

文章编号 1004-924X(2014)12-3231-08

## 机载激光通信中气动光学的影响及补偿

孟立新<sup>1,2\*</sup>, 赵丁选<sup>1</sup>, 张立中<sup>2</sup>, 姜会林<sup>2</sup>

(1. 吉林大学 机械科学与工程学院, 长春 吉林 130012;

2. 长春理工大学 空地激光通信技术国防重点学科实验室, 长春 吉林 130022)

**摘要:**为了抑制机载激光通信中大气附面层引起的散斑现象,开展了气动光学效应及相应补偿方法的研究。从理论上分析了气动光学效应对光传输的影响;根据试验飞机型号和设备安装位置,对光学窗口形状、厚度等参数进行了优化设计,并对窗口变形和空气流场分布进行了仿真分析,完成了光学窗口改造。最后,根据试验中大气附面层引起的接收光斑离焦现象,进行了光学仿真,研制了 3 种焦距的补偿镜。在飞行距离为 10~140 km,飞行高度为 1 500~4 500 m 条件下进行了飞行试验,对不同补偿镜的补偿效果进行了分析。结果显示,在接收光路中增加焦距为  $5.5 \times 10^5$  m 的凸透镜后,接收光斑离焦现象得到了抑制,接收光功率闪烁方差减小了 1/3,表明经过补偿后的光学窗口可有效抑制大气附面层对激光通信的影响。

**关键词:**机载激光通信;气动光学;大气附面层;光学窗口;补偿镜

**中图分类号:** TN929.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142212.3231

## Boundary layer effect and compensation in airborne laser communication

MENG Li-xin<sup>1,2\*</sup>, ZHAO Ding-xuan<sup>1</sup>, ZHANG Li-zhong<sup>2</sup>, JIANG Hui-lin<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012, China;

2. Fundamental Science in Space-Ground Laser Communication Technology Laboratory,  
Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

\* Corresponding author, E-mail: mengcust@163.com

**Abstract:** To reduce the speckle phenomenon caused by atmospheric boundary layer on an optical window in airborne laser communication, the aero-optics effect and corresponding suppression method for the atmospheric boundary layer were discussed. Based on the type of experimental airplane and the position of equipment installation, the parameters of shape, thickness of the optical window were designed optimally, and the deformation of optical window and air flow field distribution were analyzed in the simulation and the optical window was improved. Finally, a series of compensating glasses were developed to solve defocusing of the receiving spot caused by the atmospheric boundary layer. A flight experiment was performed at the flight distance of 10—140 km and the flight altitude of 1 500—4 500 m and the compensation results were analyzed. The results show when the compensating glass with fi-

收稿日期:2014-09-22;修订日期:2014-11-14.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2012AA0042)

nal focal length of  $5.5 \times 10^5$  m is added into the receiving optical path, the atmospheric boundary layer is actively restrained by compensated optical window, the shape of receiving spot is improved and the receiving power distribution variance is reduced by 1/3. These results mean that the window after compensation reduces the effect of atmospheric boundary layer on laser communication effectively.

**Key words:** airborne laser communication; aero-optics; atmospheric boundary layer; optical window; compensating glass

## 1 引言

无线激光通信具有通信速率高、保密性好和轻便灵活等优点<sup>[1]</sup>。作为无线激光通信网络中的重要通信节点,飞机平台具有较大的通视范围,可以有效提高激光通信的可通性和适用范围。1996年美国 Thermo Trex 公司开展了飞机与地面间激光通信演示验证试验,采用 T39 飞机,通信速率为 622 Mbps,通信距离为 20~30 km<sup>[1]</sup>。2006年,法国国防采办局与欧洲航空防务与空间公司合作,开展了飞机与卫星间的激光通信试验,第一次实现了地球同步卫星与飞机间激光通信,通信双方为神秘 20 飞机和 ARTEMIS 卫星,通信距离为 40 000 km,飞机飞行高度为 9 km,通信速率为 50 Mbps<sup>[2]</sup>。2011 年美国 ITT 公司与美国空军研究实验室(AFRL)开展了飞机间激光通信试验,试验采用 DC-3 飞机,最远通信距离为 132 km<sup>[3]</sup>。可见,机载激光通信已经越来越多地受到各国的重视。

