

·激光技术·

激光相干合成效率的影响因子模拟探究

胡奇琪^{1,2}, 李剑峰¹, 张大勇¹, 黄智蒙¹

(1.中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900; 2.中国工程物理研究院 研究生部, 北京 100088)

摘要: 主要从激光光学的相关理论出发, 通过数值模拟的方法, 计算激光相干合成的远场光强分布。文中对不同大小的正方形、正六边形、圆形阵列排布, 在不同的距离上的合成效率进行了计算、分析和比较。结果表明, 正六边形的合成效率是最高的, 而正方形与圆形的合成效率相近。可以通过增加光束数的途径提高合成效率, 但当光束数已经很大的情况下, 效果不明显, 但增大阵列可以减缓合成效率随传播距离而下降的速度。

关键词: 激光光学; 相干合成; 数值模拟

中图分类号: TN249

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255-(2012)02-0027-04

Impact Factor of Laser Coherent Combining Efficiency

HU Qi-qi^{1,2}, LI Jian-feng¹, ZHANG Da-yong¹, HUANG Zhi-meng¹

(1. Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

2. Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China)

Abstract: Starting with the related theory of laser optics, the intensity distribution in the far-field is calculated by using the method of numerical simulation. Aiming at the square array, regular hexagon array and circular array with different sizes, the combining efficiency in different distances is calculated, analyzed and compared. The results show that the regular hexagonal arrangement has the highest combining efficiency, the square and the circular arrangement has the similar combining efficiency. By increasing the beam numbers, the combining efficiency can be improved. In the case of the large beam number, the effect is not obvious, but the increasing array can reduce the decreasing efficiency speed due to the propagation distance.

Key words: laser optics; coherent combination; numerical simulation

高功率、高质量、高效率的激光器系统, 一直是世界各国长期以来探索研究的目标。但由于热效应和非线性效应等方面的限制, 提高单台激光器的输出功率已遇到瓶颈。近年来, 相干合成作为一种获得高亮度激光的重要手段备受关注。常见的激光相干合成主要分为被动锁相和主动锁相两类。被动锁相技术主要包括自组织激光相干阵列技术^[1-2]、自傅里叶外腔(S-F)耦合技术^[3]、自成像共振腔^[4]等。主动锁相技术根据相位差的探测方法和相位校正原理的不同, 该方案又有外差探测法^[5-6]、随机并行梯度下降(SPGD)算法^[7-9]、多抖动法^[10]等多种实现方法。

从结构方面来分析, 被动锁相的方案往往要更加简单, 但其可控性差的缺点可能需要更精巧的设计和更优质的材料来弥补; 而设计相对复杂的主动锁相法, 在相位控制方面更有优势, 是大功率激光源应该考虑的方案。在2009年, Northrop Grumman用外差探测法对7路15 kW级的固体激光模块进行相干合成获得了105 kW的输出功率^[11]。2010年, 国防科技大学的周朴等人报道称使用SPGD法实现了16路光纤激光相位锁定^[9]。

由于如今实验条件的限制, 进行大阵列和远距离激光相干合成实验具有一定的困难。因此, 文中

收稿日期: 2012-03-09

基金项目: 中国工程物理研究院基金资助项目(2009A0404024); 中国工程物理研究院流体物理研究所发展基金资助项目(SFZ20110304)

作者简介: 胡奇琪(1987-), 男, 江西南昌人, 硕士研究生, 从事激光相干合成技术研究。

从理论出发,通过计算、分析和比较排布方式,阵列大小,以及传播距离这三个因素对于相干合成效率的影响,为大阵列的激光相干合成实验提供参考。

1 物理模型与计算方法

假设激光是波长为 λ ,束腰半径为 w_0 的基模高斯光束,光束间相互平行,完全相干且偏振方向完全一致,相邻光束的束腰中心间距为 D 。那么束腰中心坐标位于 (x_n, y_n) 的第 n 束光传播到 z 距离处的场强方程可以写为^[12]

$$E_n(x, y, z) = E_0 \frac{q_0}{q_z} \exp \left[-ik \frac{(x-x_n)^2 + (y-y_n)^2}{2q_z} \right] \tag{1}$$

其中, $q_0 = i \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}$, $q_z = q_0 + z$, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 。对应的光强分布可以表示为

$$I(x, y, z) = \left(\sum_n E_n(x, y, z) \right) \left(\sum_n E_n(x, y, z) \right)^* \tag{2}$$

