

非相干叠加激光发射系统光学设计

赵知诚^{1,2}, 沈为民^{1,2}, 唐敏学^{1,2}, 贺虎成^{1,2}

- (1. 苏州大学 物理与光电·能源学部 教育部现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006;
2. 苏州大学 物理与光电·能源学部 江苏省先进光学制造技术重点实验室, 江苏 苏州 215006)

摘要: 介绍了一种适用于三束激光非相干叠加聚焦的新型激光发射光学系统, 工作波长 1 080 nm, 全视场角 0.6°。系统为离轴两镜反射结构, 对三束紧密排列的激光光束进行扩束聚焦, 系统主镜为口径 303 mm 的椭球面反射镜, 系统像质接近衍射极限, 并且可以通过控制次镜轴向位置调焦适应不同目标距离。计算了叠加后的激光光斑的功率密度分布和环围功率曲线, 设计在目标距离 1 000 m 时叠加光斑半径 9 mm 内的环围功率大于 95%, 此激光发射系统结构简单, 长径比小, 聚焦质量满足使用需求, 激光光斑能量得到有效叠加。

关键词: 激光发射光学系统; 非相干叠加; 两镜反射系统; 非球面反射镜

中图分类号: TH744 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)06-1728-07

Optical design of incoherent combining laser beam expander

Zhao Zhicheng^{1,2}, Shen Weimin^{1,2}, Tang Minxue^{1,2}, He Hucheng^{1,2}

- (1. Key Lab of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, College of Physics, Optoelectronics and Energy, Soochow University, Suzhou 215006, China; 2. Key Lab of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province, College of Physics, Optoelectronics and Energy, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: A new optical design of laser beam expander is introduced. It suits for three laser beams to be expanded and focused. Its operation wavelength is 1 080 nm and its full field of view 0.6 degrees. A two-mirror catoptrical telescope is designed for expanding and focusing three beams which are arranged in a close configuration. Its primary is an ellipsoid mirror with aperture diameter of 303 mm. Its focusing performance approaches to the diffraction limitation. And focusing at different target ranges is implemented through control of the axial position of the secondary mirror. The power density distribution and power in the bucket curve of combined and focused laser spots are calculated with the aid of computer simulation. When focused at one kilometer, the ratio of the spot power in the bucket of 9 mm radius to the total power is over 95 percent. This new kind beam expander has the advantages of simple and low length-to-aperture-diameter ratio. The system focusing performance satisfied the usage requirement. The power of laser spots is effectively combined.

Key words: laser beam expander; incoherent beam combine; two-mirror catoptrical telescope; aspheric mirror

收稿日期: 2013-10-14; 修订日期: 2013-11-16

基金项目: 国家自然科学基金(61078043)

作者简介: 赵知诚(1988-), 男, 硕士生, 主要从事光学仪器与光学设计方面的研究。Email: keatszhao@126.com

导师简介: 沈为民(1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光学设计和仪器光学、航天遥感技术等方面的研究。

Email: swm@suda.edu.cn

0 引言

发射光学系统是激光武器中光束控制系统的重要组成部分,发射光学系统的设计旨在将激光扩束聚焦在目标处,获得最大能量密度的聚焦光斑。近年来高功率光纤激光器的实用化程度越来越高,目前单束输出功率已达 10 kW,成为未来激光武器系统的首选光源之一^[1]。由于存在积热和非线性效应^[2],继续提高单束光纤激光的输出功率存在着很大的技术困难。为了满足战术(输出功率大于100 kW^[3])激光武器的应用需求,自 21 世纪以来,激光光束叠加技术的研究开始为各国所重视。

目前激光光束叠加技术按原理可以分为相干叠加和非相干叠加两种^[4]。相干叠加需使用光学相控阵器件控制多束激光达到干涉加强条件以提高目标处的功率密度。为了达到干涉加强条件,需要使用高光束质量且带宽极窄($\Delta\lambda/\lambda < 10^{-6}$)的激光器,并且多束光束间要达到相位同步,偏振态同步^[1]。这些严苛的条件限制了单束激光功率的提高并且对系统的稳定性提出了很高的要求。相反的,非相干叠加技术不需要满足干涉加强条件,而是在目标处将激光光斑能量线性叠加,可以使用高功率的激光,并且叠加得到的平均功率密度与相干叠加相当。此外,非相干叠加还可以通过增加光束数量来提高总输出功率。

