

基于 3×3 光学矩阵的微透镜阵列激光通信光学系统设计

安岩^{1,2*}, 董科研^{1,2}, 李响^{1,2}, 江伦^{1,2}, 高亮^{1,2}

¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

²长春理工大学国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022

摘要 基于微透镜阵列形式设计了新型大视场激光通信接收光学系统,并提出了完整描述微透镜阵列光传输的 3×3 光学矩阵模型,讨论了各光学元件倾斜角度和偏心对像面高度和出射角度的影响规律。针对微透镜阵列光学系统形式的设计要求,给出了合理的倾斜角度和偏心的公差范围,在完成积分透镜光学系统像差讨论的基础上,采用设计和仿真相结合的方式实现了大视场激光通信接收光学系统设计,并验证了三维矩阵模型的正确性。通过样机研制、匀光测试和视场测试,最终实现了视场角达 0.9° 、均匀性达 86.58% 的新型激光通信接收光学系统,实验测试数据与理论仿真数据相吻合。关于激光通信链路方面的讨论分析进一步证明了微透镜阵列光学系统应用在激光通信系统中的可行性和优越性,为激光通信接收光学系统的设计和研制提供了新思路和新方向。

关键词 光通信; 微透镜阵列; 3×3 光学矩阵; 光束匀化; 链路能量

中图分类号 O435

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2206003

Design of Laser Communication Optical System with Microlens Array Based on 3×3 Optical Matrix

An Yan^{1,2*}, Dong Keyan^{1,2}, Li Xiang^{1,2}, Jiang Lun^{1,2}, Gao Liang^{1,2}

¹School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

²National and Local Joint Engineering Research Center, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract Based on the form of the microlens array, a new type of large-field laser communication receiving optical system is designed, and a 3×3 optical matrix model that completely describes the light transmission in the microlens array is proposed. The influences of the tilt angle and lateral shift of each optical element on the image plane height and exit angle are discussed. According to the design requirements of the microlens array optical system, reasonable tolerance ranges of the tilt angle and lateral shift are proposed. Based on the discussion of the aberration of the integral lens optical system, the combining of the optical design and the optical simulation can be used to realize the design of a large field of view laser communication optical system. The correctness of the 3D optical matrix model is also verified. Through the prototype development, uniform light test, and field of view test, a new type of laser communication receiving optical system with field of view of 0.9° and uniformity of 86.58% is finally realized. The results show that the experimental test data is consistent with the theoretical simulation data. The feasibility and superiority of the application of the microlens array optical system in a laser communication system are further proved by the discussion and analysis on the laser communication link, which provides a new idea and new direction for the design and development of laser communication receiving optical systems.

Key words optical communications; microlens array; 3×3 optical matrix; beam homogenization; link energy

OCIS codes 060.2605; 200.2605; 080.2730

收稿日期: 2020-06-01; 修回日期: 2020-07-19; 录用日期: 2020-08-03

基金项目: 长春市科技局地院合作专项(18DY016)

* E-mail: anyan_7@126.com

1 引 言

无线激光通信作为未来天地一体化网络的重要分支,具有举足轻重的作用^[1-3]。接收光学系统是激光通信系统中重要的组成部分,大视场接收设计的主要优势体现在缩短建链时间、提高系统稳定性和提高跟踪效率等方面^[4-5]。目前,已经出现了各种各样的大视场激光通信系统,Takahashi 和 Arimoto^[6]采用离轴自由曲面反射镜完成了紧凑型光学天线设计,Arimoto 等^[7-8]采用开普勒式望远镜天线结构研制了激光通信终端;Deng 等^[9]提出了基于鱼眼和离轴折反结构组合形式的大视场激光通信接收光学系统。以上设计中均采用了精密跟踪机制,该机制除了可实现 APT(acquisition, pointing, and tracking)功能之外,还可用于抑制高斯能量分布的光斑与探测器之间的适配损耗。相比于像面光斑的高斯能量分布情况,匀化光斑的像面能量分布更均匀,在一定程度上可以降低光斑边缘与探测器的适配损耗^[10]。

微透镜阵列(MLA)作为一种重要的光学匀光元件,广泛应用于各种领域^[11-13]。基于微透镜阵列的数学模型也成为人们研究的热点方向之一^[14-18]。各种新颖的微透镜阵列解析模型也不断被提出,如2015年,Wang 等^[19]利用非近轴光线追迹的方法,建立了光束强度分布和高度分布的关系,并指出积分透镜的像差也是影响均匀性的重要因素。2016年,Jin 等^[20]提出以光束空间能量特性为光束匀化基准进行优化的方法,指出光束匀光效果受三轴倾

斜的影响严重,其会导致原子透镜的光线溢出到相邻子透镜。2017年,Cao 等^[21]从表面轮廓误差方面讨论分析了微透镜阵列的匀光性能,估计了微透镜阵列表面轮廓面型偏差带来的光束匀化误差。2019年,Jolly 等^[22]通过在微透镜阵列光学系统中加入第三微柱镜阵列实现了再成像系统,并指出两微透镜阵列的横向位移偏差与距离、焦距之比的最小变化率相关。

微透镜阵列建模设计中的误差分析逐渐成为了重要的考虑对象,而倾斜角度和偏心对像面高度和出射角度的作用规律及对匀光效果的影响尚未见讨论分析。基于此,本文建立了描述微透镜阵列光传输模型的 3×3 光学矩阵,讨论了倾斜角度和偏心对像面光斑和出射角度的影响规律,并提出了合理的公差范围。通过光学设计和仿真,本研究实现了微透镜阵列光学系统的设计和公差验证,完成了样机研制,并对像面光斑的均匀性进行了测试,进一步讨论了微透镜阵列光学系统的通信链路情况,论证了该系统应用在激光通信中的可行性。

2 3×3 光学矩阵模型

微透镜阵列光学系统主要基于著名的 Kohler 照明原理,如图 1 所示。第一个微透镜阵列将入射光束分割成大量的子光束,子光束的像经第二个微透镜阵列与积分透镜后重叠在傅里叶焦面,光束的匀化通过光束积分的方法实现,微透镜阵列光学系统是良好匀光效果的选择之一。