此时在 z 平面取与阵列位置对应的相同区域,计算总能量来得到合成效率。

2 数值模拟计算结果

2.1 阵列排布对合成效率的影响

在大阵列的激光相干合成中,由于光束数众多,可以排列为各种不同的阵列结构。文中讨论图1中三种不同的阵列排布:正方形、正六边形、圆形。

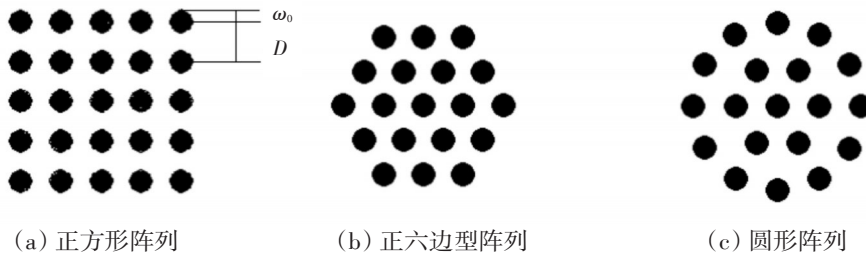


图1 不同的阵列排列示意图

进行模拟计算时,激光的波长 $\lambda=532 \text{ nm}$,束腰半径 $w_0=3 \text{ cm}$,束心间距 $D=10 \text{ cm}$ 。对正方形、正六边形和圆形的三种阵列排布,分别计算 100 km 处和 500 km 处的光强分布。其中正方形(1 024束),正六边形(1 027束)和圆形(1 027束)的 500 km 处的图样如图 2 所示,对应的合成效率分别为 56.7%、63.9%和 57.2%。从光强分布图样上来看,各种光强分布都与

其对应的阵列排布具有相似的周期性。正方形与正六边形阵列的光强分布具有网格状分布,而由于圆形排列没有平移周期性,使得其光强分布只呈现出中心对称的环状结构。

图3中所示各曲线为对应阵列的合成效率随光束数的变化曲线,图3a为 100 km 处,图3b为 500 km 处。从中可以看出,在不同的传播距离上和不同的

$\lambda=532 \text{ nm } \omega_0=3 \text{ cm } D=10 \text{ cm } N=1024(\text{S})z=500 \text{ km}$ $\lambda=532 \text{ nm } \omega_0=3 \text{ cm } D=10 \text{ cm } N=1027(\text{H})z=500 \text{ km}$ $\lambda=532 \text{ nm } \omega_0=3 \text{ cm } D=10 \text{ cm } N=1027(\text{C})z=500 \text{ km}$