但是随着飞行速度的提高,气动光学效应对激光传输的影响越来越大,成为了制约远场接收光斑形状的主要因素之一。国外从 20 世纪 70 年代开始,开展了气动光学效应对激光传输影响研究,早期多集中在 10.6  $\mu\text{m}$  波段,随着半导体激光器的发展,气动光学对波长为 1~1.5  $\mu\text{m}$  激光传输的影响得到重视。目前,国内外关于气动光学对光传输的影响大多数为计算机仿真或采用风洞进行半实物仿真<sup>[4~7]</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 Notre Dame 大学机载气动光学实验室(Airborne Aero-optics Laboratory, AAOL)开展的跨音速平面窗口转台气动光学试验。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>[8-9]</sup>。

由于机载激光通信通信光束散角较小,系统

跟踪精度为微弧度量级<sup>[10-11]</sup>,气动光学效应引起远场接收端光斑形状变化,降低了激光通信跟踪系统精度,还会引起接收光功率闪烁方差加大,减小了通信系统阈值范围,增大了通信误码率。此外,开展气动光学对激光传输影响研究,还可对目前理论与仿真研究进行验证,为流体控制和自适应光学研究提供参考,因此,本文开展了气动光学影响及补偿方法研究,分析了气动光学效应对光传输的影响,并对光学参数进行了优化设计,完成了窗口改造,补偿后的光学窗口可有效抑制大气附面层的影响。

## 2 气动光学对激光通信窗口的影响

高速运动空气对激光通信窗口的影响主要有两个方面<sup>[4-5]</sup>,一是在窗口表面产生压缩效应和黏滞效应,压缩效应使窗口产生压差而导致物理变形,黏滞效应引起窗口温度变化;二是气动光学效应,该效应会改变空气折射率,进而影响激光通信性能。光学窗口外空气光学折射率的变化会引起光束到达接收平面的光强振幅和相位发生改变。光场数值求解常使用 Sutton 方法,将空气流场分为层流和湍流两种形式分别分析。层流是由飞行时飞机表面平均空气密度的空间不均匀分布引起的,流场特征尺寸较大,对光学系统的影响形式主要是倾斜和离焦、像散等低阶效应,需要采取校正措施。湍流效应是由飞机表面湍流层内空气密度的随机涨落引起的,多发生在飞机表面尺寸形状变化处,特征尺寸较小,随机性较大<sup>[5-6]</sup>,通过对外形优化,在很多情况下作为系统误差不予考虑。

### 2.1 层流对光传输的影响

根据气体密度场  $\rho$ ,利用气体折射率的 Gladstone-dale 定律,气体的折射率场可表示为  $N=1+K_{\text{GD}}\rho$ ,其中  $K_{\text{GD}}$  为气体的 Gladstone-dale 系数<sup>[11-12]</sup>。由光线追迹法得到的光程差(OPD<sub>i</sub>)为

$OPD_i = \int_0^L n_i dl$ , 式中  $L$  为窗口层流流场厚度,  $n_i$  为第  $i$  条光线经过气体的折射率场, 光程差由当地光程减去平均光程得到。

### 2.2 湍流对光学窗口的影响

湍流对光学窗口的影响是随机的, 所造成的降晰效应是时间的强函数<sup>[5]</sup>。由于湍流影响较为复杂, 对其影响分析主要采用统计理论, 按统计场论, 由脉动流引起的相位相关函数为:

$$C_\phi(x, y) = K_{GD} \cdot k^2 \cdot \int_0^D \int_{-z}^D \rho'^2(x, y, z') \cdot C(x, y, z) dz dz', \quad (1)$$

式中:  $D$  为窗口湍流层厚度,  $k$  为空间波数,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $C(x, y, z)$  为湍流密度相关系数, 常用的为高

