



·激光合束技术·

基于光斑二阶矩的阵列光束倾斜相差自适应控制方法

彭英楠, 胡奇琪, 段佳著, 李大鹏, 田博宇, 赵祥杰, 张大勇

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 针对阵列光束相干合成中存在的倾斜相差大的问题, 提出了基于合成光束远场光斑二阶矩的阵列光束倾斜相差自适应控制方法。以合成光束远场光斑二阶矩作为评价函数, 理论上模拟了采用随机并行梯度下降算法实现 7 路光束的倾斜闭环控制过程。实验上搭建了 7 路光纤激光相干合成系统, 利用自适应光纤准直器对倾斜相差进行校正。以合成光束远场光斑的二阶矩作为评价函数, 采用随机并行梯度下降算法, 实现了 7 路光束的倾斜的闭环控制, 合成光束模拟远场光斑的桶中功率由 0.05 V 提升至 1.95 V。实验中将倾斜扰动的增益系数变为与二阶矩相关的函数, 实现了自适应变增益系数的倾斜闭环, 在一定程度上提升了倾斜控制的带宽。从理论上和实验上验证了基于光斑二阶矩的倾斜相差自适应控制方法在光束合成及合成孔径探测领域应用的可行性。

关键词: 相干合成; 倾斜控制; 光斑二阶矩; 阵列光束; 随机并行梯度下降算法。

中图分类号: O43

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220312

Self-adaptiue tilt control method based on second order moment of beam for laser array

Peng Yingnan, Hu Qiqi, Duan Jiazhu, Li Dapeng, Tian Boyu, Zhao Xiangjie, Zhang Dayong

(Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: Aiming at the problem of tilt control in coherent beam combining of laser array, a tilt control method, of which the evaluation function is based on second order moment of combined laser beam, is proposed. The performances of the tilt control method are investigated theoretically and experimentally. In the theoretical study, adopting the second order moment of the combined beam as the evaluation function, the tilt control process of 7 laser beam is simulated based on stochastic parallel gradient descent algorithm. In the experiments, a coherent beam combining system of 7-channel fiber array is built and an adaptive fiber collimator is used as the tilt-control device. Adopting the stochastic parallel gradient descent algorithm, the closed-loop operation of tilt control is achieved with the second order moment of the combined spot as the evaluation function. The theoretical and experimental results show that the tilt control method based on the second order moment of laser beam has great potential on coherent beam combination.

Key words: coherent beam combining, tilt control, second order moment, beam array, stochastic parallel gradient descent

激光相干合成技术是实现光功率、高光束质量激光输出的重要途径之一, 在工业、科学研究和国防等领域发挥越来越重要的作用^[1]。为实现高效率的相干合成输出, 需要对光束的光程、偏振态、活塞相差和倾斜相差等进行控制。特别是活塞相差和倾斜相差, 需要进行实时闭环校正。目前, 国内外针对相干合成技术的研究主要致力于活塞相差的校正, 并已经采用多种方式实现相位闭环控制^[2-5]。然而实际系统中, 系统内部光学元件的形变和大气湍流等原因会引入倾斜相差, 进而影响相干合成的光束质量和合成效率^[6-7]。当倾斜相差较大时, 阵列光束甚至不

* 收稿日期: 2022-09-29; 修订日期: 2022-11-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61905229 & 61805224);

联系方式: 彭英楠, 244176170@qq.com。

通信作者: 赵祥杰, zxdouble@gmail.com;