激光非相干叠加最早发展自多束激光目标照明技术^[5]。1996年,美国的研究人员在火池光学靶场和林肯实验室开展了多束激光目标照明的实验研究和理论模拟工作。2006年,美国海军实验室 Phillip Sprangle 和 Antonio Ting 等人研究了使用光纤激光器的多束非相干叠加发射系统,2008年展开了激光武器系(LaWS)的研制^[6],2010年使用研制的样机成功地完成对飞行靶机的跟踪、锁定和摧毁。其中的发射系统采用了非相干叠加的光学设计,使用6支光纤激光非相干叠加,发射光学系统采用了两反物镜,主镜口径约500mm。2011年,欧洲导弹集团(MBDA)成功测试了10kW反火箭弹、反炮弹、反无人机光纤激光光束叠加发射系统。2012年9月,激光输出功率40kW的系统也测试成功。这套高功率的激光发射系统采用了被MBDA称为“几何叠加”的非相干光束叠加技术,采用两镜反射结构,主镜口径600mm,由4支10kW的单模光纤激光器提供激光光源,使

用快速偏向反射镜来调整各束激光的发射方向,并且抵消大气湍流的影响。

总之,国外非相干叠加的激光武器已经从研制走向实用,而国内在这一技术方面还未见相关报道。所以,研制非相干叠加激光发射光学系统有着实用意义和实际的应用需求。文中介绍一种适用于三束激光叠加的激光发射光学系统。首先,给出其技术性指标和设计方案;然后,给出设计结果,并进行系统像质和聚焦光斑的质量评价。

1 指标要求和设计方案

1.1 设计要求和指标

文中设计的是一种激光发射光学系统,根据大气窗口波段分布和成熟的高功率掺铒光纤激光器的波长,选择 $\lambda=1080\text{nm}$ 为工作波长^[2,7]。选取激光光源的其他参数包括:单束输出功率1kW、光束质量 $M^2=1.5$ 。经一级扩束后的准直光束束腰半径4mm,发散角0.14mrad,光束截断比 $t=1.2$ 。工作时的目标距离范围500~1500m,期望在目标距离1000m时叠加光斑直径小于18mm。系统可通过促动器调节主次镜的轴向间隔,保证在不同的目标距离时都得到良好的叠加聚焦光斑。

1.2 光学结构方案

激光发射光学系统起到的作用实质上是压缩激光的光束发散角。传统上激光发射光学系统设计源于望远系统,常用的结构有折射型和反射型。对于高功率激光应用领域,由于折射型结构存在大口径透镜难以加工,以及透镜热应力损伤和热移焦问题,难以用于大扩束比的激光发射光学系统。反射型系统一般基于两镜反射结构^[8],可以保证大口径的出射光束,满足扩束比的要求,但同轴反射系统的中心遮拦会造成激光高斯光束中心高能部分的损失。如主次镜遮拦比为0.3的情况下会造成约40%的中心能量损失^[9-10]。对于单束激光适用的发射光学系统,首选的光学结构是离轴卡塞格林结构,如图1所示,这种结构没有中间像点,可以避免高功率激光造成空气击穿,系统长径比也可以压缩。离轴结构则避免了中心遮拦的损耗。系统变量有一个间距,两个曲率半径,两个圆锥曲线系数。考虑到激光束的发散角很小,光学系统只需要考虑校正轴上球差及正弦差^[11],并且由于是激光光学系统,色差不必考虑,结构变量