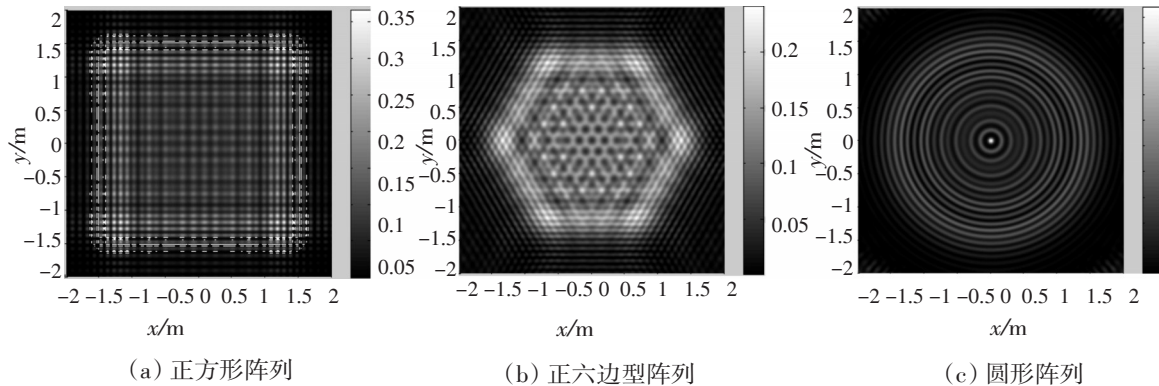


图2 不同的阵列排布在没有聚焦的情况下的相干合成

阵列大小上,正方形与圆形的合成效率几乎接近,而正六边形的合成效率要高于这两者。

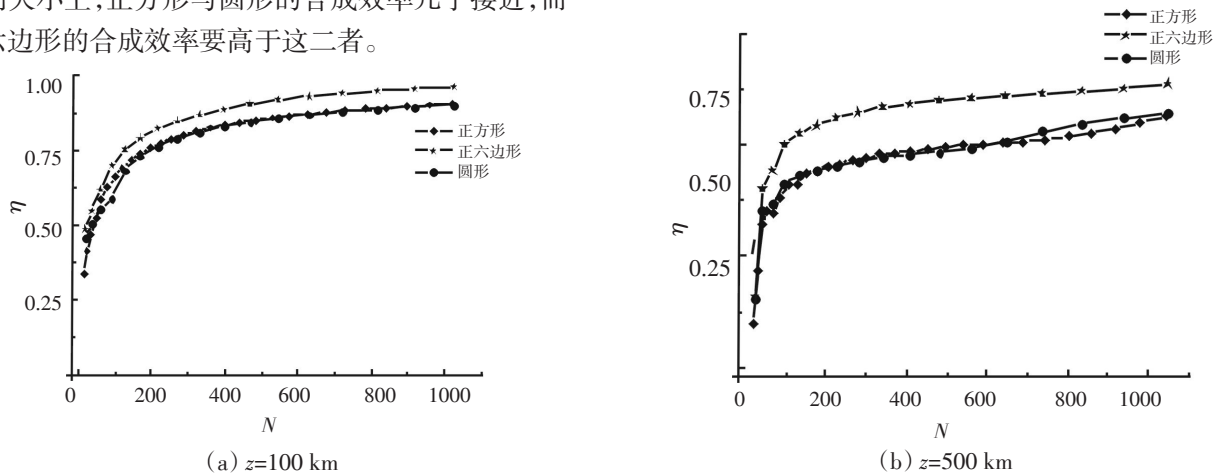


图3 合成效率η随光束数N的变化曲线

2.2 阵列大小对合成效率的影响

在没有聚焦的情形下,对不同大小的正六边形排布的500 km处的光强分布进行计算,其中三幅图样(169束,547束,1 027束)如图4所示,合成效率分

别为54.5%,60.6%,63.9%。图3中合成效率η随合成光束数N的变化曲线,表明可以通过增加光束数来提高合成效率,但是当光束数超过100束之后,其合成效率的提高很缓慢。

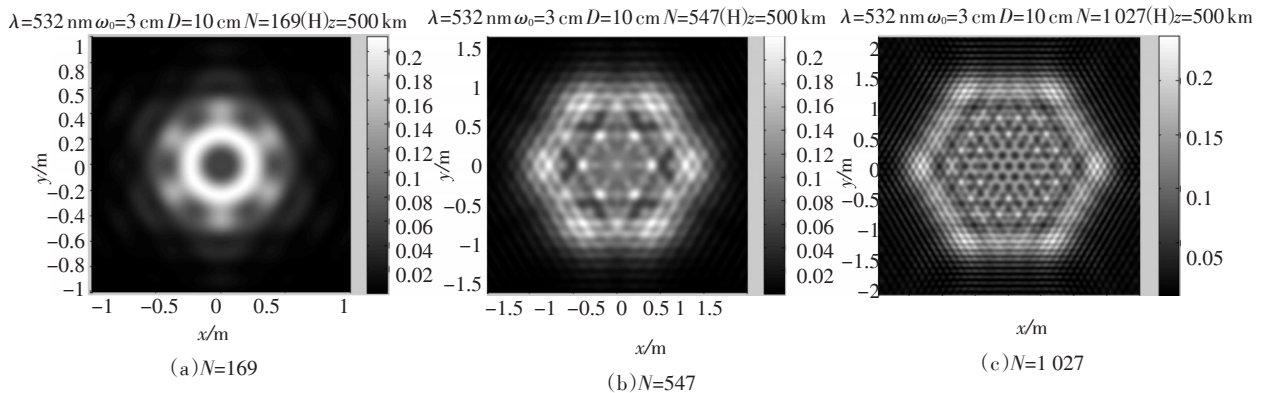


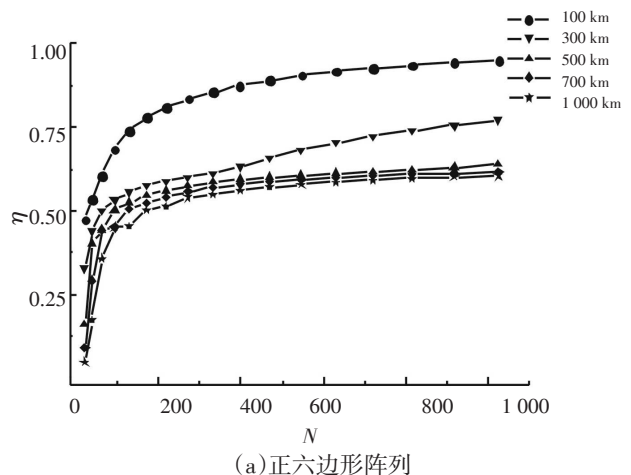
图4 不同大小的正六边形排布在500 km处的光强分布

2.3 传播距离对合成效率的影响

在没有聚焦的情形下,对不同大小的阵列排布在不同距离处,分别取为100、300、500、700和1 000 km,光强分布进行计算,得到如图5中所示曲线。从图5中可以看出,对于小阵列,合成效率在近距离处下降较快,而大阵列的合成效率一直都下降平缓。

