

## 激光与光电子学进展

## 平面波前畸变量对激光相干合成效率的影响(特邀)

张豪<sup>1,2</sup>, 亢兴旺<sup>1,3</sup>, 刘阳<sup>4</sup>, 关美玲<sup>1</sup>, 温勤<sup>1</sup>, 钟兴林<sup>2</sup>, 王花花<sup>5</sup>, 伍剑<sup>2</sup>, 高禄<sup>5</sup>, 张泽<sup>1,2,4,6\*</sup><sup>1</sup>中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;<sup>2</sup>北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876;<sup>3</sup>中国科学院大学光电学院, 北京 100049;<sup>4</sup>齐鲁空天信息研究院, 山东 济南 250101;<sup>5</sup>中国地质大学(北京)数理学院, 北京 100083;<sup>6</sup>中国科学院计算光学成像技术重点实验室, 北京 100094

**摘要** 激光相干合成技术是在遥感和通信等领域中能够同时提升激光功率和保持光束质量的有效技术。其中填充因子是影响激光相干合成和衡量相干合成阵列的重要因素。然而,它却不是完备的。因此,提出采用平面波前畸变量(PWD)作为评估激光相干合成性能的综合参数,该参数综合考虑了光束质量、阵列对准、元件制造误差以及其他因素。通过理论推导平面波前畸变量的表达式,分析该参数对系统合成效率的影响,进一步的仿真和实验测量结果表明,平面波前畸变量可以用于反映激光相干合成的综合效率高,与桶中功率呈负相关。研究结果表明波阵面调制相干光束组合技术在多孔径激光阵列相干组合系统的实际应用中具有潜在的科学研究价值。

**关键词** 相干合成; 填充因子; 桶中功率; 激光阵列; 波前

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232671

## Plane Wavefront Distortion and Its Effect on Laser Coherent Synthesis Efficiency (Invited)

Zhang Hao<sup>1,2</sup>, Kang Xingwang<sup>1,3</sup>, Liu Yang<sup>4</sup>, Guan Meiling<sup>1</sup>, Wen Qin<sup>1</sup>, Zhong Xinglin<sup>2</sup>, Wang Huahua<sup>5</sup>, Wu Jian<sup>2</sup>, Gao Lu<sup>5</sup>, Zhang Ze<sup>1,2,4,6\*</sup><sup>1</sup>Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;<sup>2</sup>School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;<sup>3</sup>School of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;<sup>4</sup>Qilu Aerospace Information Research Institute, Jinan 250101, Shandong, China;<sup>5</sup>School of Science, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;<sup>6</sup>Key Laboratory of Computational Optical Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

**Abstract** Laser coherent synthesis is an effective technique for enhancing laser power and maintaining beam quality in fields such as remote sensing and communication. The filling factor affects laser coherent synthesis and plays a critical role in assessing coherent synthesis arrays. However, it is not a comprehensive factor. Accordingly, this study introduces plane wavefront distortion (PWD) as an integrated parameter for evaluating the performance of laser coherent synthesis. PWD simultaneously considers factors such as beam quality, array alignment, and component manufacturing errors. Based on the theoretical derivation of the expression for PWD and analysis of its effect on the efficiency of the system, simulations and experimental measurements demonstrate that PWD can be used to reflect the overall efficiency of laser coherent synthesis, exhibiting a negative correlation with it. The findings offer scientific value for the practical application of wavefront modulation techniques in coherent beam combinations in multi-aperture laser array coherent combination systems.

**Key words** coherent synthesis; filling factor; power in bucket; laser array; wavefront

收稿日期: 2023-12-14; 修回日期: 2024-02-28; 录用日期: 2024-03-07; 网络首发日期: 2024-03-13

基金项目: 国家自然科学基金(62105341, 12074350)、山东省自然科学基金(ZR2021QF126)