张大勇, zdywx1874@sohu.com。

能在目标处重合。因此对于阵列光束合成系统来说,倾斜相差校正不可或缺的一环。目前倾斜相差控制的执行器件主要有液晶材料空间光调制器^[8]、快反镜^[9]和自适应光纤准直器(AFOC)^[10-11]等。与活塞相差控制方法相比,针对相干合成中的倾斜控制算法的报道较少^[12-14]。2013年,王雄等人以高速相机采集的光斑数据,以桶中功率作为性能评价函数,实现了倾斜波前畸变和活塞相位的实时补偿^[15]。同年,耿超等人报道了基于自适应桶中功率评价函数的倾斜、相位控制方法,实现了2路激光的相位、倾斜闭环控制^[16]。采用桶中功率作为评价函数限制其在倾斜相差较大时的应用。当合成光束倾斜相差较大,光束重合度较低时,选取部分区域作为评价函数容易使控制算法陷入局部极值,会导致部分光束不能进入“桶中”,进而降低合成效率。为了解决相干合成系统中倾斜相差大、闭环校正困难的问题,本文提出了一种基于光斑二阶矩的阵列光束倾斜相差自适应控制方法。该方法采用高速 CCD 相机采集合成光束远场光斑分布数据,并计算合成光斑的二阶矩作为评价函数。CCD 相机探测的光斑分布为整个合成光斑,可以避免控制算法陷入局部极值。同时,CCD 相机具有更大的视场,可以大大提高倾斜相差的校正范围。因此基于光斑二阶矩的倾斜相差自适应控制方法在倾斜相差大的场景中具有重要的应用。除了在阵列光束合成方面的应用外,基于光斑二阶矩的倾斜相差自适应控制方法也可用于合成孔径探测系统的倾斜相差校正。本文提出了一种基于光斑二阶矩的倾斜相差自适应控制方法。基于合成光斑二阶矩,理论上模拟了7路光束倾斜闭环控制过程。实验上搭建了7路光纤激光相干合成系统,以合成光斑的二阶矩作为评价函数,采用随机并行梯度下降算法,验证了基于光斑二阶矩的倾斜相差自适应控制方法的可行性。理论与试验结果表明,基于光斑二阶矩的倾斜相差自适应控制方法是一种有效、可行的倾斜控制方法,在光束相干合成及合成孔径探测的领域具有很大的应用潜力。

1 光斑二阶矩

根据 ISO 标准文件^[17],激光光束半径可以采用光轴某一位置处光束截面内光强分布的二阶矩来定义,即

$$\sigma_x^2 = \frac{\iint I(x,y)(x-\bar{x})^2 dx dy}{\iint I(x,y) dx dy} \quad (1)$$

$$\sigma_y^2 = \frac{\iint I(x,y)(y-\bar{y})^2 dx dy}{\iint I(x,y) dx dy} \quad (2)$$

式中: σ_x^2, σ_y^2 为光束在 x 方向和 y 方向的光束半径, $I(x,y)$ 为横截面内坐标为 (x,y) 的点的光强, \bar{x}, \bar{y} 为光束横截面内光强分布的质心坐标,即光斑的一阶矩

$$\bar{x} = \frac{\iint I(x,y)x dx dy}{\iint I(x,y) dx dy} \quad (3)$$

$$\bar{y} = \frac{\iint I(x,y)y dx dy}{\iint I(x,y) dx dy} \quad (4)$$

对于阵列发射相干合成光束来说,光束在远场由于干涉效应存在干涉条纹。本文以阵列光束相干合成系统为例,基于夫朗和费衍射理论,模拟了倾斜相差对远场光斑二阶矩的影响。假设阵列光束为六边形排布,光束数目为7,输出光束的光强分布为高斯分布,阵列光束的孔径占空比为0.5,光束无光程差、活塞相差和高阶像差, x 方向和 y 方向的倾斜相差服从高斯分布,光束传输距离为1 km。图1为倾斜相差的标准差为0、10、20 μrad 和30 μrad 时,远场光斑的分布情况。根据光束二阶矩的定义,计算得到的 x 方向和 y 方向的光束二阶矩如表1所示。从表中可以看出,二阶矩可以反映相干合成光束远场光斑的倾斜相差,二阶矩越小,倾斜相差越小。对于阵列光束发射系统来说,光束在远场的二阶矩参数可以描述光束的重叠程度,即光束的二阶矩越小,光束重合程度越高,光束亮度越高。因此可以将二阶矩作为阵列光束相干合成倾斜控制的评价函数。

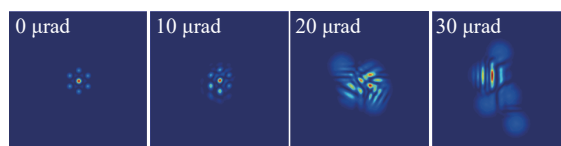


Fig. 1 Far-field spot distribution of coherent beam under different tilt phase error