3 结果分析

从以上各个方面计算后,发现在相干合成中,可以通过使用正六边形这种密堆积结构排布形式,增加光束数和减少光束传播距离的方法提高合成



(a)正六边形阵列

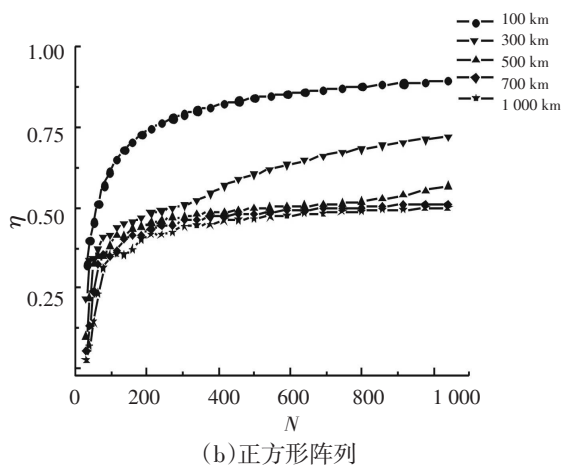


图5 不同大小的阵列在不同距离上的合成效率 η

效率。

正六边形的结构是二维平面上圆形单元最为致密的排布方式。以1000束激光为例,排列成正六边形、正方形和圆形,其占空比间大约成1.21:1.06:1的关系。可见这种结构可以最大程度地减少空白区域来提高激光输出端口的占空比,从而提高相干合成的效率。

增加光束数意味着激光输出端面的口径相应变大。由于各激光之间的相干性,相当于一定程度上提高了激光器的出射口径。根据 $\theta = \lambda/D$,可以认为随着出射口径的增加,光束的整体发散角减小了。因此可以将激光能量集中地传播到更远的距离上。

由于发散角的存在,合成效率显然是会随着传播距离而下降的。虽然增加光束数可以减缓这种影响,但是始终不如减少传播距离有效。

4 结 论

通过对基模高斯光束的不同大小的正方形、正六边形、圆形阵列排布,在不同的距离上的相干合成效率进行了计算、分析和比较后,发现正六边形的合成效率是最高的,而正方形与圆形的合成效率相近。在

光束较少的情况下,增加光束数可以有效地提高相干合成效率。光束数超过100后较大时,提高效果不明显,但却可以减缓合成效率随传播距离而下降的速度。

参考文献

- [1] Hans Bruesselbach, Monica Minden, J L Rogers, et al. 200 W Self-Organized Coherent Fiber Arrays. CLEO.2005, CMDD4, 532-534.
- [2] Hans Bruesselbach, D C Jones, M S Mangir, et al. Self-Organized coherence in fiber laser array[J]. OPTICS LETTERS, 2005, 30 (11):1339-1341.
- [3] Christopher J Corcoran, Frederic Durville. Experimental demonstration of a phase-locked laser array using a self-Fourier cavity[J]. APPLIED PHYSICS LETTERS, 2005, 86, 201118:1-3.
- [4] 王伟,何兵,周军,等.光纤激光器自成像腔相干组束研究[J].强激光与粒子束,2008,20(11):1802-1806.
- [5] Anderegg J, Brosnan S, Weber M, et al. 8-watt coherently phased 4-element fiber array[C]//Proceedings of SPIE, 2003, 4974:1-6.
- [6] 黄智蒙, 骆永全, 张大勇, 等. 基于液晶光调制器的激光相干合成主动相位控制[J]. 中国激光, 2010, 37(7):1713-1716.
- [7] Ling Liu, Mikhail A Vorontsov. Phase-Locking of Tiled Fiber Array using SPGD Feedback Controller[J]. Proceedings of SPIE, 5895, 58950P:1-9.
- [8] 王小林,周朴,马阎星,等.基于随机并行梯度下降算法的多波长激光相干合成[J]. 物理学报,2010,59(8):5474-5478.
- [9] 周朴,王小林,马阎星,等.随机并行梯度下降算法实现16路光纤激光相位锁定[J]. 中国激光,2010,37(2):367-369.
- [10] 马阎星,司磊,周朴,等.多抖动法主振荡功率放大器相干合成技术[J]. 强激光与粒子束,2009,21(11):1639-1644.
- [11] Jay Marmo, Hagop Injeyan, Hiroshi Komine, et al. Joint High Power Solid State Laser program advancements at Northrop Grumman[J]. Proceedings of SPIE, 7195, 719507:1-6.
- [12] 吕百达.激光光学[M]. 北京:高等教育出版社,1986:106.