通信作者: \*zhangze@aircas.ac.cn

# 1 引言

随着激光技术在遥感、通信等领域中的应用日渐广泛,人们对高功率激光器的需求也日益增加。然而,在单个激光器功率提升困难的情况下<sup>[1]</sup>,对多束激光进行相干合成成为同时提升激光功率和保持光束质量的有效技术途径<sup>[2-7]</sup>。通过控制各路激光的参量和激光阵列的填充孔径大小,实现激光阵列的同相位、高占空比输出,达到提升激光阵列亮度的目的。目前,人们一直采用填充因子作为描述激光相干合成效率的影响因素<sup>[8-15]</sup>。准直器<sup>[16-18]</sup>和微透镜阵列<sup>[19-20]</sup>等均是提高系统的填充因子进而获得较高的激光相干合成效率,且使用了透射元件。2011年,美国麻省理工学院 Yu 等<sup>[19]</sup>利用微透镜阵列,实现了 8 路光纤激光的相干合成,总输出功率达到 4 kW,最高输出功率的合成光束填充因子约为 0.6。此外,还有使用反射元件进行光束拼接的方法,如分立反射镜拼接<sup>[21-22]</sup>、圆台棱锥拼接<sup>[23]</sup>、台阶状光束拼接<sup>[24]</sup>等。中国科学院上海光学精密机械研究所薛宇豪等<sup>[22]</sup>利用分立反射镜拼接的方案,实现 4 路光束的相干合成,总输出功率为 1062 W。无论是透射元件还是反射元件均是通过改变光束间距或光束横截面积来改变填充因子,从而提高激光相干合成的效率。然而,人们在不断深入的研究中发现,单一的填充因子参量并不能完备地描述激光相干合成效率,通常还需要考虑阵元间距或者光束发射口径等影响因素<sup>[9]</sup>。此外,进一步的研究表明除了填充因子、光束发射口径和阵元间距外,激光的光束质量、波前畸变等因素也会影响激光相干合成的效率<sup>[25-26]</sup>。因此,激光相干合成系统的完备参数是亟待研究的重要内容,对激光相干合成系统的表征和技术提升具有重要的科学意义和应用价值。

本文提出了平面波前畸变量(Plane wavefront distortion, PWD)的概念,并通过理论解析、仿真计算和实验测量分别研究了平面波前畸变量与激光相干合成效率的关系。研究表明平面波前畸变量可以作为描述影响激光相干合成效率的完备参量。

## 2 理论分析

### 2.1 平面波前畸变量的定义与计算

平面波前畸变量定义为各子阵列激光传输相遇时,其波前偏离理想平面波的总量。在图 1 中,以 4 个子光束激光阵列为例,阴影部分的面积  $S$  表示平面波前畸变量的大小。在实际应用中,该定义适用于任意数量和形式的一维和二维激光束相干合成阵列。

平面波前畸变量通常与光束口径、阵元间距、排布方式、光束质量等因素有关。假设各阵元激光为理想高斯激光束,激光阵列外接圆半径为  $R$ ,因此定义总发射口径为  $2R$ 。每个子高斯光束的束腰半径为  $\omega_0$ ,子光束间距为  $d$ ,子光束相遇的位置为  $z_0$ ,此处波前曲率半

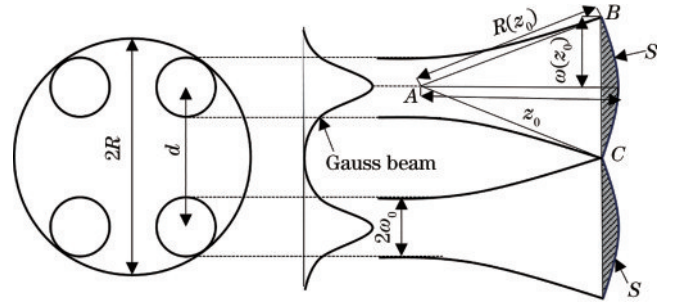


图 1 高斯激光阵列传输示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Gaussian laser array transmission

径为  $R(z_0)$ 。在近似条件下,高斯光束的波前是变心球面波,其波前曲率的圆心并不在光束束腰中心。

平面波前畸变量的大小为阴影部分面积  $S$ ,可由扇形  $ABC$  的面积减去三角形  $ABC$  的面积求得

$$S = R^2(z_0) \arcsin \frac{d}{2R(z_0)} - \sqrt{R^2(z_0) - \left(\frac{d}{2}\right)^2} \cdot \frac{d}{2}, \quad (1)$$

根据高斯光束的性质可知,光束在  $z_0$  处的束腰半径为

$$\omega(z_0) = \sqrt{\omega_0^2 + \frac{\lambda^2 z_0^2}{\pi^2 \omega_0^2}} = \frac{d}{2}, \quad (2)$$

式中  $\lambda$  为激光波长。由式(2)可求得

$$z_0 = \frac{\pi \omega_0 \sqrt{d^2 - 4\omega_0^2}}{2\lambda}, \quad (3)$$

$z_0$  处的波前曲率半径可以写为

$$R(z_0) = z_0 \left[ 1 + \left( \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda z_0} \right)^2 \right] = \frac{\pi \omega_0}{2\lambda} \left( \sqrt{d^2 - 4\omega_0^2} + \frac{4\omega_0^2}{\sqrt{d^2 - 4\omega_0^2}} \right), \quad (4)$$

则可得  $S$  表达式为

$$S = \frac{\pi^2 \omega_0^2 d^4}{4\lambda^2 (d^2 - 4\omega_0^2)} \arcsin \frac{\lambda \sqrt{d^2 - 4\omega_0^2}}{\pi \omega_0 d} - \frac{d}{4\lambda \sqrt{d^2 - 4\omega_0^2}} \sqrt{\pi^2 \omega_0^2 d^4 - \lambda^2 d^4 + 8\lambda^2 d^2 \omega_0^2}. \quad (5)$$