图1 不同倾斜相差下,阵列光束相干合成远场光斑分布

表 1 不同倾斜相差对应的光斑二阶矩

Table 1 Second order moment of coherent beam under different tilt phase error

tilt phase error (RMS)/ μrad	σ_x/cm	σ_y/cm
0	0.73	0.73
10	0.83	1.04
20	1.60	1.52
30	1.51	2.58

基于光斑二阶矩,理论上模拟了阵列光束非相干合成输出时的倾斜闭环控制过程。在平面内生成7路光束,单路光束光强分布为高斯分布,位置随机分布,如图2(a)所示。假设目标中心点 m 的坐标为(0,0),以光斑二阶矩作为评价函数,采用SPGD算法使7路光束重合于目标中心点 m 。倾斜闭环后7路光束在 m 点处完全重合,其光斑分布如图2(b)所示。倾斜闭环控制过程中光斑二阶矩的变化情况如图3所示,光斑二阶矩的值不断减小直至稳定。通过理论模拟可以看出,即使光斑完全不重合的条件下,采用基于光斑二阶矩的倾斜相差自适应控制方法也可以在较少的迭代步数内实现光束的倾斜闭环控制。

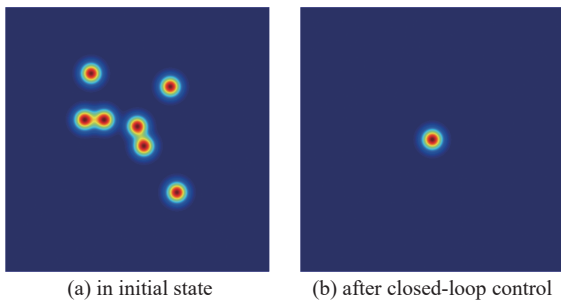


Fig. 2 Beam distribution of simulated tilt control process
图 2 7路光束倾斜控制过程中光斑分布

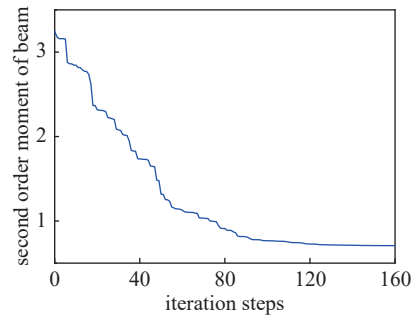


Fig. 3 Variation of second order moment of spot in tilt control process
图 3 倾斜闭环过程中光斑二阶矩的变化

2 实验装置

为了验证基于光斑二阶矩的倾斜相差自适应控制方法,本文搭建了7路光纤激光相干合成系统,如图4所示。种子光源为窄线宽光纤激光,经 1×7 的分束器(BS)分为7束,每路子束分别经过相位调制器(PM),最后通过自适应光纤准直器(AFOC)发射。实验中采用透镜模拟远场,经透镜聚焦后的光束被分光镜(BS)分为2束,反射光进入光电探测器(PD),作为相位控制的反馈信号;透射光进入CCD相机,作为倾斜控制的反馈信号。

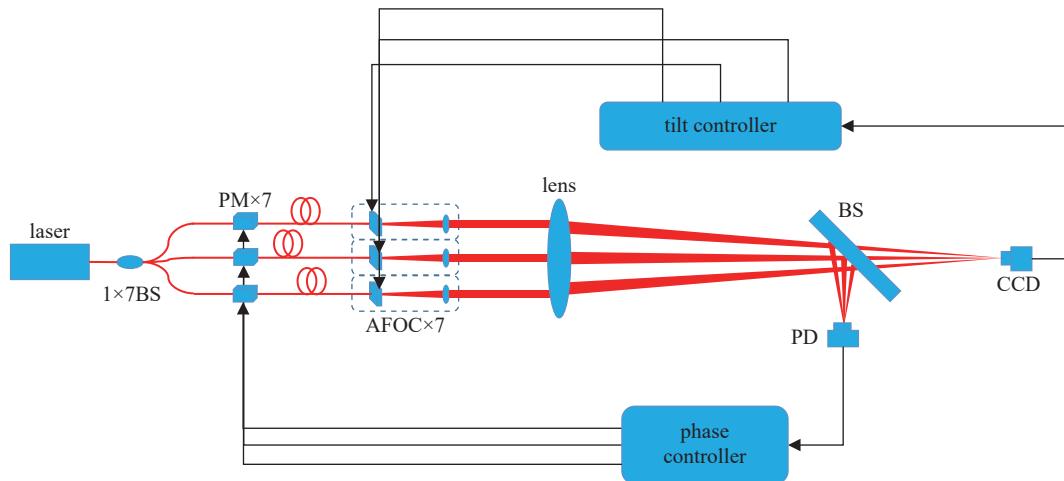


Fig. 4 Coherent beam combining system of 7-channel fiber laser array
图 4 7路光纤激光相干合成系统