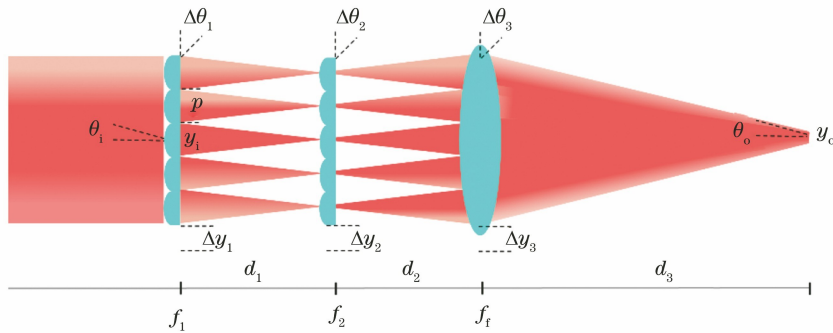


图 1 微透镜阵列匀光原理图

Fig. 1 Schematic diagram of homogenization of light by microlens array

由图 1 可知, y_i 和 θ_i 分别是光束的入射高度和入射角度, y_o 和 θ_o 分别是傅里叶焦面位置的像面高度和出射角度, $\Delta\theta_1$ 和 Δy_1 分别为第一个微透镜阵列的倾斜角度和偏心, $\Delta\theta_2$ 和 Δy_2 分别为第二个微透镜阵列的倾斜角度和偏心, $\Delta\theta_3$ 和 Δy_3 分别为积分透镜的倾斜角度和偏心, f_1 为第一个微透镜阵

列的焦距, f_2 为第二个微透镜阵列的焦距, f_i 为积分透镜的焦距, d_1 为第一个微透镜阵列和第二个微透镜阵列的间距, d_2 为第二个微透镜阵列和积分透镜的间距, d_3 为积分透镜和傅里叶焦面的间距, p 为微透镜阵列中的单个子透镜口径。近轴光学矩阵理论以光线高度 y 和光线角度 θ 的矩阵形式描述光

线的自由空间传播,同时,在近轴近似中需要满足 $\sin \theta \approx \tan \theta \approx \theta$ 和 $\cos \theta \approx 1$ 。针对倾斜角度 $\Delta\theta$ 和偏心 Δy 等因素,需要引入 3×3 光学矩阵理

论^[23-24],明确描述带有倾斜和偏心的矩阵是建模第一步,其中,两个微透镜阵列的子焦距矩阵 \mathbf{M}_1 、 \mathbf{M}_2 和积分透镜的焦距矩阵 \mathbf{M}_3 分别为

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta y_1 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 & \Delta\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta y_2 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 & \Delta\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{M}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta y_3 \\ -\frac{1}{f_f} & 1 & \Delta\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。 \quad (1)$$

两个微透镜阵列的距离矩阵 \mathbf{D}_1 、 \mathbf{D}_2 和积分透镜的距离矩阵 \mathbf{D}_3 分别为

$$\mathbf{D}_1 = \begin{bmatrix} 1 & d_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{D}_2 = \begin{bmatrix} 1 & d_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{D}_3 = \begin{bmatrix} 1 & d_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。 \quad (2)$$

入射光束矢量 \mathbf{V}_{in} 和出射光束矢量 \mathbf{V}_o 可以表示为

$$\mathbf{V}_{in} = \begin{bmatrix} y_i \\ \theta_i \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{V}_o = \begin{bmatrix} y_o \\ \theta_o \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{V}_s = \begin{bmatrix} np \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: \mathbf{V}_s 为第 n 个微透镜阵列的距离矢量。像面出射光束矢量的计算公式为^[22,25]

$$\mathbf{V}_o = \mathbf{D}_3 \cdot \mathbf{M}_3 \cdot \mathbf{D}_2 \cdot [\mathbf{V}_s + \mathbf{M}_2 \cdot \mathbf{D}_1 \cdot \mathbf{M}_2 \cdot \mathbf{V}_{in}]。 \quad (4)$$

将(1)~(3)式代入(4)式进行运算。一般情况下,两个微透镜阵列的子透镜焦距相同,即 $f_1 = f_2 = f$,同时,令两个微透镜阵列的间隔 d_1 与焦距 f 相同,即 $d_1 = f_1 = f_2 = f$,则通过化简得到:

$$\begin{bmatrix} y_o \\ \theta_o \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(1 - \frac{d_3}{f_f}\right) \left[f(\theta_1 + \Delta\theta_1) + \Delta y_1 + \Delta y_2 + \Delta y_3 - np + d_2 \left(\Delta\theta_2 - \frac{y_1 + \Delta y_1}{f} \right) \right] + d_3 \left(\Delta\theta_2 + \Delta\theta_3 - \frac{y_1 + \Delta y_1}{f} \right) \\ \frac{1}{f_f} \left[f(\theta_1 + \Delta\theta_1) + \Delta y_1 + \Delta y_2 - np + d_2 \left(\Delta\theta_2 - \frac{y_1 + \Delta y_1}{f} \right) \right] + \Delta\theta_2 + \Delta\theta_3 - \frac{y_1 + \Delta y_1}{f} \\ 1 \end{bmatrix}。 \quad (5)$$

通过上述三维光学矩阵的计算结果可以看出,光学元件的倾斜角度和偏心量 ($\Delta\theta_1, \Delta y_1; \Delta\theta_2, \Delta y_2; \Delta\theta_3, \Delta y_3$) 与像面高度和出射角度 (y_o, θ_o) 有着直接的关系。同时,当各光学元件的倾斜角度和偏心量数值为 0,入射角度 θ_1 等于微透镜阵列的子透镜数值孔径 $p/(2f)$,入射高度 y_1 为微透镜阵列的子透镜半高 $p/2$ 时,(5)式可简化为

$$\begin{bmatrix} x_o \\ \theta_o \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{pf_f}{2f} \\ \frac{p}{2f} \left(\frac{d_2}{f_f} - 1 \right) - \frac{p}{f_f} \left(\frac{1}{2} + n \right) \\ 1 \end{bmatrix}。 \quad (6)$$