由式(5)可知,  $S$  与  $\omega_0$  和  $d$  相关,对于每种确定的阵列排布,在已知子光束束腰半径与间距的情况下即可求得唯一的平面波前畸变量。

在光束质量不理想的情况下,光束质量也会影响平面波前畸变量  $S$ ,不同光束质量的高斯光束在  $z_0$  处的光束半径为

$$\omega(z_0) = \omega_0 \sqrt{1 + \left( \frac{\lambda M^2}{\pi \omega_0^2} z_0 \right)^2}, \quad (6)$$

式中  $M^2$  表示光束质量因子。波前在  $z_0$  处的曲率半径为

$$R(z_0) = z_0 \left[ 1 + \left( \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda M^2 z_0} \right)^2 \right]. \quad (7)$$

将上式代入式(5)。则  $S$  的表达式可写为

$$S = \frac{\pi^2 \omega_0^2 d^4 \arcsin \frac{M^2 \lambda \sqrt{d^2 - 4\omega_0^2}}{\pi \omega_0 d}}{4\lambda^2 (M^2)^2 (d^2 - 4\omega_0^2)} - \frac{d \sqrt{\pi^2 \omega_0^2 d^4 - \lambda^2 d^4 (M^2)^2 + 8\lambda^2 d^2 \omega_0^2 (M^2)^2}}{4\lambda M^2 \sqrt{d^2 - 4\omega_0^2}} \quad (8)$$

### 2.2 仿真计算结果

仿真计算中子光束数量  $N$  分别设为  $2 \times 2$ 、 $3 \times 3$ 、 $4 \times 4$ ，每种排布在保持阵列外径不变的情况下，通过改变子光束的束腰半径  $\omega_0$  改变平面波前畸变量。仿真参数设置波长为 480 nm，光束发射口径为 2 cm，传输距离为 1 km。

一般情况下研究者使用桶中功率 (Power in bucket, PIB)<sup>[27-29]</sup> 来计算激光相干合成效率，因为桶中功率可以直观地体现远场的能量集中度，其定义为

$$P_{\text{PIB}} = \frac{\iint_{\pi r^2} I(x, y)}{\iint_{\infty} I(x, y)} \quad (9)$$

式中： $r$  是圆形桶的半径； $I(x, y)$  是远场的光强分布； $x$  和  $y$  是远场的横截面坐标。桶中功率范围为  $0 \sim 1$ 。PIB 值越大，说明合成光束的质量越好，相干合成效率越高。通常选择  $r = 1.22\lambda z / (2R)$ ，即半径为  $R$  的圆孔在远场  $z$  处的艾里斑半径。

仿真结果如图 2 所示。子光束数量  $N$  为  $2 \times 2$ ，子光束为高斯光束，束腰半径  $\omega_0$  分别为 2.0、2.5、3.0 mm，其平面波前畸变量  $S$  分别为  $3.05 \times 10^{-9}$ 、 $1.32 \times 10^{-9}$ 、 $7.97 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ 。图 2(a1)~(a3) 为激光阵列在近场的光强分布，其光束发射口径 (图中虚线圆圈) 保持一致，均为 2 cm。光束阵列传输到  $z_0$  处，子光束彼此相遇，如图 2(b1)~(b3) 所示。图 2(c1)~(c3)