斯型  $C(x, y, z) = \exp\left[-\left(\frac{x^2}{l_x^2} + \frac{y^2}{l_y^2} + \frac{z^2}{l_z^2}\right)\right]$ , 其中  $l_x, l_y, l_z$  分别为  $x, y, z$  方向的密度相关长度。经湍流层后的光程差为:

$$OPD_{TF}(x, y) = F(\{r(x, y) \cdot [P_\phi(x, y)]^{1/2}\}) / k, \quad (2)$$

式中:  $r(x, y)$  为均值为 0, 方差为 1 的正态分布的随机数,  $P_\phi(x, y)$  可由相位相关函数的傅里叶逆变换得到, 即  $P_\phi(x, y) = F^{-1}(C_\phi(x, y))$ 。

### 2.3 附面层对激光传输影响评价

常见的评价成像质量的方法有波相差、点扩散函数、调制传递函数、strehl 比以及目标图像的失真度等<sup>[4,6]</sup>。对于机载激光通信系统, 评价附面层最直接的方法是通过激光通信机上光斑能量的变化来评价。

strehl 比又称中心点亮度判据, 设有像差传输后的中心光强为  $I$ , 理想状态下, 艾里斑中心强度为  $I_0$ , 则 strehl 比为:

$$SR = \frac{I}{I_0} \exp(-k\sigma^2) = \exp(-[2\pi \frac{OPD_{rms}}{\lambda}]^2), \quad (3)$$

其中:  $OPD_{rms} = \left\{ \frac{1}{N_i=1} \sum (OPD_i - \frac{1}{N_j=1} \sum OPD_j)^2 \right\}^{1/2}$ 。

## 3 窗口设计

根据理论分析可以看出, 飞机在高速飞行时, 附面层引起通信光光程变化, 导致到达接收端的 strehl 比发生变化, 影响激光通信效果。从附面

层中层流和湍流的产生机理可知, 要想提高通信效果, 需要对附面层引起的气动光学效应进行补偿。由于湍流引起光程差变化具有随机性, 不利于补偿<sup>[15~18]</sup>, 因此, 应对窗口进行优化设计, 减小窗口附近形状突变, 改善窗口附近空气流场, 减小湍流影响。

### 3.1 机载激光通信窗口形状与位置

机载激光通信采用固定翼飞机, 最大飞行高度为 6 000 m, 飞行速度为 0.3Ma。机载激光通信端机的安装位置主要受以下两方面限制, 首先必须满足通信光通视要求, 其次飞行过程中气流分布影响小。采用计算流体力学软件 CFD 对飞机整体气流分布进行仿真<sup>[12~14]</sup>, 结果如图 1 所示。

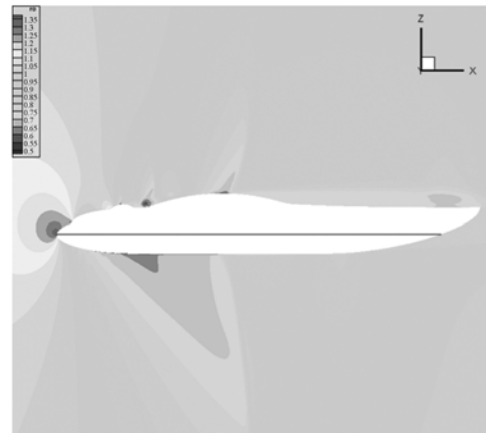


图 1 飞机表面密度场仿真分析

Fig. 1 Simulation analysis of density field of aircraft surface

由图 1 可知, 飞机后侧气流较前侧稳定, 因此光端机的安装位置选择飞机后侧, 此外, 考虑不改变飞机外形, 减小流场突变, 最终将激光通信端机安装在飞机内部, 通信窗口采用飞机侧窗改造, 具体位置如图 2 所示。



图 2 激光通信窗口位置与设备安装位置

Fig. 2 Window position and installation location of laser communication terminal

飞机窗口位于机翼后侧下方,可以满足激光通信通视需要(试验角度为 $\pm 15^\circ$ ),且只需将飞机原有窗户进行改装,对飞机改动量小。原有窗口形状为 $610\text{ mm}\times 465\text{ mm}$ 方形,光学窗口为 $\varphi 480\text{ mm}$ 的圆形,采用过渡法兰方式安装,过渡法兰采用平滑设计,具体结构如图 3 所示。

