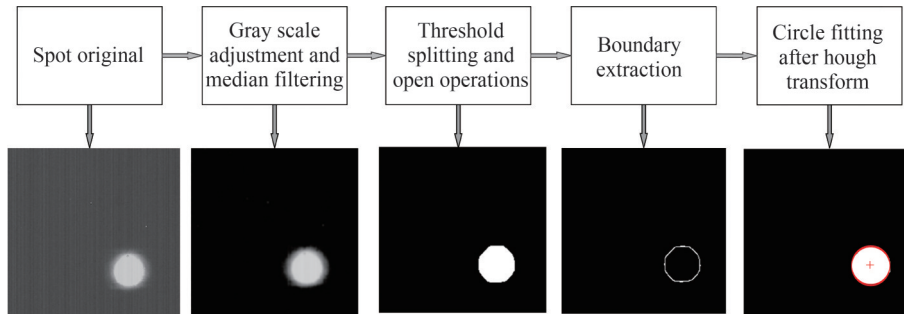


图10 Hough变换圆拟合求光斑半径流程  
Fig. 10 Hough transform circle fitting flow chart of spot radius

1 053.441 1 mm。尽管理论值与实际值之间存在很大差异,但由于等效负透镜的整个焦距值非常大,因此这种情况对光斑扩散的影响并不显著。为了更好地说明模拟的优劣,仅分析在附面层效应下实际光斑大小和理论计算光斑大小,以判断LC-SLM模拟附面层效应的效果。选取了11组不同的飞行状态。结果如表3及图11。

表3 不同飞行状态下附面层效应模拟的理论实验效果对比

Table 3 Comparison of theoretical and experimental results of boundary layer effect simulation under different flight states

Serial number	Flight speed/Ma	Altitude/km	Theoretical calculation of spot radius/mm	Actual spot radius/mm
1	1	Sea level	1.031 457	0.968 75
2	1	5	0.878 986	0.855
3	1	10	0.765 313	0.787 5
4	1	20	0.638 097	0.656 25
5	1	15	0.681 341	0.700 25
6	0.5	5	0.682 526	0.703 25
7	0.5	20	0.612 238	0.644 5
8	0.3	20	0.605 375	0.62
9	0.2	10	0.609 413	0.638
10	0.2	15	0.605 271	0.618 75
11	0.2	Sea level	0.622 073	0.637 5

图11中显示了实验测量值与理论计算值之间的偏差,其中误差主要受到接收光斑直径的计算以及LC-SLM的调制深度与灰度值之间关系的影响,所以标定LC-SLM相位调制曲线至关重要。



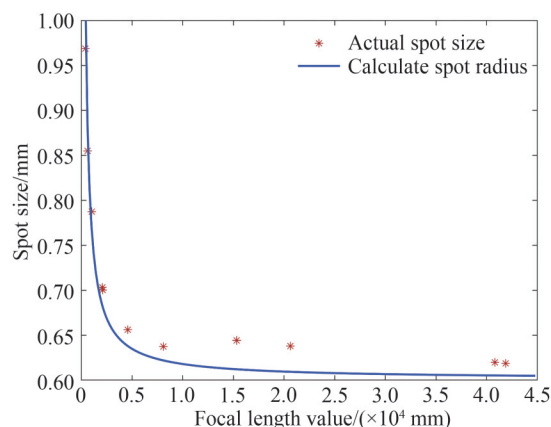


图 11 不同飞行状态下附面层效应模拟的理论与实验效果

Fig. 11 Curve of theoretical and experimental effects of boundary layer effect simulation under different flight states

经计算,模拟附面层效应系统对光斑扩散后的大小与理论上光斑大小的均方根误差为 0.043 75,图 12 误差曲线证明利用 LC-SLM 可以有效模拟附面层效应对光斑扩散的影响。