(6)式给出了与经典的二维光学矩阵相同的计算结果,进一步验证了带有倾斜角度和偏心量的三

维光学矩阵的正确性^[25]。基于三维光学矩阵模型进行分析可以明确各光学元件的倾斜角度和偏心量对像面高度和出射角度的影响,通过前期计算可以有效得到系统的公差范围,用于指导后续的光学系统设计、加工和装调工作,这是有效的辅助分析手段。

3 微透镜阵列光学系统设计

3.1 建模分析

结合第 2 节中的三维光学矩阵模型讨论可知,光学元件的倾斜角度和偏心对像面高度和出射角度的影响是在建模过程中需要考虑的重要因素。在微透镜阵列光学系统的初始结构选型过程中,为实现视场角为 0.9° 的激光通信光学系统,设计如表 1 所示的参数。

表 1 光学系统初始结构参数
Table 1 Initial structural parameters of optical system

Parameter	Value
Incident angle $2\theta_i / (^\circ)$	0.9
System aperture D / mm	10
Microlens sub-aperture p / mm	0.55
Microlens focal length f / mm	35
Integrating focal length f_t / mm	19
Distance 1 d_1 / mm	35
Distance 2 d_2 / mm	3
Distance 3 d_3 / mm	19
Exit angle $\theta_o / (^\circ)$	1.98
Image height y_o / mm	0.314

此时,在表 1 所示的光学系统初始结构参数的基础上,采用三维光学矩阵模型对该光学系统的公差进行讨论。以倾斜角范围为 $6'' \sim 60''$ 、偏心范围为 $0.01 \sim 0.1 \text{ mm}$ 为例,计算像面光斑和出射角度情况,如图 2 所示。

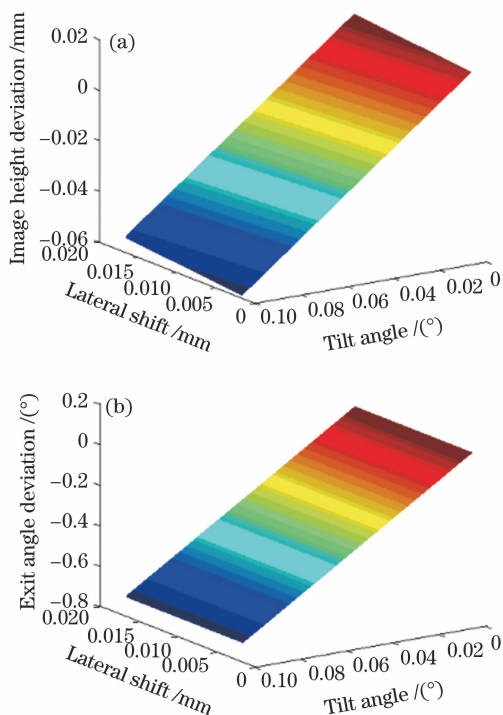


图 2 不同倾斜角度和偏心量下的像面高度和出射角度偏差。(a)像面高度偏差值;(b)出射角度偏差值
Fig. 2 Deviation values of image height and exit angle under different tilt angle and lateral shift. (a) Image height deviation; (b) exit angle deviation

由图 2 可知,像面高度偏差和出射角度偏差是倾斜角度和偏心量共同作用的结果,当倾斜角度和

偏心量均为最大值时,像面高度的最大偏差为 0.06 mm ,出射角度的最大偏差为 0.8° 。当倾斜角度固定时,随着偏心量的增加,像面高度和出射角度的偏差均从正偏差值减小到负偏差值;当偏心固定时,随着各元件倾斜角度的增加,像面高度和出射角度的偏差均从正偏差值减小到负值偏差,二者的变化速率不同。其中,当倾斜角度在 $6'' \sim 60''$ 范围内、偏心量在 $0.0180 \sim 0.0265 \text{ mm}$ 时,二者的互相补偿可以使像面高度的偏差接近 0。同时,将该光学参数模型下的各元件偏心量控制在 0.0465 mm 范围内,倾斜角度控制在 $18''$ 以下,像面高度误差不超过 0.02 mm ,出射角度误差不超过 0.3° ,并基于此提出设计和加工的合理公差要求。

3.2 光学设计

由微透镜阵列的独特性质可知,光学设计难点主要在于同一光路中多个子微透镜和一个积分透镜的组合形式。在常规的优化模式下,当光线同时进入多个子微透镜时,整体光学结构参数不能够被并行优化。为了避免上述问题,采用了对积分透镜进行独立设计和整体仿真的基本设计思路。

傅里叶透镜常用于微透镜阵列光学系统中的积分透镜设计,其相对于传统透镜的区别在于严格要求频谱面上的线性位置特征与输入空间频率一一对应。为了获得更紧凑的结构和更小的像面光斑,在激光通信系统的像差校正过程中需要考虑单色像差的点扩散问题以及物高和像高之间的对应关系。物点在像面的光斑扩散主要是由球差导致,而彗差导致了像面光斑的非对称扩散。畸变会严重影响输入空间频率与像面位置的线性对应关系,使不同位置点的光束叠加匀化效果变差。因此,在积分透镜的光学设计过程中需要校正系统的初级球差、初级彗差和畸变。光路设计如图 3 所示,由于积分透镜的 F 数接近 2,单片和双片透镜较难达到多种像差校正的能力,而采用三片式结构可以提供更多的校正自由度,大大提高了像差校正能力,校正后的结果如图 4 所示。从图 4 中