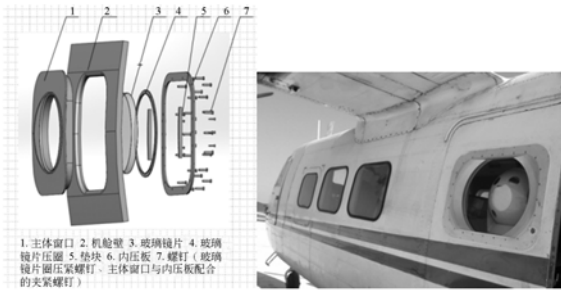


图 3 窗口结构设计图  
Fig. 3 Window structure design

### 3.2 窗口附面层影响仿真

法兰形状平滑后窗口外流场分布如图 4 所示。

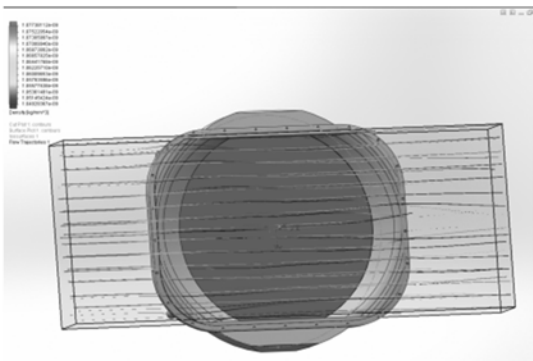


图 4 窗口气体流动轨迹  
Fig. 4 Gas flow path over window

从图 4 可以看出,对法兰形状圆滑后,气流分布以层流为主。此时主光轴线上气流分布密度如图 5 所示。可以看出,窗口外空气密度变化不大,最大值为 $1.066\text{ kg/m}^3$ ,最小值为 $1.0385\text{ kg/m}^3$ 。通过仿真分析,距离窗口 $150\text{ mm}$ 外,空气密度与自然来流空气密度基本一致,对窗口前方 $150\text{ mm}$ 内空气密度进行积分,得到空气密度分布如图 6 所示。

通信光与粗跟踪均采用 $1550\text{ nm}$ 波长激光,根据密度与光程差的转换关系,得到空气流动引起均方根光程差 $OPD_{\text{rms}}$ 为 $127.569\text{ nm}$ ,由此引

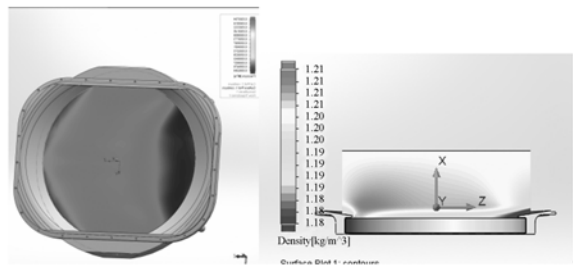


图 5 玻璃上气流密度分布  
Fig. 5 Gas density distribution outside window

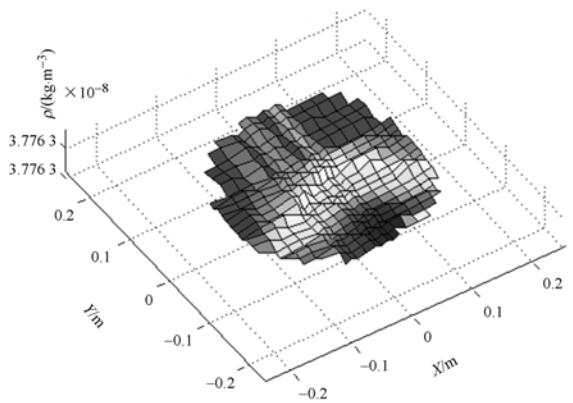


图 6 窗口前方 $150\text{ mm}$ 内气流密度分布  
Fig. 6 Gas density distribution in front of window within  $150\text{ mm}$

起的 $\text{strehl}$ 比为 $0.765$ ,由于光传输经过 $2$ 次光学窗口,因此,接收端总 $\text{strehl}$ 比为 $0.58$ 。