实验中的相位控制是基于小孔探测器实现的,采用 LiNO_3 电光调制器作为相位控制的执行器件,其响应频率为1 GHz。倾斜控制采用CCD相机探测的光斑二阶矩作为评价函数,采用AFOC作为倾斜控制的执行器件,通过

驱动压电陶瓷调整发射端帽的水平和竖直方向的位移,实现对发射光束的倾斜控制。

对于相干合成系统,相位变化会导致光斑分布发生变化,使得远场光斑的二阶矩会随相位发生变化,进而影响倾斜闭环控制过程,因此闭环控制过程中相位需要保持稳定。实验中采用 SPGD 算法对相位进行闭环控制,且相位闭环的控制带宽要远高于倾斜闭环的控制带宽,使得倾斜闭环控制过程中相位保持稳定。倾斜闭环实验中采用 SPGD 算法对光束的倾斜进行闭环控制,将目标中心点定为相机的中心。采用 CCD 相机的灰度值 G_i 表征强度分布,则 x 方向和 y 方向的光斑二阶矩的计算公式变为

$$\sigma_x^2 = \frac{\sum G_i x_i^2}{\sum G_i} \quad (5)$$

$$\sigma_y^2 = \frac{\sum G_i y_i^2}{\sum G_i} \quad (6)$$

实验中采用光斑二阶矩作为评价函数,其 x 方向和 y 方向光斑的平均直径 M 定义为

$$M = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (7)$$

其工作流程如下:当光斑距离较远不存在干涉现象时,主要是倾斜闭环发挥作用,使光斑不断向质心聚集;当光斑距离较近,光斑间的干涉导致光斑分布不断变化,进而导致光斑的二阶矩发生变化,此时相位闭环发挥作用,使光斑分布保持稳定。在光斑分布稳定的条件下,倾斜闭环继续发挥作用,直至光斑的二阶矩最小。

3 实验结果

实验中采用 CCD 相位探测光斑的二阶矩,CCD 相机的帧频为 30 Hz,像元大小为 $15 \mu\text{m}$,像元个数为 1024×1024 。为了降低背景光的噪声,相机的曝光时间设置为 2 ms,阈值为 128。实验初始状态人为施加了倾斜相差。首先开启相位闭环,此时 CCD 相机探测到的光斑分布如图 5(a)所示,经计算其二阶矩 M 值为 14.8。开启倾斜闭环,光斑的重合度不断提高,倾斜闭环后的光斑分布如图 5(b)所示,经计算其二阶矩的值为 10.5。倾斜闭环过程中,CCD 相机探测的光斑二阶矩的变化如图 6 所示,从图中可以看出,光斑二阶矩的值不断减小,直至最后达到稳定。

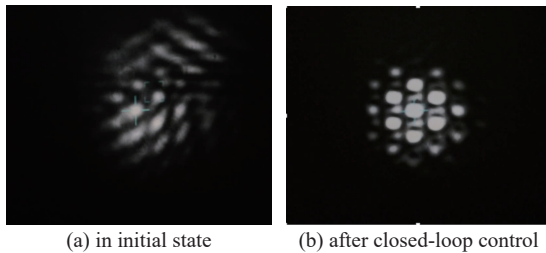


Fig. 5 Spot distribution of experimental tilt control process
图 5 倾斜控制过程中远场光斑分布

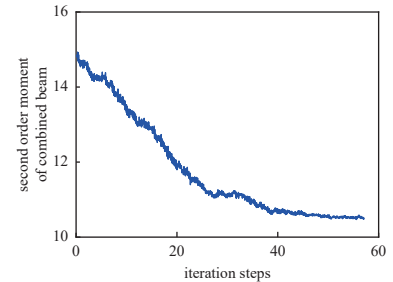


Fig. 6 Variation of second order moment of spot in tilt closed-loop
图 6 倾斜闭环过程中光斑二阶矩的变化

