

·激光技术·

## 提高平行发射方式相干合成效率

胡奇琪, 黄智蒙, 骆永全, 张大勇, 李剑峰

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:**从傅里叶变换光学的相关理论出发,提出了一种适合提高平行发射方式下的相干合成效率的方法。并依据激光光学的知识,通过数值模拟计算该方法对激光相干合成效率的影响。以平行发射系统和透镜系统作参考,发现对各光束赋初始相位的方法可以提高平行发射系统的合成效率,并且其极限值为对应透镜系统的合成效率。不同的赋初始相位值对合成效率的影响结果各不相同,通过对比,找到了最好的赋初始相位值方案。

**关键词:**激光光学;相干合成效率;数值模拟;平行发射

中图分类号:O438.2;TN249

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2014)-01-0014-04

## Improvement of Coherent Combination Efficiency in Parallel Transmission System

HU Qi-qi, HUANG Zhi-meng, LUO Yong-quan, ZHANG Da-yong, LI Jian-feng

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

**Abstract:** Based on Fourier transform optics, a method to improve coherent combination efficiency in parallel transmission system is introduced. According to the knowledge of laser optics, the influence of the method on laser coherent combination efficiency is calculated by numerical value simulation. Numerical simulation of the parallel transmission system and the lens system shows that the method described in the passage indeed improve the efficiency, with limitation that equals the efficiency in lens system. Different initial phase schemes lead to different effect, and the best scheme is got by comparing.

**Key words:** laser optics; coherent combination efficiency; numerical value simulation; parallel transmission

自1960年第一台红宝石激光器问世的半个世纪以来,激光的发明不仅带动了强光物理、非线性光学、量子光学等许多交叉学科的产生和发展,如瞬态光学、激光光谱学、激光化学等学科的发展;而且极大地推动了科技、经济、军事等领域的发展。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<sup>[1-2]</sup>。

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。常见的锁相技术主要分为被动锁相和主动锁相两类。被动锁相技术包括自组织相干阵列法<sup>[3-5]</sup>、自傅里叶外腔耦合法<sup>[6]</sup>、自成像共振腔

法<sup>[7-9]</sup>等。主动锁相技术包括外差探测法<sup>[10-11]</sup>、随机并行梯度下降算法<sup>[12-14]</sup>、模拟退火算法<sup>[15]</sup>、单抖动法<sup>[16]</sup>、多抖动法<sup>[17]</sup>等多种实现方法。在实验室中,可以利用透镜来获得相干合成的远场光强分布,并分析其合成效率。然而,在工程应用上,考虑到较高的功率密度,出射口径过大等现实问题,可能无法使用透镜。因此,激光阵列的相干合成通常采用平行发射和并行发射两种不同的发射方式,如图1所示。以平行发射方式为模拟对象,来分析通过改变各光束间初始相位的一致性来提高相干合成效率的有效性。

收稿日期:2013-11-14

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,硕士研究生,主要从事激光相干合成技术研究。

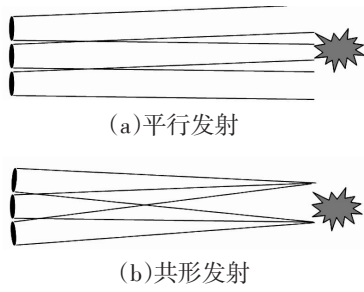


图1 激光阵列平行发射和共形发射示意图

## 1 理论分析

假设在  $z = 0$  平面有  $N^2$  个波长为  $\lambda$  束腰半径为  $\omega_0$  的基模高斯光束排列成一平行发射的正方形阵列, 平行于焦距为  $F$  的薄凸透镜的光轴传播至透镜后焦面处。阵列中相邻光束的中心间距为  $D$ 。透镜位于  $z = L$  处且透镜中心与阵列中心共轴。根据夫琅禾费衍射系统的位移相移定理<sup>[1]</sup>, 可以计算得坐标中心位于  $z = 0$  平面上  $(x_0, y_0)$  处的光束在后焦面处

$$E(x, y) = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda F} \exp\left[-\left(\frac{k\omega_0}{2F}\right)^2(x^2 + y^2)\right] \cdot \exp\left[\frac{ik}{F}(xx_0 + yy_0)\right] \quad (1)$$