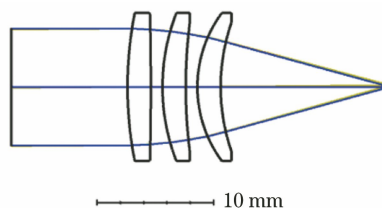


图 3 积分透镜组的光路设计图
Fig. 3 Optical path design of integration lens

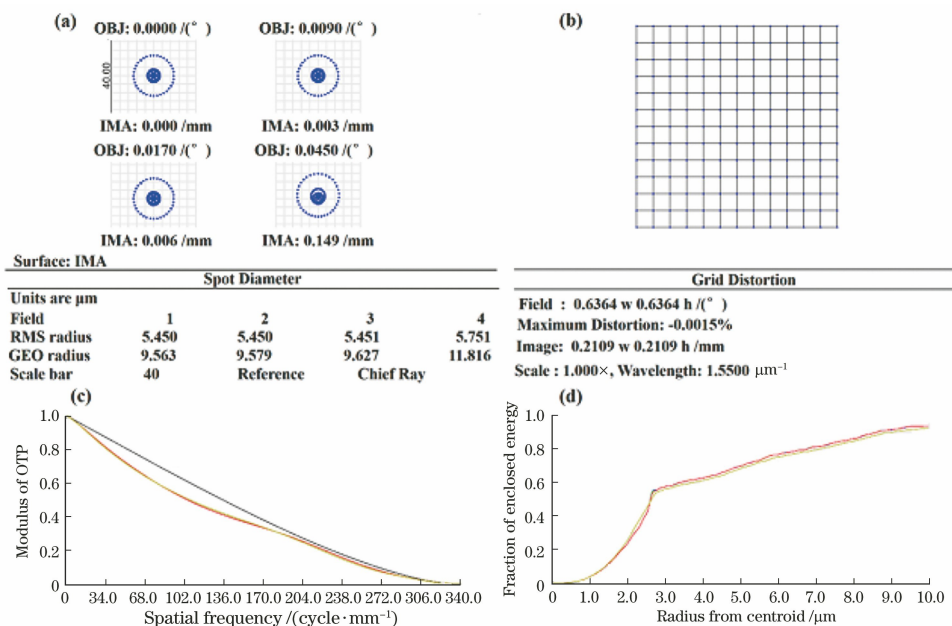


图 4 积分透镜像质评价图。(a)点列图(SPT);(b)畸变图;(c) MTF;(d)几何圆能量

Fig. 4 Figures of image quality evaluation for integration lens. (a) SPT; (b) distortion; (c) MTF; (d) geometric encircled energy

可以看出,积分透镜的调制传递函数(MTF)曲线在高频段接近衍射极限,表现出良好的空间对比度,中低频段 MTF 与衍射极限稍有偏差。点列图中的光斑形状相对圆整且大部分光线均在艾里圆以内。90%的几何圆能量集中在半径为 10 μm 的圆中。优化后的畸变低于 0.0015%,错位匀光能量的影响被大幅降低。

3.3 光学仿真

微透镜阵列光学系统在傅里叶焦平面的匀光情况较难由积分透镜的光学设计结果进行准确的评价。因此,在仿真模型结构参数与 3.2 节光学设计结果完全一致的情况下,建立了微透镜阵列光学系统仿真模型,如图 5 所示,通过光线追迹的方法研究像面能量分布情况。

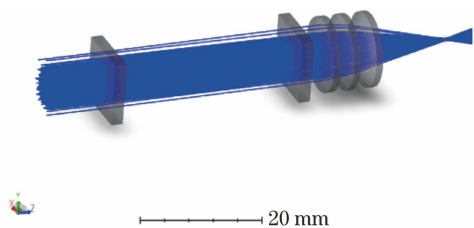


图 5 微透镜阵列光学系统仿真图

Fig. 5 Simulation diagram of microlens array optical system

基于上述的光路模型,仿真了高斯光束入射后的像面能量以及在两维方向上的能量强度分布曲线,如图 6 所示。

图 6(a)中的像面光斑由入射光束经微透镜阵列后会聚而成。图 6(b)和图 6(c)分别给出了二维方向上的能量分布情况。积分透镜对非轴上子光束的校正能力的降低导致了像面光斑的弥散,位于中心光轴附近的弥散光斑不会扩散出光斑外,但是,边缘点的弥散造成了像面光斑的进一步扩散并且部分能量会溢出设计光斑直径之外。在边缘视场,系统光斑的边缘锐度会有所下降。为了计算像面匀化效果,定义像面均匀度为^[26]

$$\eta_1 = \left(1 - \frac{P_{\max} - P_{\text{ave}}}{P_{\text{ave}}}\right) \times 100\%, \quad (7)$$

式中: P_{\max} 为最大能量值; P_{ave} 为平均能量值。

经过计算可得,该微透镜阵列光学系统的像面均匀性可以达到 88.2%。同时,为了考察在一定倾斜角度和偏心量公差下的匀光情况,根据 3.2 节计算的最大公差范围,设置光学元件在一维方向上的倾斜角度为 18",偏心量为 0.0465 mm,此时经过仿真后的像面情况如图 7 所示。

由图 7 可知,像面高度在一维方向上产生整体平移,平移量约为 0.022 mm,这与采用三维光学矩阵计算得到的偏差接近,进一步验证了理论模型的正确性。此时的像面均匀性为 87.2%。可见,倾斜角度和偏心量对像面高度和出射角度的影响明显,而对均匀性的影响不明显,利用三维光学矩阵计算得到的倾斜角度和偏心量公差范围可以用于对像面高度和出射角度的评价。