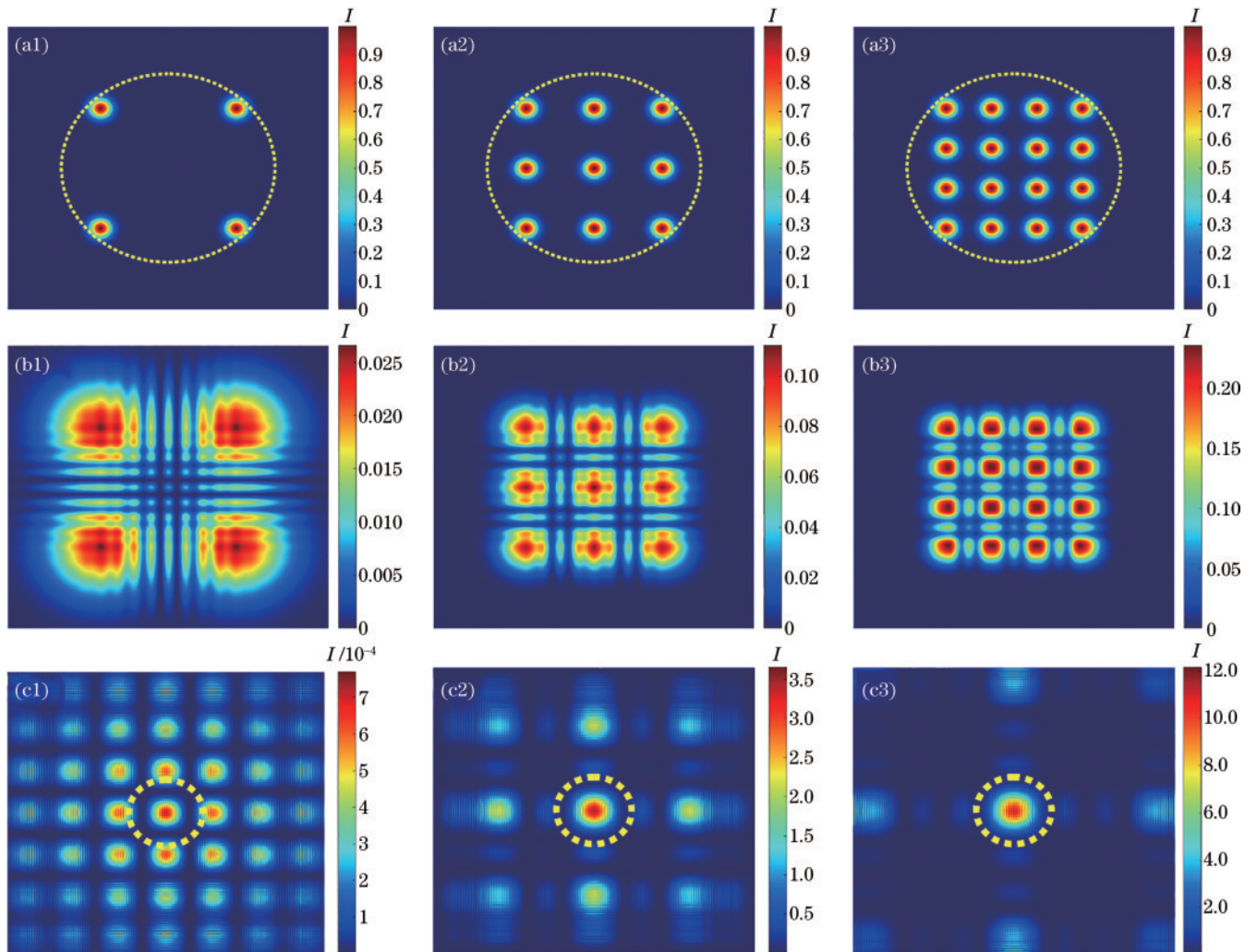


图 2 激光阵列子光束数量分别为  $2 \times 2$ 、 $3 \times 3$ 、 $4 \times 4$  的仿真结果。(a1)~(a3) 激光阵列在  $z=0 \text{ m}$  处的仿真图样，圆圈代表阵列的外接圆；(b1)~(b3) 激光阵列在  $z=z_0$  处的衍射图样， $z_0$  为激光阵列相邻光束相遇的位置；(c1)~(c3) 激光阵列在  $z=1 \text{ km}$  处的衍射图样，圆圈代表圆形桶

Fig. 2 Simulation results of number of sub-beams in laser array is  $2 \times 2$ ,  $3 \times 3$ ,  $4 \times 4$ , respectively. (a1)~(a3) Near-field simulation patterns of laser arrays, and circle represents circumscribed circle of array; (b1)~(b3) diffraction patterns of laser arrays at  $z=z_0$ , and  $z_0$  is position where adjacent beams of laser arrays meet; (c1)~(c3) diffraction patterns of laser arrays at 1 km, and circle represents round barrel

是光束阵列传输到 1 km 处光束横截面图样,图中的圆圈为“桶”的范围,桶中的能量与整个平面能量相比可得到桶中功率。子光束的束腰半径  $\omega_0$  为 3 mm 时,远场中心光强最高,旁瓣也最少,相干合成效率最高,其对应的平面波前畸变量  $S$  也最小。

子光束数量分别为  $2 \times 2$ 、 $3 \times 3$ 、 $4 \times 4$  的情况下,平面波前畸变量  $S$  与桶中功率  $P_{\text{PB}}$  的关系曲线如图 3(a) 所示。图 3 中曲线显示  $S$  越大,相应的相干合成效率

越低。这表明,当激光阵列排布相同且阵列出射口径相同时,以平面波前畸变量作为相干合成效率的影响因素是可行的。图 3(b) 则显示了更多不同子光束数量的情况,在仅保持阵列出射口径一致、其余量均为变量的情况下,其桶中功率与平面波前畸变量总体的趋势是呈负相关的。这表明仅当阵列出射口径相同时,用平面波前畸变量作为描述激光相干合成效率的完备参量是可行的。