相干合成后, 得到的光强分布为

$$I(x, y) = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi\omega_0^2}{\lambda F}\right)^2 \exp\left[-2\left(\frac{k\omega_0}{2F}\right)^2(x^2 + y^2)\right] \cdot \frac{\sin^2\left(N\frac{kx}{2F} \cdot D\right) \sin^2\left(N\frac{ky}{2F} \cdot D\right)}{\sin^2\left(\frac{kx}{2F} \cdot D\right) \sin^2\left(\frac{ky}{2F} \cdot D\right)} \quad (2)$$

其中,  $k = 2\pi/\lambda$ 。式(2)表明, 当  $N > 1$  时, 能量主要集中在中央边长为  $2\lambda F/ND$  的正方形主瓣范围内。如果以该主瓣内的总能量与激光输出总能量的比值定

义为相干合成效率, 则

$$\eta = \frac{\oint I dS}{N^2 P} \approx 1.27 \times \left(\frac{2\omega_0}{D}\right)^2 \quad (3)$$

在傅里叶变换光学中, 透镜被看作是一种相位衍射元件, 在光路中起到的主要作用是改变到达透镜前表面的波前的相位分布。因此, 在放弃使用透镜的同时, 可以通过主动赋予各光束不同的初始相位, 来模拟透镜聚焦的效果。由傅里叶光学原理, 焦距为  $F$  的透镜作为相位衍射元件的相位变换函数为<sup>[1]</sup>

$$\tilde{t}(x, y) = \exp\left(ik\frac{x^2 + y^2}{2F}\right) \quad (4)$$

对以光束的中心坐标  $(x_m, y_m)$  为变量, 赋予各光束不同的初始相位

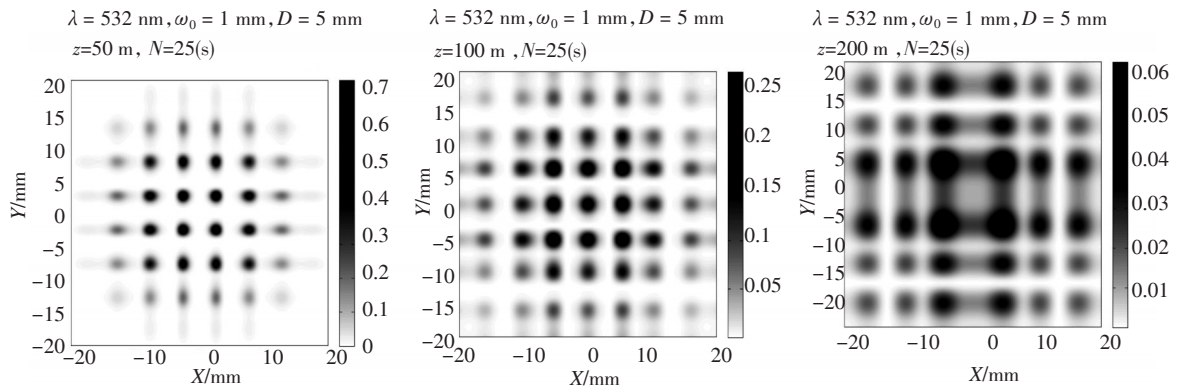
$$\phi_{m0} = k\frac{x_m^2 + y_m^2}{2R_z} \quad (5)$$

其中,  $R_z = z + f^2/z$ ,  $f = \pi\omega_0^2/\lambda$ , 那么相干叠加后复电场分布可以表示为

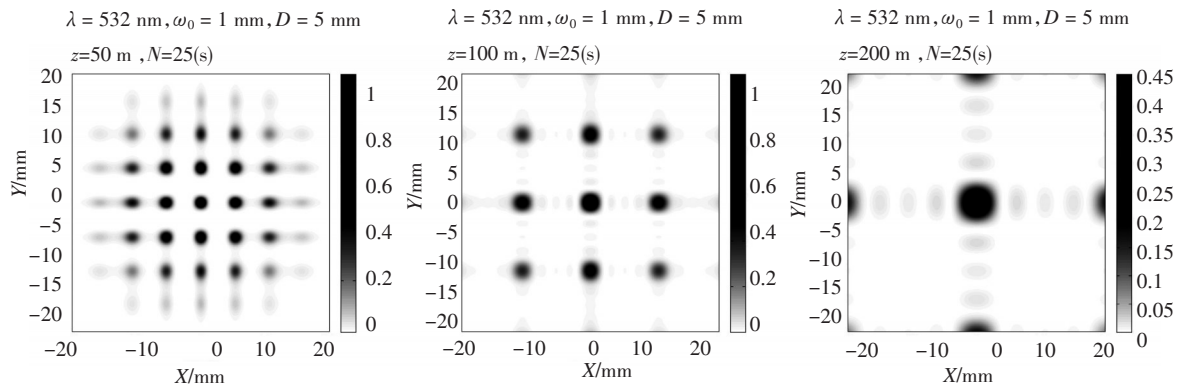
$$\tilde{U}(x, y, z) = \sum_m E(x - x_m, y - y_m, z) \cdot \exp\left(ik\frac{x_m^2 + y_m^2}{2R_z}\right) \quad (6)$$