足以满足像差矫正的需求。

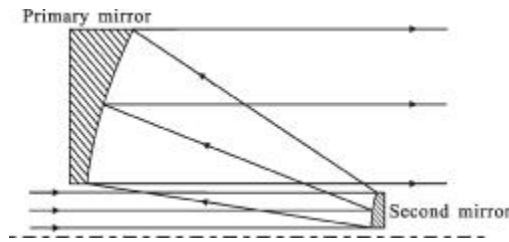


图 1 离轴卡塞格林结构

Fig.1 Off-axis Cassegrain configuration

1.3 光束叠加方案

文中非相干叠加激光发射光学系统需要将多束激光分别扩束聚焦到同一目标处。此时可行的方案有两种：一是多束激光共用单个发射光学系统；另一个是多束激光分别通过各自的发射系统后叠加在目标处的模块化方案。采用离轴卡塞格林结构时，方案二需要组合多个离轴结构的发射模块，这会增加光学元件制造和系统装调的难度。为了实现多束激光光束的非相干叠加，可结合方案一和离轴卡塞格林结构，每束激光占用同轴系统的一部分离轴孔径，多束激光经过圆周排列后入射系统，发射并叠加在目标处。此方案利用整个同轴两镜系统，又保留了离轴卡塞格林结构的优点，避开了同轴系统的中心遮拦，减小了光束功率损耗，其原理如图 2 所示。

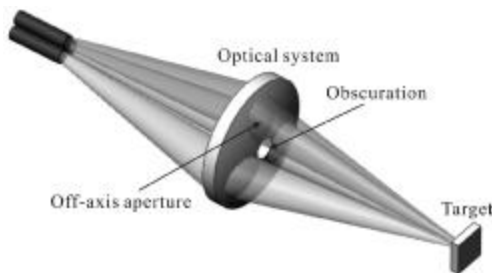


图 2 叠加聚焦系统原理图

Fig.2 Schematic diagram of laser focusing system with beam combining structure

在设计和制造装调时，可以将此光学系统视作一个同轴两镜系统，以简化光学元件的加工检测和系统的装调测试过程。通过增加光束支数，还可以提高系统总输出功率。

对于叠加激光束支数的选择，首先考虑从激光光源输出功率和整个系统输出功率的倍数关系来确定。在不考虑总输出功率的情况下，应该尽可能地提高系统的通光口径的利用率。图 3 展示的是使用 3、

4、6、8 束激光叠加时需要的两反系统主镜口径的大小对比，图中外围圆为主镜有效口径，阴影线部分为主镜上离轴孔径所占圆，子孔径两两相切排列，黑色部分为允许的次镜遮拦圆。

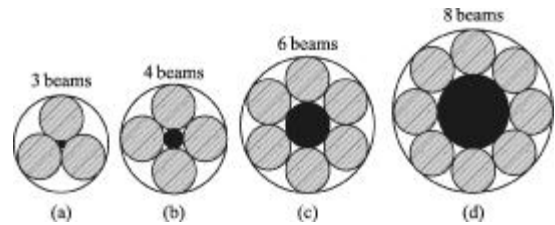


图 3 主镜光束排布图

Fig.3 Arrangement of laser beams on primary mirror

以系统主镜为考量，分析主镜有效口径的使用情况与叠加光束数量的关系，得到图 4，其中 X 轴表示叠加光束数量，Y 轴表示归一化的主镜面积使用率与主镜口径的比值，可以作为选择光束数量和主镜口径的指标。可见 3 束和 4 束叠加时，Y 轴值大于 0.95，可以作为优先选择的叠加方案。使用更多光束的叠加时，会降低主镜的使用率并增加光束的离轴量增加，对光学系统设计提出更高要求。

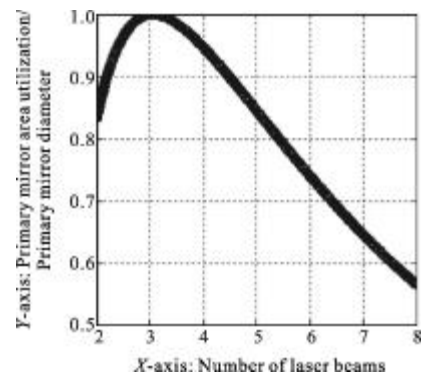


图 4 叠加光束数量与主镜口径选择关系

Fig.4 Relationship between the number of beams and primary mirror clear aperture

该设计选用三束激光叠加方案。三束入射激光呈品字形紧密排布，依次经过次镜、主镜、窗口玻璃后聚焦在目标。单光束的光路图如图 5 所示，主镜面上的光斑分布如图 3(a)所示。