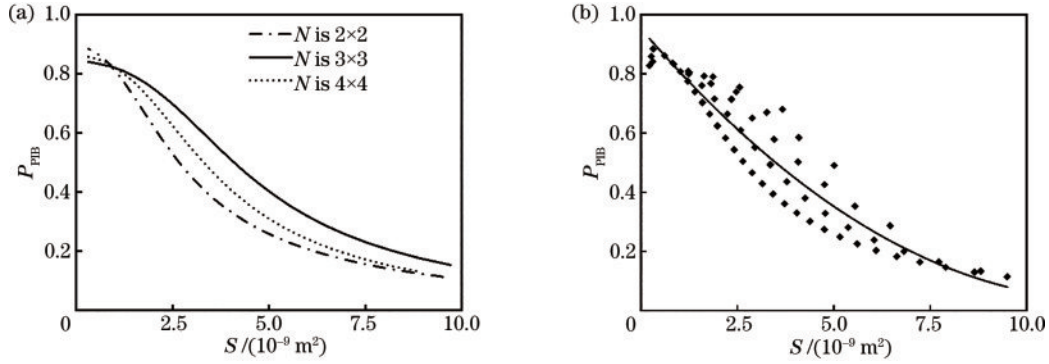


图 3  $P_{\text{PB}}$  与  $S$  的关系。(a)子光束数量分别为  $2 \times 2$ 、 $3 \times 3$ 、 $4 \times 4$ ; (b)子光束数量不同的多种情况,点表示模拟结果,曲线表示拟合结果  
Fig. 3 Relationship between  $P_{\text{PB}}$  and  $S$ . (a) Number of sub-beams is  $2 \times 2$ ,  $3 \times 3$ ,  $4 \times 4$ , respectively; (b) multiple situations with different numbers of sub-beams, points represent simulation results and curves represent fitting results

高斯光束通过不同大气相干长度的相位屏传输一段距离后,其平面波前畸变量  $S$  值如表 1 所示。在仿真模拟中,高斯光束的波长为 480 nm,传输距离为 1.5 m,大气相干长度  $r_0$  分别为 0.10 m、0.15 m 和无穷大。通过设置不同大气相干长度的相位屏来模拟一定强度下的大气湍流,计算出光束质量。分析仿真数据,可以得出随着光束质量的不断下降,其平面波前畸变量  $S$  在不断变大。

平面波前畸变量  $S$  与光束质量因子  $M^2$  和大气相干长度  $r_0$  的对应关系曲线如图 4 所示。图 4(a) 表明光束质量因子  $M^2$  越大,光束质量越差,其平面波前畸变

表 1  $S$  随  $r_0$  和  $M^2$  的变化情况  
Table 1 Variation of  $S$  with  $r_0$  and  $M^2$

$\omega_0 / \text{mm}$	$r_0 / \text{m}$	$M^2$	$S / \text{m}^2$
0.3	$\infty$	1.000	$1.981 \times 10^{-7}$
	0.15	1.364	$5.028 \times 10^{-7}$
	0.10	1.476	$6.371 \times 10^{-7}$
0.5	$\infty$	1.000	$4.280 \times 10^{-8}$
	0.15	1.930	$3.077 \times 10^{-7}$
	0.10	2.304	$5.234 \times 10^{-7}$
0.7	$\infty$	1.000	$1.560 \times 10^{-8}$
	0.15	2.855	$3.630 \times 10^{-7}$
	0.10	4.591	$1.509 \times 10^{-6}$

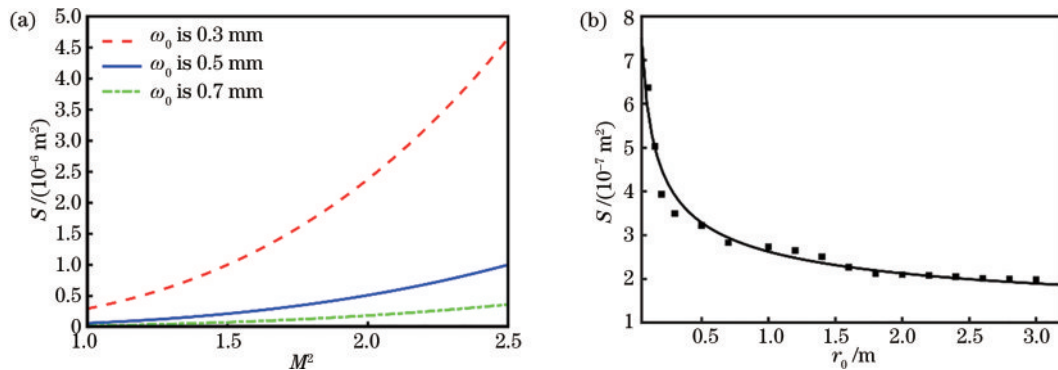


图 4  $S$  与光束质量因子  $M^2$  和大气相干长度  $r_0$  的关系。(a)对于束腰半径分别为 0.3、0.5、0.7 mm 的高斯光束, $S$  随不同光束质量因子  $M^2$  变化的仿真结果;(b)对于束腰半径为 0.3 mm 的高斯光束, $S$  随不同大气相干长度  $r_0$  变化的仿真结果,点表示模拟结果,曲线表示拟合结果  
Fig. 4  $S$  versus beam quality factor  $M^2$  and atmospheric coherence length  $r_0$ . (a) Simulation results of  $S$  varying with different beam quality factors  $M^2$  for Gaussian beam with waist radius of 0.3, 0.5, and 0.7 mm, respectively. (b) simulation results of  $S$  varying with different atmospheric coherence lengths  $r_0$  with waist radius of 0.3 mm, and points represent simulation results and curves represent fitting result