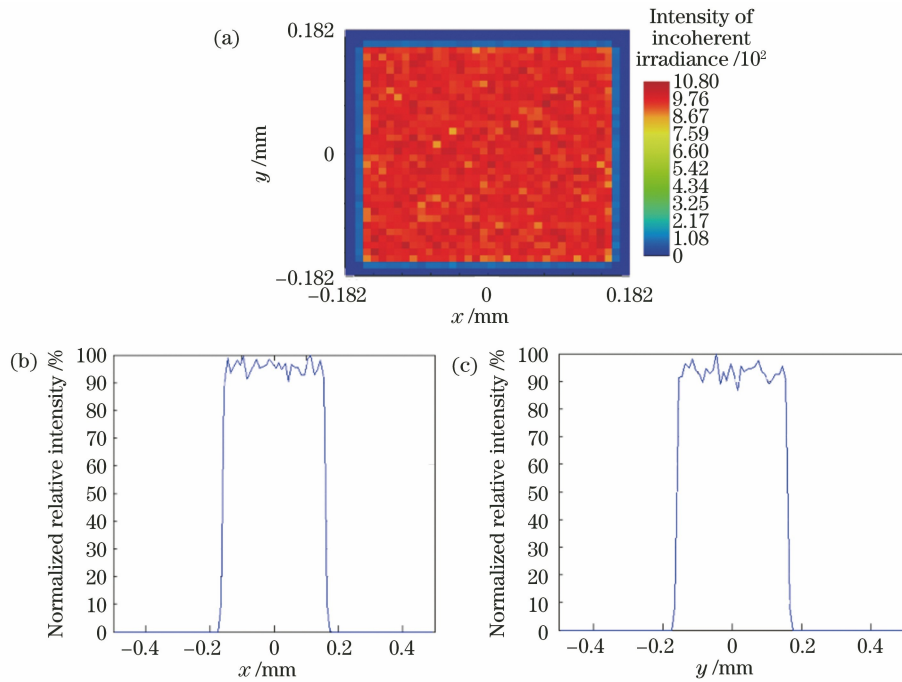


图 6 像面光斑能量分布仿真图。(a)接收像面能量分布;(b) x 维坐标能量强度曲线;(c) y 维坐标能量强度曲线
 Fig. 6 Simulation diagrams of energy distribution of image spot. (a) Energy distribution of receiving image;
 (b) intensity distribution in x direction; (c) intensity distribution in y direction

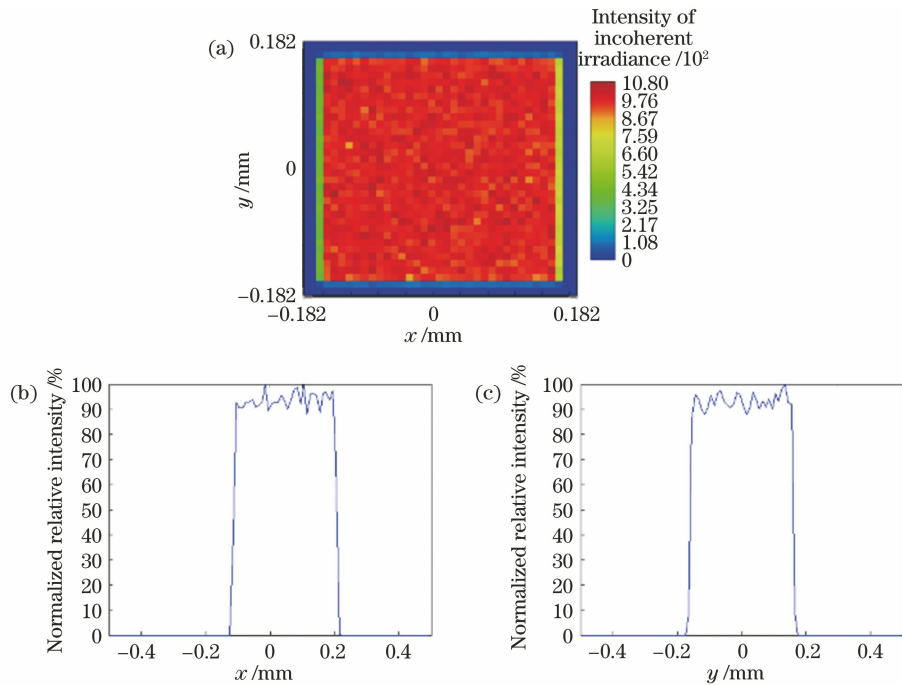


图 7 在一定的倾斜角度和偏心量下的像面光斑能量仿真图。(a)接收像面能量分布;(b) x 维能量分布曲线;
 (c) y 维能量分布曲线

Fig. 7 Simulation diagrams of energy distribution of image spot with certain tilt angle and lateral shift. (a) Energy distribution in receiving image; (b) energy distribution in x direction; (c) energy distribution in y direction

4 测试与讨论

4.1 光束匀化测试

在光学设计与仿真的基础上,根据公差分析情

况提出了光机加工和装调要求,实现了微透镜阵列光学系统的样机研制工作。采用光斑焦平面成像测试法对该光学系统进行了像面光斑的均匀性测试,测试系统工作原理框图如图 8 所示。

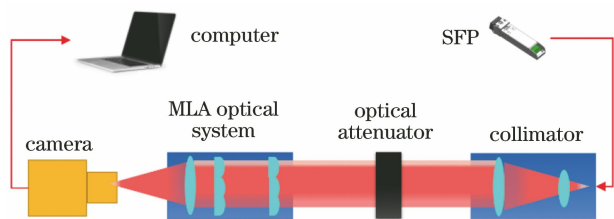


图 8 光斑均匀性测试工作原理框图

Fig. 8 Principle block diagram of spot homogenization test

在图 8 的基础上,搭建实际测试实验系统,如图 9 所示,其中,高斯模拟光源由光模块(SFP)、单模光纤、准直器和衰减片轮组成。1550 nm 的通信光模块作为激光通信光源,由单模光纤将其与准直光学系统相连。在焦距为 395 mm 的准直器的作用下,激光被准直扩束为大口径、小束散角的高斯光。同时,通过衰减片轮对能量进行调节,以保持相机接收光斑能量始终处于不饱和状态,进而保证像面光斑均匀性计算结果的合理性。高斯模拟光源发出的光束入射到微透镜阵列光学系统后被匀化聚焦在近红外相机的探测器平面处。匀化后的光斑由像元个

数为 320×256 、像元尺寸为 $30 \mu\text{m}$ 、波长范围为 $900 \sim 1700 \text{ nm}$ 的 Bobcat-320 近红外相机进行检测采集,从而可以有效地观测激光光斑的能量和形状。

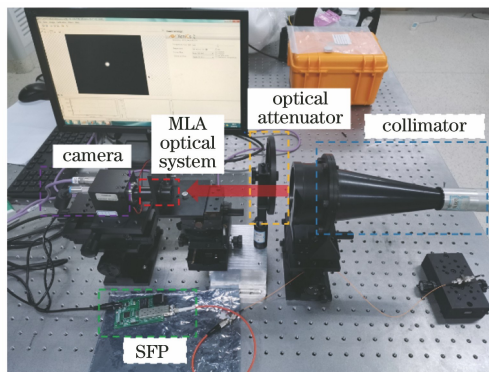


图 9 光束匀化测试实验图

Fig. 9 Experimental diagram of beam homogenization test

近红外相机上的成像光斑如图 10(a)所示,相机采集结果与像面仿真光斑相同,边缘点的弥散使光斑的四周出现一定的扩散。图 10(b)和图 10(c)分别给出了 x 和 y 方向的光斑能量曲线。