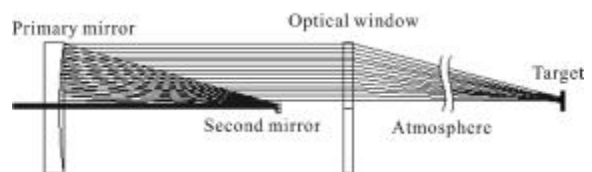


图 5 单束激光光路图

Fig.5 Solo beam path diagram

1.4 初始结构的确定

按上述的指标要求和方案,计算初始结构。激光聚焦光学系统可以认为是物方空间束腰半径为 $\omega(z_0)$ 的高斯光束经光学系统变换后,在像方空间的束腰半径变为 $\omega(z)$ 。在光学系统的设计中,将物方束腰和像方束腰视为一对物像。该设计中,希望得到像方束腰与聚焦目标重合的光学系统。在束腰处,高斯光束的等相位面曲率半径趋向无穷大,此时物方高斯光束复参数 $q(z_0)$ 表示为:

$$\frac{1}{q(z_0)} = \frac{1}{\rho(z_0)} - i \frac{\lambda M^2}{\pi \omega^2(z_0)} \xrightarrow{\rho(z) \rightarrow \infty} \frac{1}{q(z_0)} - i \frac{\lambda M^2}{\pi \omega^2(z_0)} \quad (1)$$

像方高斯光束复参数 $q(z)$ 表示为:

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{\rho(z)} - i \frac{\lambda M^2}{\pi \omega^2(z)} \xrightarrow{\rho(z) \rightarrow \infty} \frac{1}{q(z)} - i \frac{\lambda M^2}{\pi \omega^2(z)} \quad (2)$$

将光学系统的等效变换矩阵 $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$ 记为矩阵 M 。将光束通过光学系统时依次经过的介质间隔、界面折射、透射元件、反射元件用 2×2 矩阵 $M_1, M_2, M_3, M_4, \dots, M_n$ 表示,那么总的变换矩阵 M 可以表示为:

$$M = M_n M_{n-1} \dots M_2 M_1 \quad (3)$$

矩阵 M 中的元素 A, B, C, D 与变换前后的高斯光束复参数 $q(z_0), q(z)$ 存在关系式:

$$q(z) = \frac{Aq(z_0) + B}{Cq(z_0) + D} \quad (4)$$

联立公式(1)~(4)即可计算确定高斯光束光学系统的初始结构。图 6 为单束激光经光学系统变换原理图。图中激光发射面到次镜距离 $l_1=2000\text{mm}$,主镜到窗口距离 $l_3=700\text{mm}$,不同目标距离对应 500m 、 1000m 、 1500m 依次记为 $l_4^{500}, l_4^{1000}, l_4^{1500}$ 。次镜到主镜间隔依目标距离不同依次记为 $l_2^{500}, l_2^{1000}, l_2^{1500}$,由主镜和次镜的顶点曲率半径来确定。

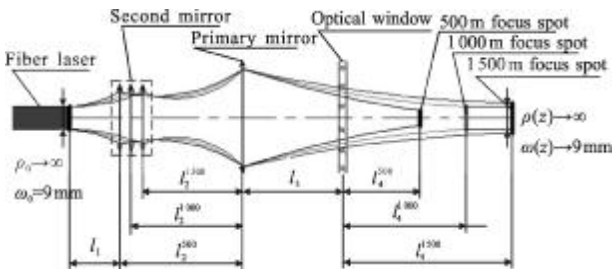


图 6 单束激光光学系统变换原理图

Fig.6 Schematic diagram of solo laser beam translation

不计窗口玻璃的影响,聚焦距离在 1000m 时,

两镜反射系统的变换矩阵 M^{1000} 可以表示为:

$$M^{1000} = M_5 M_4 M_3 M_2 M_1 = \begin{bmatrix} 1 & l_3 + l_4^{1000} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/2r_2 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_2^{1000} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/2r_1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $M_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/2r_1 & -1 \end{bmatrix}$ 、 $M_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/2r_2 & -1 \end{bmatrix}$ 为次镜和主镜的变换矩阵; r_1, r_2 分别为次镜和主镜的顶点曲率半径;

$$M_1 = \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, M_2 = \begin{bmatrix} 1 & l_2^{1000} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, M_5 = \begin{bmatrix} 1 & l_3 + l_4^{1000} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