Fig. 4  $S$  versus beam quality factor  $M^2$  and atmospheric coherence length  $r_0$ . (a) Simulation results of  $S$  varying with different beam quality factors  $M^2$  for Gaussian beam with waist radius of 0.3, 0.5, and 0.7 mm, respectively. (b) simulation results of  $S$  varying with different atmospheric coherence lengths  $r_0$  with waist radius of 0.3 mm, and points represent simulation results and curves represent fitting result

量  $S$  也越大。图 4(b) 中的曲线呈现出  $S$  随着  $r_0$  的增加而减小的趋势。所以,  $S$  的增大代表着光束质量变差和大气湍流带来的波前畸变的对激光相干合成的影响加重。因此, 在考虑光束质量和波前畸变的影响下, 采用平面波前畸变量  $S$  作为综合参数来评估相干光束合成性能的方法是可行的。

### 3 实验结果

实验设置中, 采用扩束的高斯激光照射孔径掩模板来模拟高斯激光相干合成阵列。为了使各个子孔径的输出光强均匀, 高斯激光束腰半径扩大为 10 cm, 选取距光束中心约 2 cm 的部分照射在孔径掩模板上。孔径掩模的小孔直径分别为 2.0、2.5、3.0 mm, 孔径数量分别为  $2 \times 2$ 、 $3 \times 3$  和  $4 \times 4$ , 孔径掩模版的通光部分的直径为 2 cm。宽束腰光束通过不同的孔径掩模可得到不同的激光阵列。需要说明的是, 此时传播距离仅为 28 m, 远场桶半径的表达式  $r = 1.22\lambda z / (2R)$  不再适用, 将圆形桶的半径选择为以  $R$  为束腰半径的高斯光束在 28 m 处的光束半径, 即  $r = R \sqrt{1 + (\lambda z / \pi R^2)^2}$ 。

仿真与实验结果见图 4(a1)~(c3), 所有的光强分布均作归一化处理。图 4(a1)~(a3) 为仿真的初始光

强分布, 子光束数量分别为  $2 \times 2$ 、 $3 \times 3$  和  $4 \times 4$ , 为了与实验对应, 每个子光束均设置为振幅相同、半径一致的平顶光束, 由式(5)计算得其平面波前畸变量分别为  $1.66 \times 10^{-8}$ 、 $8.96 \times 10^{-9}$ 、 $6.58 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ 。随着子光束数量的增多, 平面波前畸变量也会随之减小。图 4(b1)~(b3) 为激光阵列传输 28 m 的仿真结果, 对应的 PIB 分别为 0.63、0.81、0.86。图 4(c1)~(c3) 为实验中在 28 m 处采集的光斑, 圆圈表示“桶”的范围, 根据式(6)计算得到的 PIB 分别为 0.59、0.76、0.89。从图 4(b1)~(b3) 与 (c1)~(c3) 的光强分布可看出仿真计算与实验测量结果一致, 计算得到的 PIB 差距低于 5%。随着子光束数量的增加, 平面波前畸变量也逐渐减小, 在 28 m 处的“桶”中的部分也越多, 合成效率也越高。

图 4(d) 中, 三角形点代表实验结果, 曲线为仿真结果的拟合曲线, 因此实验结果与仿真计算结果相符合。实验结果与图 3(b) 所示的理论计算结果均显示在相同阵列出射口径情况下, 桶中功率与平面波前畸变量呈负相关。实验证明, 当阵列出射口径相同时, 以平面波前畸变量作为描述激光相干合成效率的完备参量是可行的。