### 3.3 机载激光通信机窗口厚度设计

窗口厚度主要受力学和热光学性能限制<sup>[19]</sup>。在飞行过程中,舱内不保压,此时由于空气流动,引起的窗口压力变化如图 7 所示。

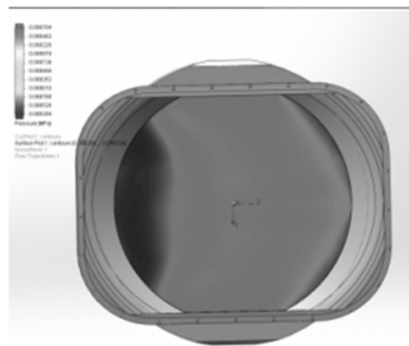


图 7 空气流动引起的窗口处压力  
Fig. 7 Press on window caused by air flow

沿飞行方向,窗口玻璃压力先减小,后增大,

压力为  $-1\ 586\sim 834\ \text{Pa}$ 。根据力与变形的关系,在压力不变情况下,窗口最大变形随厚度增加而减小,因此,增加厚度对减小压力引起的变形有利。在波长一定的条件下,光学玻璃折射率随温度  $t_1$  的变化值为:

$$n_1 = 1.000\ 272 n_0 + \alpha(t_1 - 20), \quad (4)$$

式中:  $n_0$  为  $20\ ^\circ\text{C}$  时玻璃材料的相对折射率,  $\alpha$  为玻璃材料的折射率温度变化率。玻璃厚度与温度  $t_1$  的关系为:

$$L_1 = L_0 [1 + \beta(t_1 - 20)], \quad (5)$$

式中:  $L_0$  为玻璃窗口  $20\ ^\circ\text{C}$  时的厚度,  $\beta$  为玻璃材料的线胀系数。玻璃窗口为薄板结构,当采用线胀系数小的材料且周边约束为无应力密封时,可以忽略径向和周向热膨胀,仅考虑轴向膨胀的影响,所以光学窗口因温度变化带来的光程差影响可以表示为  $OPD_t = n_1 L_1 - n_0 L_0$ ,从式(5)可以看出,光程差除了和温度分布有关外,还与玻璃厚度有关,玻璃越厚,光程差越大。光学窗口上各点的温度分布如图 8 所示。

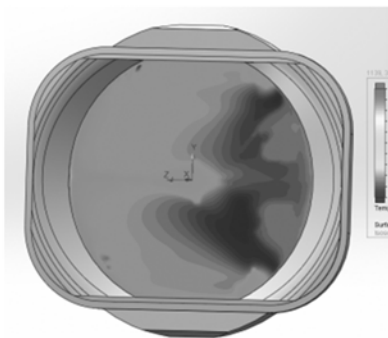


图 8 窗口玻璃表面温度分布

Fig. 8 Press distribution on the face of window

此时窗口最低温度为  $2.85\ ^\circ\text{C}$ ,最高温度为  $3.77\ ^\circ\text{C}$ 。在温度一定的条件下,要减小光程差,需要减小玻璃厚度。综合热光学和力学分析,窗口玻璃厚度定为  $40\ \text{mm}$ ,此时窗口最大变形差为  $1.2\ \mu\text{m}$ ,且在玻璃两端,引起的光偏转最大约为  $2.5\ \mu\text{rad}$ ,相对于通信光束散角可忽略。