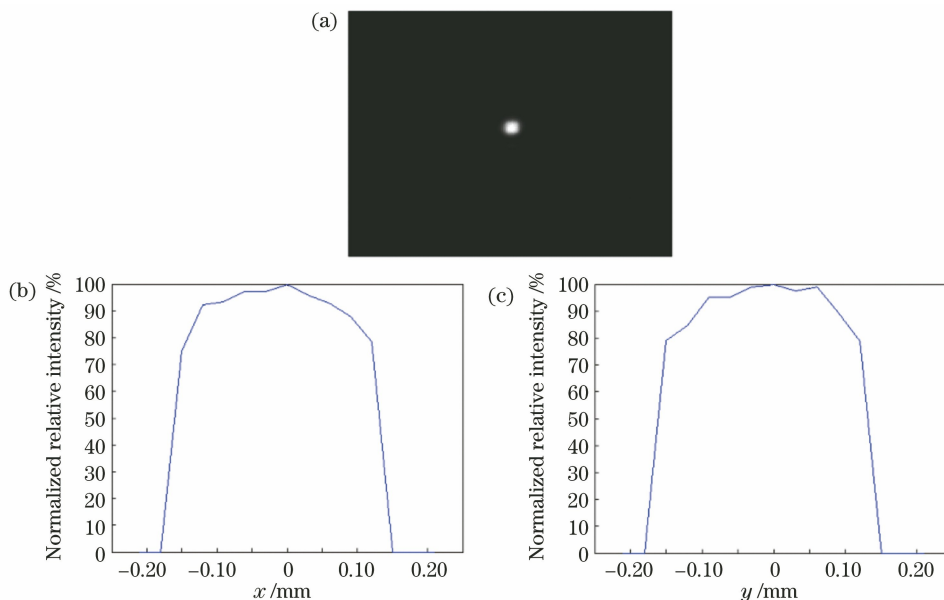


图 10 实测像面光斑能量分布图。(a)像面光斑照片;(b) x 维能量分布曲线 (c) y 维能量分布曲线

Fig. 10 Measured energy distributions of image spot. (a) Picture of image spot; (b) energy distribution in x direction; (c) energy distribution in y direction

与图 7(b)和图 7(c)相比而言,图 10(b)和图 10(c)的像面高度偏差在理论公差范围之内,能量分布曲线更加平滑,这是由于近红外光斑采集相机所使用的探测器像元尺寸较大,同等光斑大小下近红外相机的采样点数目变少,高频细节体现得较少。同时,大尺寸像元的探测导致了光斑边缘点的不均匀能量被引入到采样值计算中,进而使得 x 维方向

和 y 维方向的能量分布曲线边缘出现了一定的陡度下降。基于以上分析,利用(7)式对实测光斑进行计算,得到的均匀度为 86.58% ,其与仿真结果的最大偏差为 0.62% ,基本符合理论分析结果。

4.2 系统视场测试

为了实现视场的测试验证,在均匀性测试实验装置的基础上,在准直光学系统中加入水平测角仪

和俯仰角度调整台, 以实现入射光束角度的显示和调整。根据微透镜阵列的设计特点, 微透镜阵列的作用是对入射至该孔径角范围内的光线在指定像面光斑内进行匀化处理, 光学系统的最大视场为两排微透镜阵列所组成光学系统的最大孔径角。超出孔径角范围时, 第 n 行的第二排微透镜子透镜便接收不到来自第 n 行的第一排微透镜子透镜的光线, 进而使得光线不会再通过积分透镜会聚在指定的像面光斑位置。因此, 利用这一特点, 通过观测上下两边缘视场的光斑图像情况进行视场角判断, 进而验证光学系统的视场。视场角测试工作原理框图如图 11 所示。

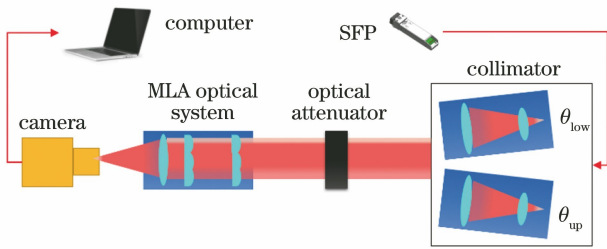


图 11 视场角测试工作原理框图

Fig. 11 Principle block diagram of field of view test

在视场测试过程中, 需要保证准直光学系统和微透镜阵列光学系统同轴; 将俯仰角度调整台向下调至下边缘视场, 观测并记录水平测角仪数值 θ_{low} , 保存此时的像面光斑图片; 向上调整俯仰角度至上边缘视场, 观测并记录水平测角仪数值 θ_{up} , 保存此时的像面光斑图片; 最终系统的视场角可表示为

$$2\theta_i = \theta_{up} - \theta_{low} \quad (8)$$

由于水平测角仪具备相对置零功能, 在将俯仰角度调整台向下调至边缘视场时, 将 θ_{low} 置零, 这样读出的 θ_{up} 值即为系统视场, 实验过程如图 12 所示。

对相机采集到的像面光斑进行质心处理, 结果如图 13 所示。下边缘视场的光束质心坐标为 (161.0, 121.4), 上边缘视场的光束质心坐标为 (161.0, 121.9), 二者的偏差为 0.5 pixel。

可见, 全视场光线入射系统时对应的像面光斑均能够完全覆盖探测器, 且质心偏差变化量不大, 实验结果进一步验证了微透镜阵列光学系统作为激光通信接收光学系统的优越性。