## 2 数值模拟结果

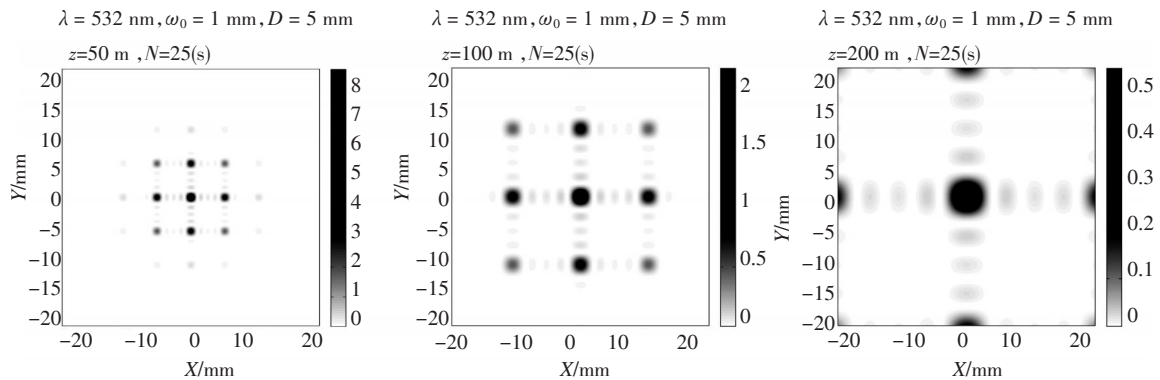
对上述的理论进行数值模拟, 计算过程中各光束假设为偏振完全一致的线偏振光,  $\lambda = 532 \text{ nm}$ ,  $\omega_0 = 1 \text{ mm}$ ,  $D = 5 \text{ mm}$ , 没有考虑光束的部分相干性以及相位控制残差等问题。相干阵列由 25 束呈正方形排列的基模高斯光束组成。图 2a 是普通平行发射方式下的距离 50 m、100 m、200 m 处的光强分布图样; 图 2b 是赋初始相位法得到的图样; 图 2c 是透镜系统的合成结果, 透镜的焦距依次为 50 m、100 m、200 m。



(a) 普通平行发射方式下距离 50 m、100 m、200 m 处的相干合成光强分布图样



(b)平行发射方式下经过赋初始相位法得到的距离50 m、100 m、200 m处的相干合成光强分布图样



(c)焦距为50 m、100 m、200 m的透镜系统的相干合成光强分布图样

图2 不同系统的相干合成

可以看出,在近距离处,赋初始相位法的效果使合成效率在普通平行发射系统和透镜系统之间。随着距离的增加,得到的光强分布与普通平行发射方式的完全不同,实际上是更接近透镜系统下的结果。不同的系统的合成效率  $\eta$  随距离  $z$  的变化曲线如图3所示。可见,赋初始相位法可以很好地提高相干合成的效率,并且其极限是相对应的透镜系统。图3中表示的极限值为20.96%,与式(1)所计算结果一致。

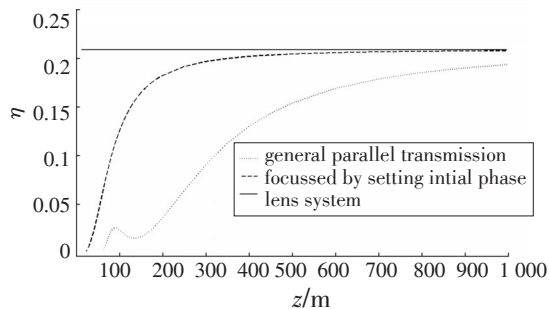


图3 不同的系统的合成效率  $\eta$  随距离  $z$  的变化曲线

如果在赋初始相位时,与式(5)表示不同,则得到的合成效率曲线如图4所示。其中

$$\varphi_1 = \varphi_{m0}/3, \varphi_2 = 2\varphi_{m0}/3, \varphi_3 = \varphi_{m0}, \varphi_4 = 4\varphi_{m0}/3$$