### 4 试 验

两架飞机平行飞行,在未加补偿措施时,接收光斑模式如图 9 所示。接收光斑处于典型的离焦状态,通过对比空中和地面间光斑模式的变化,初

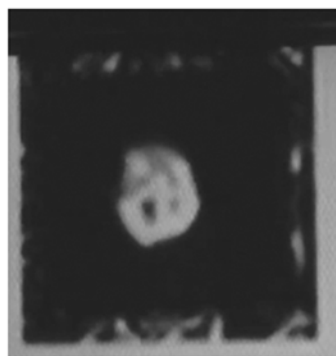


图 9 未加补偿措施时接收光斑形状

Fig. 9 Spot shape unapplied compensation measures

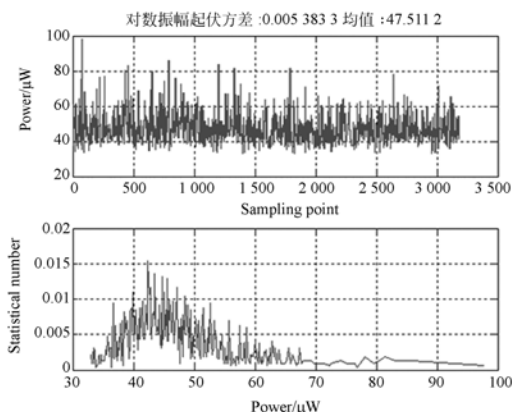


图 10 补偿前通信光接收光功率分布

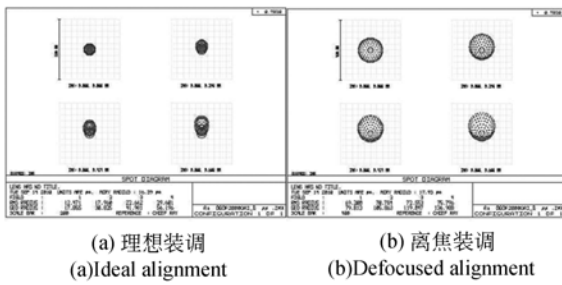
Fig. 10 Spot shape applied compensation measures

步判断产生该现象的因素为空气气压、温度和飞行速度。飞机的飞行高度由  $1\ 500\ \text{m}$  提高到  $4\ 500\ \text{m}$ ,对不同飞行高度下光斑模式和通信光接收能量分布进行试验,结果表明,光斑模式和接收能量分布随飞行高度变化不明显。因此可以判断,飞行高度引起气压和温度变化对光斑模式变化影响不大,为非主要因素,速度引起附面层变化为主要因素。

接收光斑弥散角  $\theta_\beta$  与光学系统衍射极限角

$$\theta_d \text{ 的关系为 } \theta_\beta = \frac{\theta_d}{(\text{SR})^{1/2}}, \text{ 其中 } \theta_d = 2.44\lambda/D, D$$

为光学系统口径<sup>[1,12,13]</sup>。因此,通过光斑弥散角可以判断由大气引起的 strehl 比变化约为  $0.3$ ,略小于仿真结果,这主要是由于仿真时只考虑了窗口附近空气密度变化引起的气动光学效应。在实验室内光斑接近艾利斑,对离焦量进行仿真,如图 11 所示,引起该量级光斑弥散且中心空洞等效于前端附加了  $-1\times 10^6\ \text{m}$  焦距透镜。



(a) 理想装调 (a) Ideal alignment  
(b) 离焦装调 (b) Defocused alignment

图 11 精跟踪离焦前后仿真对比图

Fig. 11 Simulation comparison between focus and defocus of fine tracking system

根据仿真结果,采用 2 个曲率为  $5 \times 10^5$  m 的平凸透镜可对  $-1 \times 10^6$  m 附加透镜效应进行有效补偿。由于激光通信端机本身不具备自动调焦功能,后设计补偿镜安装在光端机主光学天线内,采用定焦透镜方式,同时考虑加工装调误差,离焦量会和理论值有一定差距,采用 3 组透镜进行试验验证。

为保证试验具有可比性,在同一飞行架次内,通信双方通过更换补偿透镜,对补偿效果进行验证,降低天气对试验效果的影响,每更换一次补偿透镜,飞行距离均从 10 km 增加到 140 km,飞行速度不变。通过观察精跟踪相机上光斑形状和接收光功率分布对比补偿镜的补偿效果。试验共完成 3 个飞行架次,试验效果基本一致。图 12 为精跟踪相机内观察到的不同焦距补偿镜对光斑闪烁抑制效果。