4.3 通信链路讨论

对于基于非光纤接口探测器的激光通信系统而言, 其通信视场能量模型关系到两个因素, 分别是光斑与探测器的重叠面积以及该面积区域下的能量分

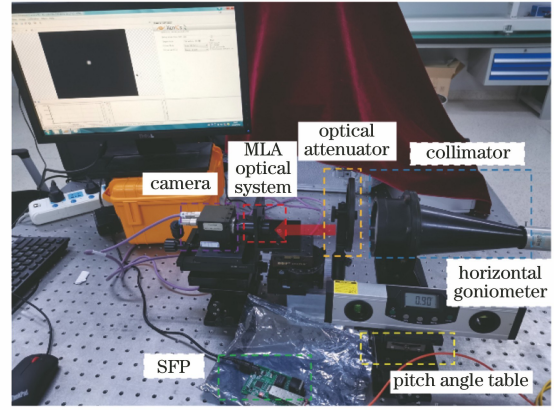


图 12 视场角测试实验图

Fig. 12 Experimental diagram of field of view test

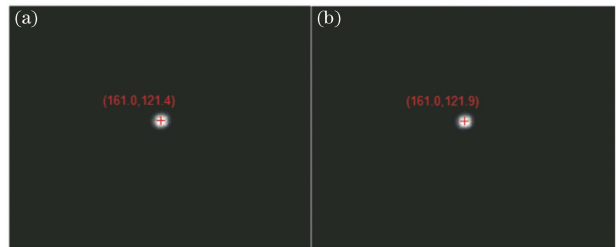


图 13 不同视场下的实测像面光斑。(a) 下边缘视场的像面光斑照片; (b) 上边缘视场的像面光斑图片

Fig. 13 Measured image spot under different field of view. (a) Picture of image spot under lower edge field of view; (b) picture of image spot under upper edge field of view

布。因此, 探测器适配损耗包括能量分布损耗 η_1 和重叠面积损耗 η_2 , 对于光束匀化型接收系统, 其能量分布损耗 η_1 可以由 4.2 节实测的均匀性结果表示。重叠面积损耗 η_2 主要体现在空间光探测器的有效探测面积与光斑大小的不匹配情况下, 如图 14 所示。探测器适配损耗 τ_m 可表示为

$$\tau_m = \lg \eta_1 \cdot \lg \eta_2 = \lg \eta_1 \cdot \lg \left(\frac{\pi D_d^2}{4D_s^2} \right), \quad (9)$$

式中: D_d 为探测器直径; D_s 为方形光斑边长。

为了讨论微透镜阵列光学系统的激光通信链路情况, 拟对链路能量进行计算分析。采用带有放大器的激光器, 其发射功率 P_1 为 200 mW; 选择直径 D_d 为 75 μm 、速率 R 为 2.5 Gbit/s、灵敏度 R_s 为 -30 dBm 的 APD (Avalanche Photo Diode) 作为探测器; 接收光学系统损耗 τ_r 为 1.55 dB, 发射光学系统损耗 τ_t 为 0.97 dB, 发射系统束散角 β 为 400 μrad , 发射口径 D_t 为 20 mm, 接收口径 D_r 为 10 mm。在晴朗天气下, 大气能见度为 20 km 时光的每千米大气传输损耗 τ_a 为 0.5 dB。同时, 激光在

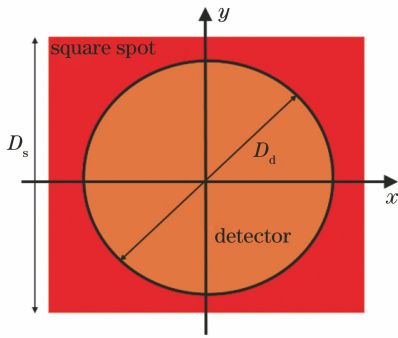


图 14 像面光斑与探测器重叠面积示意图

Fig. 14 Diagram of overlapping area between image spot and detector

大气信道传输中会受到大气湍流(大气折射率起伏)的影响。大气湍流的强度随着时间、链路、天顶角的变化而变化,激光的参量(如振幅和相位)会随之产生随机起伏,造成光束的闪烁、分裂、弯曲、漂移、扩展及空间相干性降低,进而导致系统的平均误码率下降和通信质量恶化。在表征大气湍流强度对通信系统的影响时,常采用光强起伏方差或光强闪烁指数,根据经验和实测数据报道^[9,27],拟定大气湍流裕量值 τ_{atmo} 为 11 dB。通过链路能量计算公式^[28]对链路裕量 L_M 进行计算:

$$L_M = P_1 - \tau_r - \tau_t - \tau_m - \tau_s - \tau_a - \tau_{\text{atmo}} + R_S, \quad (10)$$

式中: τ_s 为几何损耗, $\tau_s = D_r^2 / (\beta \cdot L)^2$ 。1 km 距离下的激光通信链路能量计算数据如表 2 所示。

表 2 链路能量计算数据

Table 2 Link energy calculation data

Parameter	Value
Wavelength λ /nm	1550
Range distance L /m	1000
Data rate R / (Gbit \cdot s ⁻¹)	2.5
Receiver aperture D_r /mm	10
Detector diameter D_d / μ m	75
Square spot length D_s / μ m	317
Transmitter diameter D_t /mm	20
Beam divergence angle β / μ rad	400
Laser power P_1 /mW	200
Receiver loss τ_r /dB	-1.55
Transmitter loss τ_t /dB	-0.97
Detector adaptation loss τ_m /dB	-2.15
Space loss τ_s /dB	-32.46
Clear air transmission loss τ_a / (dB \cdot km ⁻¹)	-0.5
Atmosphere turbulence margin τ_{atmo} /dB	-11
Detector sensitivity R_S /dBm	-30
Link margin L_M /dB	4.37

从表 2 可以看出,在考虑一定大气湍流影响的情况下^[27],微透镜阵列光学系统在 1 km 通信距离下可获得 4.37 dB 的链路余量,能够保证有效的激光通信。本文采用微透镜阵列结构实现了更大视场的光学系统设计。同时,若探测器的灵敏度更高、激光器发射功率进一步提高、通信束散角进一步减小,则可以实现更远距离的通信。

5 结 论

提出了一种基于微透镜阵列形式的新型大视场激光通信接收光学系统,并建立了在一定倾斜角度和偏心量下的微透镜阵列光学系统的三维矩阵模型,讨论了倾斜角度和偏心量对像面高度和出射角度的影响规律,通过计算得到的倾斜角度和偏心量公差带范围可以作为后续分析光学系统设计、加工、装调过程的有效依据。采用光学设计和仿真相结合的方式实现了大视场激光通信接收光学系统的设计工作,并通过仿真进一步验证了采用三维矩阵所得到的公差的合理性。基于该公差范围完成了样机的研制、光束匀光的测试和系统的视场测试,实现了 0.9° 大视场角和 86.58% 高均匀性的新型激光通信接收光学系统。最后讨论了微透镜阵列光学系统的激光通信链路模型,从理论方面分析了该系统的可行性,这为激光通信接收结构的设计形式开辟了新途径。