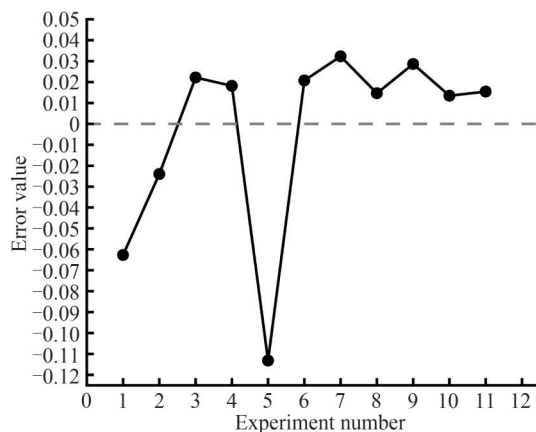


图 12 基于空间光调制器的附面层模拟误差曲线

Fig. 12 Boundary layer simulation error curve based on spatial light modulator

## 4 结论

本文提出了一种基于 LC-SLM 的航空平台附面层聚焦效应模拟方法,对聚焦效应的原理和模拟性能进行了分析,并搭建实验系统对其模拟效果进行验证。通过 LC-SLM 加载不同透镜相位分布灰度图,实现透镜功能,来模拟不同情况下附面层效应带来的接收系统离焦作用。实验结果表明,模拟效果均方根误差为 0.043 75。基于 LC-SLM 模拟附面层效应技术可为航空平台附面层的研究提供一操作简单、可控性高的测试环境,并有效降低研发成本,减少对大型风洞测试的依赖。

### 参考文献

- [1] JIANG Huilin, TONG Shoufeng. Space laser communication technology and systems[M]. Beijing: Defense Industry Press, 2010.  
姜会林,佟首峰. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京:国防工业出版社,2010.
- [2] ZHENG Yunqiang, LIU Huan, MENG Jiacheng, et al. Development status, trend and key technologies of air-based laser communication[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(6): 397-409.  
郑运强,刘欢,孟佳成,等. 空基激光通信研究进展和趋势以及关键技术[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(6): 397-409.
- [3] WANG Tianshu, LIN Peng, DONG Fang, et al. Progress and prospect of space laser communication technology [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 22(3): 92-99.  
王天枢,林鹏,董芳,等. 空间激光通信技术发展现状及展望[J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 92-99.
- [4] ZHOU Haijun, QIN Jie. Transmission channel and performance analysis for airborne laser communication link [J].