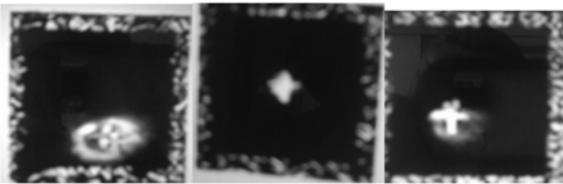


图 12 增加一系列补偿透镜后的光斑形状

Fig. 12 Spot shape increased compensation lens

## 参考文献:

- [1] 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.  
JIANG H L, TONG SH F. *The Technologies and Systems of Space Laser Communication*[M]. Bei-

从图 12 中可以看出,采用焦距为  $6.5 \times 10^5$  m 的平凸透镜进行补偿,光斑处于欠补偿状态;采用焦距为  $4.5 \times 10^5$  m 的平凸透镜进行补偿,光斑处于过补偿状态;采用焦距为  $5.5 \times 10^5$  m 的平凸透镜后,补偿效果接近理想光斑形状,与仿真分析基本一致。

在试验距离和通信接收总功率基本一致时,采用焦距为  $5.5 \times 10^5$  m 的补偿透镜后,接收功率起伏方差较未加补偿镜时减小了约 1/3,补偿效果明显。补偿后通信光接收光功率分布如图 13 所示。

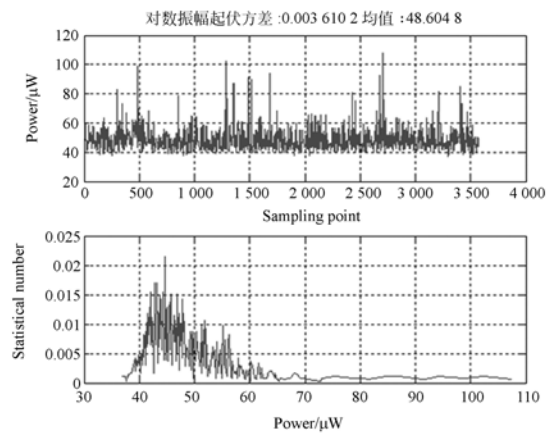


图 13 补偿后通信光接收光功率分布

Fig. 13 Reserved communication light power distribution after compensation

## 5 结 论

本文对不同补偿镜的试验效果进行了分析,结果表明:通信双方经焦距为  $5.5 \times 10^5$  m 的凸透镜补偿后,接收光斑离焦现象得到抑制,接收光功率闪烁方差减小了 1/3 左右,有效抑制了大气附面层的影响。本次试验也为以后机载激光通信系统设计提供了参考,即可在光机设计中增加微调焦机构来对附面层引起的离焦进行实时调节。

jing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese)

- [2] 吴从均,颜昌翔,高志良. 空间激光通信发展概述[J]. 中国光学,2013,6(5):670-680.  
WU C J, YAN CH X, GAO ZH L. Overview of space laser communication [J]. *Chinese Optics*,