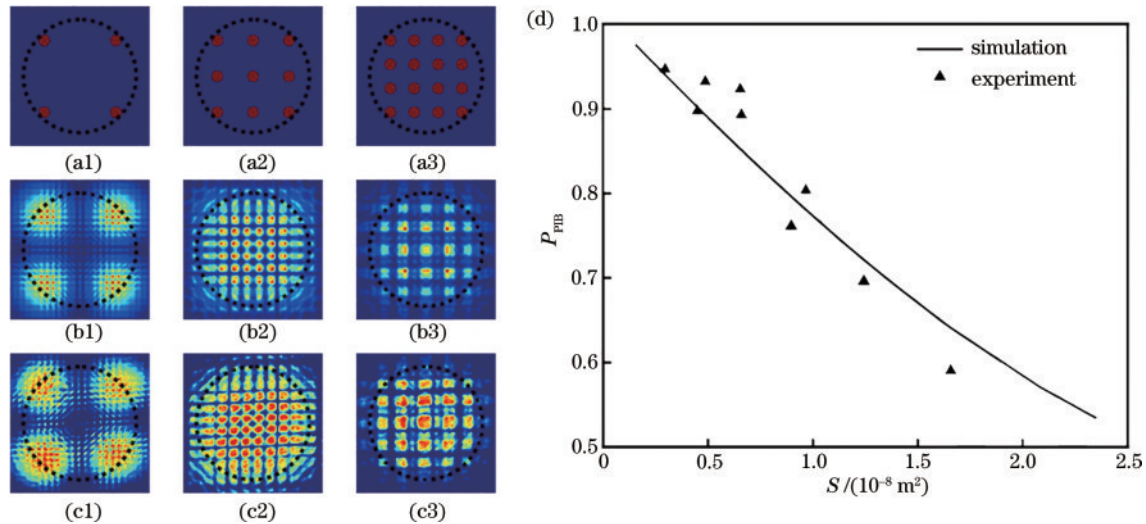


图 5  $\omega_0 = 1 \text{ mm}$  时, 子光束数量不同的激光阵列的光强分布及  $P_{\text{PIB}}$  与  $S$  的关系曲线。(a1)~(a3)  $z = 0 \text{ m}$  时的光强分布 (模拟结果), 圆圈表示阵列的外接圆; (b1)~(b3)  $z = 28 \text{ m}$  时的光强分布 (模拟结果), 圆圈表示圆形桶; (c1)~(c3)  $z = 28 \text{ m}$  时的实验光强分布, 圆圈表示圆形桶; (d)  $P_{\text{PIB}}$  与  $S$  的关系

Fig. 5 Intensity distribution of laser arrays with different numbers of sub-beams and relationship curve between  $P_{\text{PIB}}$  and  $S$  when  $\omega_0 = 1 \text{ mm}$ . (a1)–(a3) Light intensity distribution (simulation results) at  $z = 0 \text{ m}$ , circle represents circumscribed circle of array; (b1)–(b3) light intensity distribution at  $z = 28 \text{ m}$  (simulation results), circle represents circular barrel; (c1)–(c3) experimental light intensity distribution at  $z = 28 \text{ m}$ , circle represents circular barrel; (d) relationship between  $P_{\text{PIB}}$  and  $S$

### 4 结 论

提出了平面波前畸变量的概念, 并通过理论分析及对激光阵列进行量化获得了相应的表达式, 进而通过仿真计算和实验测量研究平面波前畸变量对激光相干合成效率的影响。实验测量结果与理论分析一致, 表明

平面波前畸变量与激光相干合成效率呈负相关, 这说明以平面波前畸变量来判断激光相干合成效率的方法具有可行性。因此, 平面波前畸变量可以作为设计、分析或优化激光束相干组合系统的有效参数。平面波前畸变量的概念还可以在激光相干组合技术中得到很好的应用, 并为评估特定的激光相干组合阵列带来便利。