分别为系统中的三个空气间隔。需要确定的量为 r_1, r_2, l_2^{1000} 。目标距离 500m 和 1500m 时,同理有类似的变换矩阵 M^{500}, M^{1500} 。将变换矩阵的元素表式代入计算可知,单束激光在主镜上的光斑直径 d_p 在目标距离不同时始终为 116mm ,在光束截断比 $t=1.2$ 下,需要的主镜口径 D_p 计算为:

$$D_p = \left(1 + \frac{1}{\cos 30^\circ} \right) d_p t = 300\text{mm} \quad (6)$$

为了压缩光学结构长径比,主反射镜的相对孔径选为 $1:1.8^{[8,12]}$ 。此时主镜顶点曲率半径计算为:

$$r_2 = 2D_p F/\# = 1080\text{mm} \quad (7)$$

至此可以解算目标距离 1000m 时的初始结构参数,确定 r_1, r_2 ,进而计算聚焦距离 500m 和 1500m 时的 l_2^{500}, l_2^{1500} ,确定次镜调节距离。下面给出的优化设计和系统评价结果表明上述设计思想是有效的。

2 设计结果和性能分析

根据解算出的单束激光系统的初始结构,在软件中建立三束叠加结构和目标距离多结构模型并进行优化,三束叠加的三维光学结构如图 7 所示。

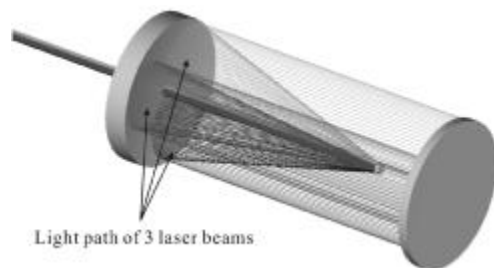


图 7 三维光学结构图

Fig.7 Three-dimensional optical structure

以主镜 Conic 系数、次镜曲率半径和主次镜间隔为主要变量,并设置目标距离多结构的权重因子进行系统优化,最后得到的光学结构参数列于表 1。

表 1 光学系统参数

Tab.1 Parameters of optical system

Parameter	Value
Working wavelength	1 080±5 nm
Field of view	0.6°
Target distance	500-1 500 m
1/e ² radius of focus spot	4.46-13.73 mm
Effective focal length	34.9-112.8 m
Clear aperture of primary mirror	303 mm
Optical length	720 mm

表 2 列出的是系统结构参数。其中第 2 面和第 5 面的光学间隔数值,从上到下依次为聚焦距离 500 m、1 000 m、1 500 m 时对应的数值。其中主镜采用椭球面,次镜为球面,减小了系统加工研制的难度。

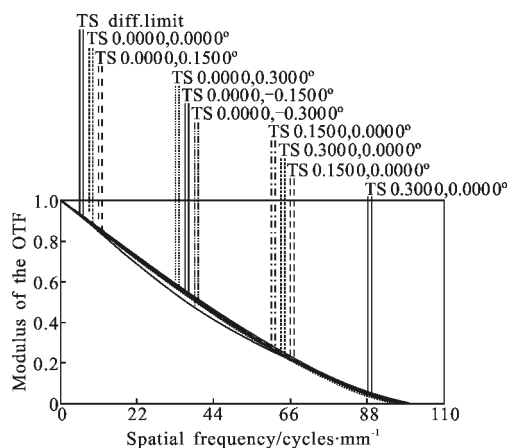
表 2 光学系统结构参数

Tab.2 Configuration parameter of the optical system

No.	Radius /mm	Conic	Thickness /mm	Diameter /mm	Glass
1	inf	-	2000.000 -502.769 -502.971 -502.366	-	-
2	75.634	-	21.000	303.000	Mirror
3	1 080.000	-0.929	700.000	303.000	Mirror
4	inf	-	20.000 0.5e6 1.0e6 1.5e6	305.000	Silica
5	inf	-	-	305.000	-
6	inf	-	-	-	-