- 2013, 6(5):670-680. (in Chinese)
- [3] 张来线,孙华燕,樊桂花,等. 猫眼逆向调制自由空间激光通信技术的研究进展[J]. 中国光学,2013,6(5):681-691.  
ZHANG L X, SUN H Y, FAN G H, *et al.*. Progress in free space optical communication technology based on cat-eye modulating retro-reflector [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5):681-691. (in Chinese)
- [4] 韩成,杨华民,佟首峰,等. 大气附面层对空地激光通信链路影响的研究与仿真[J]. 红外与激光工程,2006,35, 358-362.  
HAN CH, YANG H M, TONG SH F, *et al.*. Study and simulation of air boundary layer's influence on laser communication link between space and land [J]. *Infrared and laser engineering (Supp)*, 2006, 35:358-362. (in Chinese)
- [5] 殷兴良. 气动光学原理[M]. 北京:中国宇航出版社,2003,169-172.  
YIN X L. *Aero-optical Principle* [M]. Beijing: China Astronautics Publishing House, 2003, 169-172. (in Chinese)
- [6] 范志刚,张亚萍. 气动热环境下高速飞行器光学窗口光传输数值仿真研究[J]. 红外与毫米波学报,2007,26(5),396-400.  
FAN ZH G, ZHANG Y P. Numerical simulation of optical transmission through high speed aircraft optical window in aero-dynamic thermal environment [J]. *Infrared Mille Waves*, 2007, 26(5), 396-400. (in Chinese)
- [7] 李延伟,张洪文,远国勤,等. 高空分段拼装式光学窗口防护装置的设计[J]. 光学精密工程,2014,22(3): 664-669.  
LI Y W, ZHANG H W, YUAN G Q, *et al.*. Design of protector for altitude sub-assembled optical window [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(3): 664-669. (in Chinese)
- [8] CHRIS P, STANISLAV G, MIKE Z, *et al.*. Flight measurements of aero-optical distortions from a flat-windowed turret on the Airborne Aero-Optics Laboratory (AAOL) [J]. *42th AIAA Plasma dynamic and Lasers Conference*, 2011, 3280-3298.
- [9] CHRIS P, STANISLAV G, MIKE Z, *et al.*. Flight measurements of aero-optical environment around a flat-windowed turret [J]. *AIAA Journal*, 2013, 1394-1404.
- [10] 黄健,张鹏,邓科,等. 星地相干激光通信中的自适应光学系统边界参数设计[J]. 光学精密工程,2014,22(5): 1204-1211.  
HUANG J, ZHANG P, DENG K, *et al.*. Boundary parameters of adaptive optical system in satellite to ground coherent laser communication system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5): 1204-1211. (in Chinese)
- [11] 金光,李艳杰,钟兴,等. 空间成像与激光通信共口径光学系统设计[J]. 光学精密工程,2014,22(8): 2067-2074.  
JIN G, LI Y J, ZHONG X, *et al.*. Design of co-aperture optical system for space imaging and laser communication [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8): 2067-2074. (in Chinese)
- [12] 陈澄,费锦东. 侧窗头罩高速层流流场光学传输效应数值模拟[J]. 红外与激光工程,2005,34(5)  
CHEN CH, FEI J D. Numerical simulation on the optical transmission distortions throughout the laminar flow field [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 35(5):548-552. (in Chinese)
- [13] WICKHAM C M, SMITS A J. Aero-optic distortion in transonic and hypersonic turbulent boundary layers [J]. *AIAA Journal*, 2009, 47(9):2158-2168.
- [14] SMITH A E, GORDEYEV S, JUMPER E. Recent measurements of aero-optical effects caused by subsonic boundary layers [J]. *Journal of Optical Engineering*, 2013, 52(7):1404-1410.
- [15] GORDEYEV S, JUMPER E J. Fluid dynamics and aero-optics of turrets [N]. *Aerospace Sci.*, 2010, 46:388-400.
- [16] GORDEYEV S, HAYDEN T, JUMPER E. Aero-Optical and flow measurements over a flat-windowed turret [J]. *AIAA Journal*, 2007, 45(2): 347-357.
- [17] FITXZGERALD E J, JUMPER E J. The optical distortion mechanism in a nearly incompressible free shear layer [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2004, 512:153-189.

- [18] CRESS J A, GORDEYEV S, POST M L, *et al.*. Aero-optical measurements in a turbulent subsonic boundary layer at different elevation angles [J]. AIAA, 2008, 4214.
- [19] 黎明, 吴清文, 余飞. 基于热光学分析的窗口玻璃厚度的优化[J]. 光学学报, 2010, 30(1), 210-214.
- LI M, WU Q W, YU F. Optimization of optical window glass thickness based on the thermal optical analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(1), 210-214. (in Chinese)

**作者简介:**

孟立新(1981—),男,河南商丘人,博士研究生,助理研究员,2006年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事激光通信捕获、跟踪方面的研究。E-mail: mengcust@163.com

**导师简介:**

赵丁选(1965—),男,河南濮阳人,教育部长江学者特聘教授,博士生导师,1992年在吉林工业大学(现吉林大学)获得博士学位,主要研究方向为复杂机械系统动力学及仿真,工程车辆自动变速与节能控制、路面谱制取与重现,工程机器人。E-mail: zdx@jlu.edu.cn

(本栏目编辑:曹 金)

(版权所有 未经许可 不得转载)