实验中在 CCD 相机共轭的位置放置小孔光电探测器,用来监测相干合成过程中主瓣能量的变化情况。PD 记录了从初始状态,相位闭环,倾斜闭环的全过程能量变化,如图 7 所示。从图中可以看出,在相位闭环初期,由于光斑存在较大的倾斜相差,导致 PD 内桶中功率的能量较低;随着倾斜闭环的开启 PD 探测器内的能量不断升高,最后直至稳定。

为了进一步提升倾斜控制算法的带宽,实验中采用了可变增益系数,即倾斜补偿增益系数与光斑实时二阶矩相关,其定义为

$$\gamma(J) = \left(\frac{J_+ + J_-}{C} \right)^N \quad (8)$$

式中: J_+ 为施加正向扰动时光斑二阶矩的值, J_- 为施加负向扰动时光斑二阶矩的值, C 为常数, N 为可调系数。实验中选取了 $N=0$ 、 $N=1$ 和 $N=1.8$ 时进行测试,不同增益条件下光斑二阶矩的变化如图 8 所示。从图中可以看出,采用

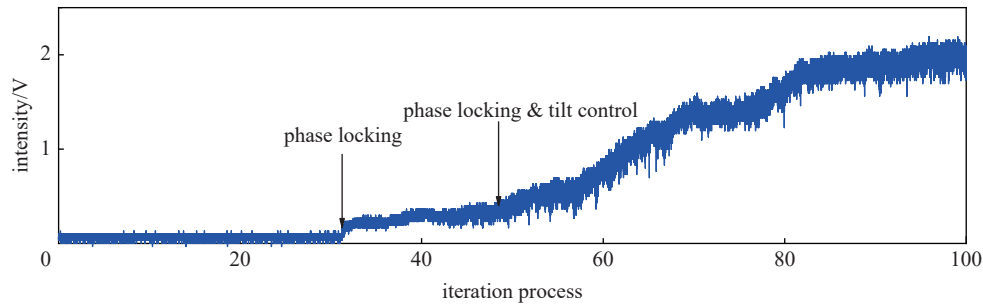


Fig. 7 Variation of power in the bucket in phase and tilt control process

图7 相位、倾斜闭环过程中, PD内桶中功率的变化情况

变增益的方式可以实现倾斜控制带宽的提升。

4 结论

本文针对阵列光束相干合成中存在的倾斜相差大的问题,提出了基于光斑二阶矩的阵列光束倾斜相差自适应控制方法。该方法采用 CCD 相机作为探测器件,具有控制范围广、控制效果直观的优势,可以有效避免控制算法陷入局部极值的情况。本文从理论和实验上分别验证了于光斑二阶矩的阵列光束倾斜相差自适应控制方法的可行性。实验上搭建了 7 路光纤激光相干合成系统,采用随机并行梯度下降算法,基于合成光束模拟远场的光斑二阶矩实现了 7 路光束的倾斜闭环控制,大大提升了合成效率。除此之外,实验中将倾斜扰动的增益系数变为与二阶矩相关的函数,实现了自适应变增益系数的倾斜闭环,在一定程度上提升了倾斜控制的带宽。理论与试验结果表明,基于光斑二阶矩的倾斜相差自适应控制方法是一种有效、可行的倾斜控制方法,在光束相干合成及合成孔径探测的领域具有很大的应用潜力。

参考文献:

- [1] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(11): B63-B92.
- [2] Augst S J, Ranka J K, Fan T Y, et al. Beam combining of ytterbium fiber amplifiers[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2007, 24(8): 1707-1715.
- [3] Zhou Pu, Ma Yanxing, Wang Xiaolin, et al. Coherent beam combination of three two-tone fiber amplifiers using stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(19): 2939-2941.
- [4] Ma Yanxing, Wang Xiaolin, Leng Jinyong, et al. Coherent beam combination of 1.08 kW fiber amplifier array using single frequency dithering technique[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(6): 951-953.
- [5] Thielen P A, Ho J G, Burchman D A, et al. Two-dimensional diffractive coherent combining of 15 fiber amplifiers into a 600 W beam[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(18): 3741-3743.
- [6] 黄智蒙, 唐选, 刘仓理, 等. 倾斜相差对大阵列光纤相干合成的影响与分析[J]. *中国激光*, 2015, 42: 1102003. (Huang Zhimeng, Tang Xuan, Liu Cangli, et al. Analysis of influence of tip/tilt phase error on a large scale coherent beam combination of fiber laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42: 1102003)
- [7] 耿超, 李新阳, 张小军, 等. 倾斜相差对光纤激光相干合成的影响与模拟校正[J]. *物理学报*, 2011, 60: 114202. (Geng Chao, Li Xinyang, Zhang Xiaojun, et al. Influence and simulated correction of tip/tilt phase error on fiber laser coherent beam combination[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60: 114202)
- [8] Johansson M, Hård S, Robertson B, et al. Adaptive beam steering implemented in a ferroelectric liquid-crystal spatial-light-modulator free-space, fiber-optic switch[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(23): 4904-4911.
- [9] 郑轶, 王晓华, 沈锋, 等. 基于能动分块反射镜的七路激光阵列倾斜校正与相干合成实验研究[J]. *中国激光*, 2011, 38: 0802009. (Zheng Yi, Wang Xiaohua, Shen Feng, et al. Tip-tilt correction and coherent combination of seven-channel laser array based on active segmented mirrors[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38: 0802009)
- [10] Liu Ling, Vorontsov M A, Polnau E, et al. Adaptive phase-locked fiber array with wavefront phase tip-tilt compensation using piezoelectric fiber positioners[C]//Proceedings of SPIE 6708, Atmospheric Optics: Models, Measurements, and Target-in-the-Loop Propagation. 2007.
- [11] Beresnev L A, Vorontsov M A. Design of adaptive fiber optics collimator for free-space communication laser transceiver[C]//Proceedings of SPIE 5895,

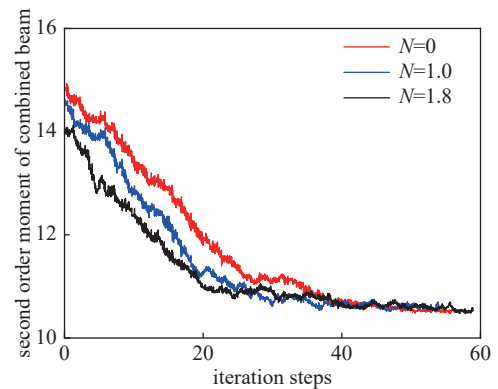


Fig. 8 Variation of second order moment of spot under different gain parameter

图8 不同变增益下, 光斑二阶矩的变化情况

Target-in-the-Loop: Atmospheric Tracking, Imaging, and Compensation II. 2005.

- [12] 王雄, 王小林, 周朴, 等. 光纤激光相干合成中倾斜波前控制的研究进展[J]. 中国激光, 2012, 39: s101001. (Wang Xiong, Wang Xiaolin, Zhou Pu, et al. Recent research and development of tilt-tip wavefront control in coherent beam combination of fiber lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39: s101001)
- [13] Wang Xiong, Wang Xiaolin, Zhou Pu, et al. Numerical simulation of tilt-tip control in coherent beam combining using SPGD algorithm[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 48: 343-350.
- [14] Li Feng, Geng Chao, Huang Guan, et al. Experimental demonstration of coherent combining with tip/tilt control based on adaptive space-to-fiber laser beam coupling[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9: 7102812.
- [15] Wang Xiong, Wang Xiaolin, Zhou Pu, et al. Coherent beam combination of adaptive fiber laser array with tilt-tip and phase-locking control[J]. Chinese Physics B, 2013, 22: 024206.
- [16] 耿超, 罗文, 谭毅, 等. 基于自适应桶中功率评价函数的光纤放大器相干合成实验研究[J]. 物理学报, 2013, 62: 224202. (Geng Chao, Luo Wen, Tan Yi, et al. Experimental study on coherent beam combination of fiber amplifiers using adaptive power-in-the-bucket cost function[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62: 224202)
- [17] ISO 11146-2:2021, Lasers and laser-related equipment — Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios[S].