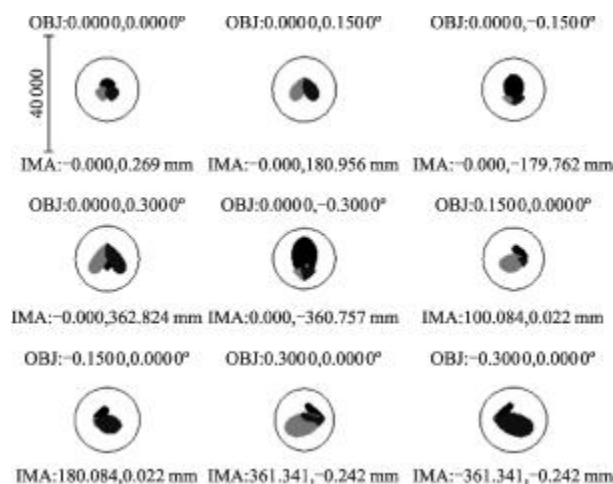
对优化后的系统进行像质评价。由于光学系统是非轴对称系统,选取(0°,0°)、(0°,0.15°)、(0°,0.3°)、(0°, -0.15°)、(0°, -0.3°)、(0.15°,0°)、(0.3°,0°)、(-0.15°, 0°)、(-0.3°,0°)共 9 个视场。目标距离 1 000 m 时,工作波长下的系统的调制传递函数 MTF 曲线图和点列图如图 8(a)和图 8(b)所示。由于该系统焦距长,为分析调制传递函数曲线,在系统最后附加了一个焦距 1 000 mm 的理想抛物面镜。

可见在聚焦距离 1 000 m 时,光学系统各视场的 MTF 均接近衍射极限,并且点列图都落在艾里斑半径(图 8(b)中黑色圆半径)之内,可以认为系统残留的几何像差不会引起聚焦光斑的弥散。目标距离 500 m 和 1 500 m 时也得到了类似的像差结果。



(a) 聚焦距离 1 000 m 时光学系统调制传递函数曲线图 (@1080 nm)

(a) MTF curves of the system in target distance 1000 m (@1080 nm)



(b) 聚焦距离 1 000 m 时的光学系统点列图 (@1080 nm)

(b) Spot diagram of the system in target distance 1000 m (@1080 nm)

图 8 MTF 曲线图和点列图

Fig.8 MTF & spot diagram

对于叠加聚焦光斑的评价,直接有效的方法是计算辐射功率密度分布和环围功率 (Power in the bucket)。使用 ZEMAX 中的物理光线传播模拟工具,结合 MATLAB 的 ZEMAX 接口工具箱,编制程序对光学系统模型计算叠加光斑的辐射功率密度分布。首先给出(0°,0°)视场下聚焦距离 1 000 m 时,三束激光各自的光斑辐射功率密度分布图,如图 9(a)~(c)

所示,此时各光斑峰值功率密度点相对目标几何中心点都有偏离。对三束光斑进行叠加非相干处理得到图 9(d)所示的叠加光斑辐射功率密度分布图。非相干叠加后的光斑,峰值功率点位于聚焦目标中心,峰值功率 25.08 W/mm^2 ,光斑形状呈略带圆角的三角形。

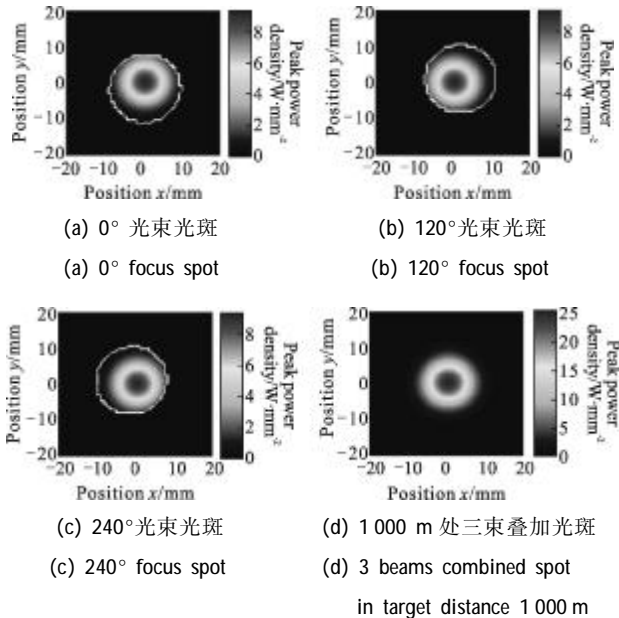


图 9 (0°,0°)视场目标距离 1000 m 时单束和叠加聚焦光斑辐射功率密度分布图

Fig.9 Power density distribution of single beam spot and combined spot in target distance 1000 m for field (0°,0°)