- Semiconductor Optoelectronics, 2023, 44(4): 633-638.  
周海军, 秦杰. 机载激光通信链路的传输信道及性能分析[J]. 半导体光电, 2023, 44(4): 633-638.
- [5] XING Zhan, CHEN Xiaoyi, PENG Zhiyong, et al. Research progress and thinking of infrared aero-optical effect [J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(4): 108-124.  
邢占, 陈晓依, 彭志勇, 等. 红外气动光学效应研究进展与思考(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(4): 108-124.
- [6] HAO Linding, SHI Heyi, YAO Xu, et al. Recent developments in the aero-optical effects of high-speed optical apertures: from transonic to high-supersonic flows [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2021, 127: 376-421.
- [7] SUN Xiwan, LIU Wei. Research progress of aero-optical effect [J]. Advances in Mechanics, 2020, 50: 202008.  
孙喜万, 刘伟. 气动光学效应研究进展[J]. 力学进展, 2020, 50: 202008.
- [8] LI Jianbin, YAN Bing, SUN Hongsheng, et al. Optical simulator research on aero-optics effects semi-physical simulation [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(S1): 139-142.  
李建彬, 严兵, 孙红胜, 等. 用于气动光学效应半实物仿真的光学模拟器技术[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(S1): 139-142.
- [9] JUMPER E J, ZENK M A, GORDEYEV S, et al. Airborne aero-optics laboratory [J]. Optical Engineering, 2013, 52(7): 071408.
- [10] CHRIS P, STANISLAV G, MIKE Z, et al. Flight measurements of aero-optical distortions from a flat-windowed turret [J]. AIAA Journal, 2013, 51(6): 1394-1404.
- [11] ZHENG Yonghui, SUN Huayan, ZHAO Yanzhong, et al. Fast aero-optical distortion simulation of the detection laser based on Zemax [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(S1): 80-85.  
郑勇辉, 孙华燕, 赵延仲, 等. 基于Zemax的探测激光气动光学畸变快速仿真[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(S1): 80-85.
- [12] WANG Lin, KONG Lingqin, ZHAO Yuejin, et al. Experimental research on simulation of supersonic aero-optic effects based on deformable mirror [J]. Optical Technoique, 2018, 44(1): 13-18.  
王琳, 孔令琴, 赵跃进, 等. 基于变形镜的气动光学效应仿真实验研究[J]. 光学技术, 2018, 44(1): 13-18.
- [13] LI Zhengwei, XIANG Wei, XU Baoshu, et al. Equivalent lens method in analysis of aero-optical transmission effects [J]. Infrared Technology, 2016, 38(6): 493-498.  
李征威, 向伟, 徐保树, 等. 一种分析气动光学传输效应的等效透镜方法[J]. 红外技术, 2016, 38(6): 493-498.
- [14] MENG Lixin, ZHAO Dingxuan, ZHANG Lizhong, et al. Boundary layer effect and compensation in airborne laser communication [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(12): 3231-3238.  
孟立新, 赵丁选, 张立中, 等. 机载激光通信中气动光学的影响及补偿[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3231-3238.
- [15] ZHANG Xiwen, ZHAO Shanghong, HOU Rui, et al. Influence of Focusing effect of boundary layer on the airborne laser communication performance under the high speed maneuvering condition [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2015, 16(2): 57-60.  
张曦文, 赵尚弘, 侯睿, 等. 高速机动下附面层聚焦效应对机载激光通信性能影响[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2015, 16(2): 57-60.
- [16] LV Qianqian. Phase retrieval based on SLM tunable-lens and transport of intensity equation [D]. Hefei: Anhui University, 2018.  
吕倩倩. 基于SLM变焦透镜的光强传输方程相位恢复[D]. 合肥: 安徽大学, 2018.
- [17] LIN Peiqiu, YING Chaofu, XU Zhanbin, et al. Implementation of controllable zoom lens based on phase-only liquid crystal spatial light modulator [J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(3): 376-380.  
林培秋, 应朝福, 徐展斌, 等. 基于纯位相液晶空间光调制器的可变焦透镜的实现[J]. 应用光学, 2010, 31(3): 376-380.
- [18] XI Jinyang. Laser spot detection and characteristic analysis based on image processing [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020.  
郗金洋. 基于图像处理的激光光斑检测与特性分析[D]. 长春: 长春理工大学, 2020.
- [19] CHEN Chunlu, ZHAO Wang, ZHAO Mengmeng. Sub-spot centroid extraction algorithm based on noise model transformation [J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(3): 111-121.  
陈春璐, 赵旺, 赵孟孟, 等. 基于噪声模型变换的子光斑质心提取方法[J]. 光学学报, 2023, 43(3): 111-121.
- [20] CAO Yuanjia, WEI Guangjun, LI Xianlong. Image processing and improvement of edge detection of laser spot [J]. Laser & Infrared, 2016, 46(9): 1160-1164.  
曹远佳, 尉广军, 李先龙. 激光光斑的图像处理及边缘检测的改进[J]. 激光与红外, 2016, 46(9): 1160-1164.
- [21] LIU Tong. Research on position extraction of laser spot [D]. Xian: University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences), 2018.  
刘童. 激光光斑位置提取技术研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2018.