参 考 文 献

- [1] Arnon S. Optimization of urban optical wireless communication systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2003, 2(4): 626-629.
- [2] Jiang H L, Fu Q, Zhao Y W, et al. Development status and trend of space information network and laser communication [J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2019, 3(2): 1-8.
姜会林, 付强, 赵义武, 等. 空间信息网络与激光通信发展现状及趋势 [J]. 物联网学报, 2019, 3(2): 1-8.
- [3] Liu X N, Li C C, Li X L, et al. New technologies of space laser communication for the space-ground integrated information network [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2019, 40(1): 1-7.
刘向南, 李春才, 李晓亮, 等. 天地一体化信息网络空间激光通信新技术 [J]. 遥测遥控, 2019, 40(1): 1-7.
- [4] Zoran S, Hans S, Marc S, et al. LLCD operations using the Lunar Lasercom OGS Terminal [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8971: 89710.
- [5] Suryakant G, Amit G G, Sharan S. Optical design of

- off-axis Cassegrain telescope using freeform surface at the secondary mirror[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(2): 025113.
- [6] Takahashi K, Arimoto Y. Compact optical antennas using free-form surface optics for ultrahigh-speed laser communication systems [J]. *Optical Engineering*, 2008, 47(1): 016002.
- [7] Arimoto Y, Yoshida H, Kisara K. Wide field-of-view single-mode-fiber coupled laser communication terminal [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8610: 861008.
- [8] Arimoto Y. Operational condition for direct single-mode-fiber coupled free-space optical terminal under strong atmospheric turbulence [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(3): 031203.
- [9] Deng P, Yuan X H, Mohsen K, et al. Off-axis catadioptric fisheye wide field-of-view optical receiver for free space optical communications [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(6): 063002.
- [10] Lu H Q, Zhao W, Hu H, et al. Effects of beam misalignment on space laser communication systems [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(4): 895-900.
陆红强, 赵卫, 胡辉, 等. 光斑偏移对空间激光通信系统性能的影响 [J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(4): 895-900.
- [11] Tillkorn C, Heimes A, Flamm D, et al. Anamorphic beam shaping for efficient laser homogenization: methods and high power applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 1051: 105181I.
- [12] Deng H X, Gao X C, Ma M C, et al. Catadioptric planar compound eye with large field of view [J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 12455-12468.
- [13] Chen X, Song Y, Zhang W G, et al. Imaging method based on the combination of microlens arrays and aperture arrays [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(19): 5392-5398.
- [14] Alexander B, Uwe D Z. Wave optical analysis of light-emitting diode beam shaping using microlens arrays [J]. *Optical Engineering*, 2002, 41(10): 2393-2401.
- [15] Maik Z, Norbert L, Reinhard V, et al. Microlens laser beam homogenizer: from theory to application [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6663: 201-213.
- [16] Yin Z Y, Wang Y F, Jia W W, et al. Performance analysis of beam integrator system based on microlens array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(7): 0702007.
殷智勇, 汪岳峰, 贾文武, 等. 基于微透镜阵列的光束积分系统的性能分析 [J]. *中国激光*, 2012, 39(7): 0702007.
- [17] Peter S, Sergey K, Peter D, et al. Homogeneous LED-illumination using microlens arrays [J]. *Proceeding of SPIE*, 2005, 5942: 59420K.
- [18] Wippermann F, Zeitner U D, Dannberg P, et al. Beam homogenizers based on chirped microlens arrays [J]. *Optics Express*, 2007, 15(10): 6218-6231.
- [19] Wang Z X, Zhu G Z, Huang Y, et al. Analytical model of microlens array system homogenizer [J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 75: 214-220.
- [20] Jin Y H, Hassan A, Jiang Y J. Freeform microlens array homogenizer for excimer laser beam shaping [J]. *Optics Express*, 2016, 24(22): 24846-24858.
- [21] Cao A X, Pang H, Wang J Z, et al. The effects of profile errors of microlens surfaces on laser beam homogenization [J]. *Micromachines*, 2017, 8(2): 50.
- [22] Jolly A, Machinet G, Boulet J. Sets of microlens arrays to finely shape homogenized focal spots [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2019, 36(4): 1067-1075.
- [23] Norbert L. Design and modeling of a miniature system containing micro-optics [J]. *Proceeding of SPIE*, 2010, 4437: 1-13.
- [24] Lindlein N. Simulation of micro-optical systems including microlens arrays [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2002, 4(4): S1-S9.
- [25] Lei C Q, Wang Y F, Yin Z Y, et al. Homogenization system for diode laser stack beams based on microlens array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(5): 0502009.
雷呈强, 汪岳峰, 殷智勇, 等. 基于微透镜阵列的半导体激光器堆栈匀化系统 [J]. *中国激光*, 2015, 42(5): 0502009.
- [26] Zhao W, Liu X, Li H F. Design of laser projection display illumination system based on freeform surface array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(6): 0622001.
赵伟, 刘旭, 李海峰. 基于自由曲面阵列的激光投影显示照明系统设计 [J]. *光学学报*, 2018, 38(6): 0622001.
- [27] Ma J, Pan F, Tan L Y, et al. Measurement of statistical properties of laser irradiance scintillation and link margin evaluation over densely urbanised terrain [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(8): 1257-1260.
马晶, 潘锋, 谭立英, 等. 城市路径下激光光强起伏特性测量及链路余量估算 [J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(8): 1257-1260.
- [28] Xu Y Y, Dong K Y, An Y, et al. Analysis of the influence of defocus on the field of view of laser communication reception [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(5): 822-831.
许蕊赞, 董科研, 安岩, 等. 离焦对激光通信接收视场的影响分析 [J]. *中国光学*, 2018, 11(5): 822-831.