同样,计算得到系统调焦后对 500 m 和 1500 m 距离目标聚焦的叠加光斑辐射功率密度分布如图 10(a)、(b)所示。可见在不同的目标距离下,系统有相同的光斑叠加效果,叠加光斑尺寸随目标距离的增大和减小同向变化。

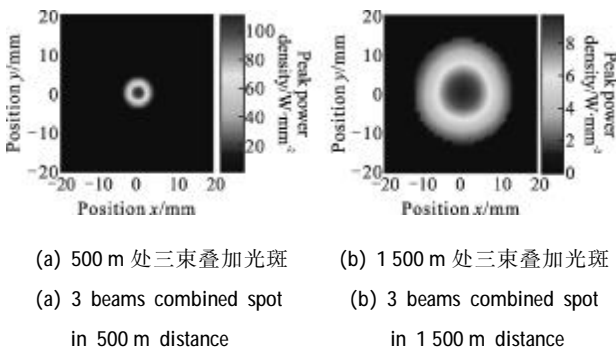


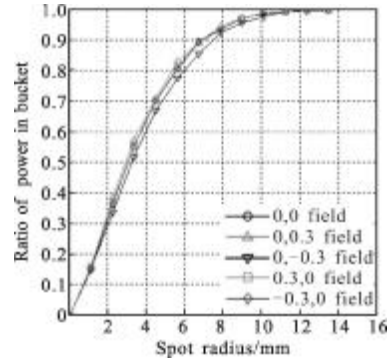
图 10 (0°,0°)视场目标距离 500 m、1500 m 时的叠加聚焦光斑辐射功率密度分布图

Fig.10 Power density distribution of combined spot in target distance 500 m & 1500 m for field (0°,0°)

环围功率(PIB)定义为给定激光光斑半径内包含功率与激光光斑总功率之比:

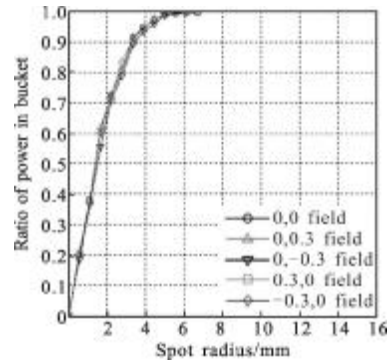
$$PIB = \frac{\text{光斑半径内功率}}{\text{总功率}} \quad (8)$$

它可以衡量激光光斑的能量集中情况。根据模拟出的中心和四个边缘视场的叠加光斑辐射功率密度分布矩阵,绘制不同目标距离时各视场聚焦光斑的环围功率曲线如图 11(a)~(c)所示。



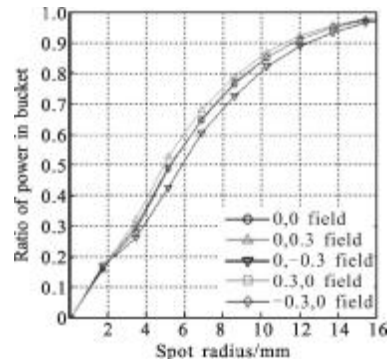
(a) 目标距离 1000 m(理想束腰半径 9 mm)

(a) Target distance 1000 m(Ideal waist radius 9 mm)



(b) 目标距离 500 m(理想束腰半径 4.46 mm)

(b) Target distance 500 m(Ideal waist radius 4.46 mm)



(c) 目标距离 1500 m(理想束腰半径 13.73 mm)

(c) Target distance 1500 m(Ideal waist radius 13.73 mm)

图 11 各视场不同目标距离下叠加光斑的环围功率(PIB)曲线
Fig.11 PIB of combined laser spots in different target distance for each field