## Boundary Layer Effect Simulation Based on Liquid Crystal Spatial Light Modulator

JING Gang<sup>1</sup>, LIU Zhi<sup>2</sup>, LIN Peng<sup>2</sup>, LIU Shutong<sup>3</sup>, JIANG Qingfang<sup>3</sup>

(1 School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(2 National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronic Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(3 School of Electronic Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** With the advancement of flight conditions for aerospace platforms, the impact of the boundary layer effect on space laser communication transmission is also growing. In order to reduce the influence of the boundary layer effect, corresponding correction methods must be studied. To provide verification conditions for the boundary layer effect correction system of laser communication on aerospace platforms, a simulator based on the Liquid Crystal Spatial Light Modulator (LC-SLM) was designed to simulate the boundary layer effect. This article first analyzes it from the perspective of geometric optics. It is assumed that the boundary layer is a thin layer (the inner and outer diameters are equal). The refractive index of the free flow is different from the refractive index of the boundary layer. Substituting them into the focal length formula of the lens makes it equivalent to a negative lens. Under different flight conditions, the focal length of the equivalent lens is different. Then use computer software to perform numerical analysis. Setting the wall curvature radius of the aerodynamic platform as 190 mm and the flight Mach number range as 0~5 Ma, in the case of troposphere (0~11 km), lower stratosphere (11~20 km), and upper stratosphere (20~32 km), the relationship curves are obtained between the Mach number, flight altitude, and the equivalent focal length of the negative lens representing the boundary layer effect. Research shows that as the Mach number increases, the equivalent focal length of the negative lens decreases, indicating a greater impact on the communication beam. Especially when the Mach number is small, the equivalent lens focal length changes more significantly with the Mach number. After that, the changes stabilized. In terms of flight altitude, the higher the flight altitude, the thinner the air and the lower the temperature, the boundary layer effect decreases accordingly until the equivalent lens focal length value approaches infinity, at which point it can basically be ignored.

Based on the above analysis, the following is an introduction to the boundary layer simulation equipment. The core device of this simulator is the LC-SLM. The phase modulation grayscale image is obtained from the phase distribution function of the lens. The grayscale information controls the applied voltage of the LC-SLM, thereby controlling the deflection of the liquid crystal molecules in the LC-SLM, thereby affecting the response to light phase modulation. Load phase grayscale images of different focal lengths into the LC-SLM to realize the function of the zoom lens, and change the focal length of the simulated zoom lens to simulate the boundary layer effect under different flight conditions of the aviation platform. Due to the LC-SLM modulation depth is not an ideal  $2\pi$ , and the relationship between the modulation depth and the loaded gray value is not an ideal mapping, the designed focal length value of the simulated zoom lens is inconsistent with the actual focal length value. Therefore, it is necessary to design and build an experimental platform to verify the accuracy of its simulation. This experiment uses a 1 550 nm laser as the light source, and emits parallel light after passing through the collimated beam expansion system. Since LC-SLM can only modulate linearly polarized light, a polarizer is added in front, and then enters the LC-SLM. The phase grayscale images of the lens focal lengths corresponding to the ten types of boundary layer effects in flight states are loaded into the LC-SLM respectively, and finally an infrared camera is used to receive and collect light spots at a close distance. There is a lot of noise in the original spot image, which will affect the accuracy of the spot size analysis. Therefore, the obtained original spot image is sequentially subjected to brightness adjustment, median filtering, threshold segmentation, morphological processing and edge coordinate extraction, and Hough transform circle fitting is used to obtain the spot centroid position and spot radius. Due to limitations of computer memory and computing power, the calculation accuracy is 0.05 pixel values. Then make an error line chart between the actual spot

radius value of these ten sets of data and the theoretically calculated spot radius value. The calculated root mean square error is 0.043 75. This experiment verified the feasibility and effectiveness of the proposed boundary layer simulation method.

**Key words:** Optical communication; Boundary layer effect; Spot analysis; Liquid crystal spatial light modulator; Liquid crystal zoom lens; Simulator

**OCIS Codes:** 230.6120; 260.1180; 060.5060; 100.2000