## 参 考 文 献

- [1] Yamamoto T, Hayashi K, Özdemir Ş K, et al. Robust photonic entanglement distribution by state-independent encoding onto decoherence-free subspace[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2: 488-491.
- [2] 程涛, 郭思成, 王宁, 等. 基于机器学习的激光自适应光学技术研究进展[J]. *中国激光*, 2023, 50(11): 1101008.  
Cheng T, Guo S C, Wang N, et al. Research progress of laser adaptive optics based on machine learning[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(11): 1101008.
- [3] 何媛琦, 朱健强. 高功率激光装置中长悬臂靶架结构稳定性研究[J]. *中国激光*, 2023, 50(10): 1001003.  
He Y Q, Zhu J Q. Study on structural stability of long cantilever target assembly in high power laser facility[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(10): 1001003.
- [4] 许乔, 陈贤华, 汪圣飞, 等. 高功率激光光学元件超精密制造技术[J]. *光学学报*, 2022, 42(17): 1712004.  
Xu Q, Chen X H, Wang S F, et al. Ultra-precision manufacturing technology of high power laser optics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(17): 1712004.
- [5] 张钧翔, 付士杰, 盛泉, 等. 33.8 W 高效率中红外 2.8  $\mu\text{m}$  光纤激光器[J]. *中国激光*, 2023, 50(7): 0715001.  
Zhang J X, Fu S J, Sheng Q, et al. Efficient 33.8 W mid-infrared fiber laser operating at 2.8  $\mu\text{m}$ [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(7): 0715001.
- [6] 周朴, 粟荣涛, 马闾星, 等. 激光相干合成的研究进展: 2011—2020[J]. *中国激光*, 2021, 48(4): 0401003.  
Zhou P, Su R T, Ma Y X, et al. Review of coherent laser beam combining research progress in the past decade [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(4): 0401003.
- [7] 葛增辉, 黄蕴涵, 刘智颖. 基于填充因子的微透镜阵列扫描光学系统性能分析[J]. *光学学报*, 2023, 43(9): 0911004.  
Ge Z H, Huang Y H, Liu Z Y. Performance analysis of scanning optical system with microlens array based on fill factor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(9): 0911004.
- [8] 刘泽金, 周朴, 王小林, 等. 激光相干合成的历史、现状与发展趋势(邀请论文)[J]. *中国激光*, 2010, 37(9): 2221-2234.  
Liu Z J, Zhou P, Wang X L, et al. The history, development and tend of coherent combining of laser beams (invited paper) [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(9): 2221-2234.
- [9] Goodno G D, Rothenberg J E. Engineering of coherently combined, high-power laser systems[M]//Brignon A. *Coherent laser beam combining*. Weinheim: Wiley-VCH GmbH, 2013: 1-44.
- [10] Vorontsov M A, Weyrauch T, Beresnev L A, et al. Adaptive array of phase-locked fiber collimators: analysis and experimental demonstration[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(2): 269-280.
- [11] Goodno G D, Komine H, McNaught S J, et al. Coherent combination of high-power, zigzag slab lasers [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(9): 1247-1249.
- [12] Uberna R, Bratcher A, Tiemann B G. Coherent polarization beam combination[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2010, 46(8): 1191-1196.
- [13] Liu Z J, Jin X X, Su R T, et al. Development status of high power fiber lasers and their coherent beam combination[J]. *Science China Information Sciences*, 2019, 62(4): 41301.
- [14] Siahvashi N, Hamdami M, Arabanian A S, et al. Increasing the power and quality of beam in coherent combination of laser beams by controlling optical axis angles[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2021, 53(9): 495.
- [15] Albrodt P, Niemeyer M, Crump P, et al. Coherent beam combining of high power quasi continuous wave tapered amplifiers[J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 27891-27901.
- [16] Beresnev L A, Weyrauch T, Vorontsov M A, et al. Development of adaptive fiber collimators for conformal fiber-based beam projection systems[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7090: 709008.
- [17] Geng C, Li X Y, Zhang X J, et al. Coherent beam combination of an optical array using adaptive fiber optics collimators[J]. *Optics Communications*, 2011, 284(24): 5531-5536.
- [18] Weyrauch T, Vorontsov M A, Carhart G W, et al. Experimental demonstration of coherent beam combining over a 7 km propagation path[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(22): 4455-4457.
- [19] Yu C X, Augst S J, Redmond S M, et al. Coherent combining of a 4 kW, eight-element fiber amplifier array [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(14): 2686-2688.
- [20] Bourderionnet J, Bellanger C, Primot J, et al. Collective coherent phase combining of 64 fibers[J]. *Optics Express*, 2011, 19(18): 17053-17058.
- [21] Jones D C, Turner A J, Scott A M, et al. A multi-channel phase locked fibre bundle laser[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7580: 75801V.
- [22] Xue Y H, He B, Zhou J, et al. High power passive phase locking of four Yb-doped fiber amplifiers by an all-optical feedback loop[J]. *Chinese Physics Letters*, 2011, 28(5): 054212.
- [23] Fan X Y, Liu J J, Liu J S, et al. Coherent combining of a seven-element hexagonal fiber array[J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, 42(2): 274-279.
- [24] 刘泽金, 许晓军, 陈金宝, 等. 多光束高占空比合束器: CN201514514 U[P]. 2010-06-23.  
Liu Z J, Xu X J, Chen J B, et al. Multi beam high duty cycle combiner: CN201514514 U[P]. 2010-06-23.
- [25] 卢飞, 叶一东, 蒋茂华. 波前畸变对相干合成效果的影响分析[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(S1): 128-132.  
Lu F, Ye Y D, Jiang M H. Influence analysis of wavefront aberration on coherent combining effect[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S1): 128-132.
- [26] 母杰, 王道, 景峰, 等. 高功率激光装置中波前畸变对相干合成的影响[J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0602010.  
Mu J, Wang X, Jing F, et al. Effect of wavefront distortion on coherent beam combination in high-power

- laser facilities[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(6): 0602010.
- [27] 王云萍, 黄建余, 乔广林. 高能激光光束质量的评价方法[J]. 光电子·激光, 2001, 12(10): 1029-1033.  
Wang Y P, Huang J Y, Qiao G L. A method for evaluating high energy laser beam quality[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2001, 12(10): 1029-1033.
- [28] 郭振华, 辜建辉, 许德胜. 高功率激光束近地面大气传输研究[J]. 激光技术, 1991, 15(6): 331-334.  
Guo Z H, Gu J H, Xu D S. Study on the propagation of high-power laser beam in the atmosphere[J]. Laser Technology, 1991, 15(6): 331-334.
- [29] 李现勤, 程兆谷, 蒋金波, 等. 激光束在大气中远距离传输聚焦特性的研究[J]. 光学学报, 2001, 21(3): 324-329.  
Li X Q, Cheng Z G, Jiang J B, et al. Focus characteristics of laser beam for long distance propagation in atmosphere[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(3): 324-329.