可见,赋值不同都会引起合成效率的改变。但是由式(5)给出的结果最好。

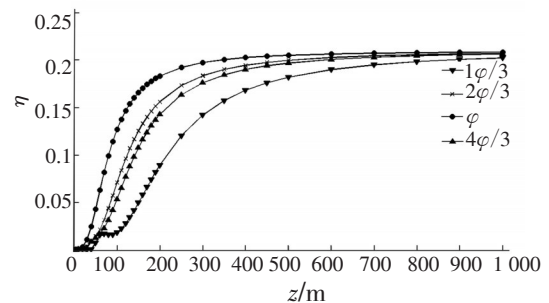


图4 设置不同的初始相位对合成效率的影响

### 3 相位调制法聚焦的效果

基模高斯光束的真空中的传播方程可以写为<sup>[2]</sup>

$$A(r, z) = A_0 \frac{\omega_0}{\omega_z} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_z^2}\right) \exp\left[-i\left(\frac{kr^2}{2R_z}\right) - \Psi\right] \quad (7)$$

则光束中心位于  $(x_m, y_m)$  的基模高斯光束经过赋初始相位  $\varphi_{m0}$  后,其电场传播方程为

$$E(x, y, z) = \frac{\omega_0}{\omega_z} \exp\left(-\frac{r_m^2}{\omega_z^2}\right) \exp\left[-i\left(\frac{kr_m^2}{2R_z}\right) - i\Psi\right] \cdot \exp\left(ik\frac{x_m^2 + y_m^2}{2R_z}\right) \quad (8)$$

式中,  $r_m^2 = (x - x_m)^2 + (y - y_m)^2$ 。此时,有

$$E(x, y, z) = \frac{\omega_0}{\omega_z} \exp\left(-\frac{r_m^2}{\omega_z^2}\right) \exp\left[-i\left(k\frac{x^2 + y^2}{2R_z} + \Psi\right)\right] \cdot \exp\left(ik\frac{xx_m + yy_m}{R_z}\right) \quad (9)$$

其中的相位部分  $\varphi(x, y, z)$  不论  $(x_m, y_m)$  取值多少时,都有

$$\Phi(0, 0, z) = \exp(-i\Psi) \quad (10)$$

这意味着任何一束光在经过调制之后,其传播至任意的平面处,屏中心的相位都是一致的,使中心处有一稳定的相干增强。

## 4 结 论

对各光束赋初始相位的方法可以提高平行发射系统的相干合成效率,其极限值为对应透镜系统的相干合成效率。不同的赋初始相位值方案对合成效率的影响结果各不相同,其中以满足式(5)的赋初始相位值方案最好。

## 参考文献

[1] 钟锡华.现代光学基础[M].北京:北京大学出版社,2003.

[2] 吕百达.激光光学[M].北京:高等教育出版社,1986.

[3] Hans Bruesselbach, D C Jones, M S Mangir, et al. Self-organized coherence in fiber laser array [J]. Opt. Lett., 2005, 30(11):1339-1341.

[4] Hans Bruesselbach, Monica Minden, J L Rogers, et al. 200 W Self-organized coherent fiber arrays[J]. CLEO, 2005, CMDD4: 532-534.

[5] 张斌.五路耦合式光纤激光器阵列的相干合成[D].长沙:国防科学技术大学,2006.

[6] 王伟,何兵.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).

[7] Liu L P, Zhou Y, Kong F T. Phase locking in a fiber laser array with varying path lengths[J]. Applied Physics Letters, 2004, 85: 4837-4839.

[8] 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, 11(20): 1802-1806.

[9] 楼祺洪,何兵,周军,等.光纤激光器的相位锁定及高相干功率输出[J].激光与光电子学进展,2007, 2(44):11.

[10] Anderegg J, Brosnan S, Weber M, et al. 8-watt coherently phased 4-element fiber array [J]. Proc. SPIE, 2003, 4974:1-6.

[11] 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.

[12] LIU Ling, Mikhail A, Vorontsov. Phase-locking of tiled fiber array using SPGD feedback controller [J]. Proc. of SPIE, 58950.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 周朴,马阎星,王小林,等.模拟退火算法光纤放大器相干合成[J].强激光与粒子束,2010, 22(5): 973-977.

[16] Ma Y, Zhou P, Wang X, et al. Coherent beam combination with single frequency dithering technique [J]. Optical Letter, 2010, 35(9):1308-1310.

[17] 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,21(11):1639-1644.