可见边缘视场的环围功率相对中心视场略有下降,但在可接受的范围内。在不同目标距离时及边缘视场时理想束腰半径圆内的光斑环围功率值均大于 0.95,表明此激光发射光学系统在调焦后及偏离中心视场时也可以很好地聚焦光束并叠加光斑,满足应用需求,达到了与国外同类系统相同的性能水平^[13]。

3 结 论

以上给出了非相干叠加的三束激光聚焦发射光学系统的设计思想、设计结果、像质和聚焦光斑评价结果。在不考虑大气因素的条件下,设计的光学系统像差小,对多束激光的聚焦和叠加效果好,激光能量利用率高,可调焦适用于不同距离目标,系统结构紧凑。同类系统未来可通过设计增加激光支数获得更高的激光输出功率,与高功率光纤激光器配合,可构成新型的高能激光武器系统。

参 考 文 献:

- [1] Sprangle Phillip, Ting Antonio, Penano Joseph. Incoherent combining and atmospheric propagation of high-power fiber for directed-energy applications [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2009, 45(2): 138-148.
- [2] Zhao Shanghong, Zhan Shengbao, Shi Lei. High Power Fiber Laser Technique [M]. Beijing: Science Press, 2010: 1-14. (in Chinese)
赵尚红, 占生宝, 石磊. 高功率光纤激光技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 1-14.
- [3] Wang Xiaocai. Overall consideration of high power laser weapon system [J]. *Applied Optics*, 1996, 17(6): 8-13. (in Chinese)
王效才. 强激光武器系统光学总体考虑 [J]. *应用光学*, 1996, 17(6): 8-13.
- [4] Li Yongzhong, Fan Dianyuan. Beam combining of fiber laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, 42(9): 26-29. (in Chinese)
李永忠, 范滇元. 光纤激光器光束的叠加技术 [J]. *激光与光子学进展*, 2005, 42(9): 26-29.
- [5] Su Yi, Wan Min. High Energy Laser System [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004: 182-185. (in Chinese)
苏毅, 万敏. 高能激光系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 182-185.
- [6] Phillip Sprangle. Laser Weapons for Naval Applications [M]. US: Naval Research Laboratory, 2012.
- [7] Yang Yang, Zhao Yuan, Qiao Lijie, et al. Atmospheric transmission property of 1.06 μm laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1999(1): 17-21. (in Chinese)
杨洋, 赵远, 乔立杰, 等. 1.06 μm 激光的大气传输特性 [J]. *红外与激光工程*, 1999(1): 17-21.
- [8] Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces [M]. Suzhou: Soochow University Press, 1994: 10-36. (in Chinese)
潘君骅. 光学非球面的设计加工与检验 [M]. 苏州: 苏州大学出版社, 1994: 10-36.
- [9] Kong Xianglei, Hao Peiming, Zhou Shikang, et al. Aspheric reflective beam expander research [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2001, 18(SI): 40-43. (in Chinese)
孔祥蕾, 郝沛明, 周士康, 等. 非球面反射型扩束器的研究 [J]. *量子电子学报*, 2001, 18(SI): 40-43.
- [10] Zhao Yanzhong, Song Fenghua, Sun Huayan. Optical design of 1.06 μm pulse laser expanding system with high rate variable focus [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 891-895. (in Chinese)
赵延伸, 宋丰华, 孙华燕. 1.06 μm 脉冲激光高倍率变焦的扩束发射光学系统设计 [J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(6): 891-895.
- [11] Hello Patrice, Man Catherine. Design of a low-loss off-axis beam expander [J]. *Applied Optics*, 1996, 35(15): 2534-2536.
- [12] Hu Mingyong, Liu Wenqing, Zhang Quan, et al. Compensation test of large relative aperture parabolic mirror [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2006, 23(2): 155-158. (in Chinese)
胡明勇, 刘文清, 张权, 等. 超大相对孔径抛物面反射镜的补偿检验 [J]. *量子电子学报*, 2006, 23(2): 155-158.
- [13] Protz Rudolf, Zoz Jürgen, Geidek Franz, et al. High-power beam combining-a step to a future laser weapon system [C]// *SPIE*, 2012, 8547: 2-10.