

文章编号: 0258-7025(2008)03-0351-08

# 光纤激光器相干合成系统中组束误差对远场光场的影响

曹润秋 陆启生 侯 静 许晓军

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 对光纤激光器相干合成系统中组束误差对远场光场分布的影响进行了数值研究,分析了输出单元占空比、位置误差和平行度误差对远场光场分布的影响。结果表明,输出单元占空比的增加只能提高中心光斑的能量,但无法改变中心光斑的平均光强;而位置误差会使远场光场中的旁瓣能量减弱,降低光纤激光器相干合成系统的转换效率。分析发现,位置误差的这种影响可以通过增加输出单元的占空比来减弱。最后,通过分析平行度误差对远场光场的影响,对光纤激光器相干合成系统中的平行度误差控制提出了建议。

**关键词** 激光器;光纤激光器;相干合成;远场光场;衍射;误差

**中图分类号** TN 248.1 **文献标识码** A

## Influence of Combining Errors in the System for Coherent Combining of Fiber Lasers on the Far Field of Output

Cao Jianqiu Lu Qisheng Hou Jing Xu Xiaojun

(College of Opto-Electronic Science and Engineering,

National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** The influence of combining errors in the system for coherent combining of fiber lasers on the far field of output is studied numerically. Influences of the duty ratio, position errors and parallel errors on the distribution of far field are researched. The results show that the increase of duty ratio of output elements will raise the energy of the central lobe rather than change the central lobe's average intensity; and position errors will decrease the energy of side lobes and the energy transfer efficiency of the system. It is found that the influence of position errors can be offset by increasing the output element's duty ratio. Finally, the influence of parallel errors on far field is discussed and relative suggestion is provided.

**Key words** lasers; fiber laser; coherent combining; far field; diffraction; error

### 1 引 言

光纤激光器由于其体积小、效率高、光束质量好等优点备受关注,特别是近年来,单根光纤激光器的输出能量有了很大提高,已经达到千瓦量级<sup>[1]</sup>。然而,热损伤以及受激拉曼散射(SRS)、受激布里渊散射(SBS)等非线性效应为输出能量进一步的大幅提高带来了限制。光纤激光器的合成技术是打破限制的一种有效方法<sup>[2,3]</sup>。所谓光纤激光器的合成,就

是将多个光纤激光器的输出光束叠加起来,从而实现高功率、高光束质量的激光输出。光纤激光器的合成可分为两种:相干合成和非相干合成。由于利用相同数量的激光器,相干合成理论上可以在远场得到更高的轴上光场强度,光场能量的分布也更为集中,因此得到了广泛的关注<sup>[2,3]</sup>。光纤激光器相干合成技术近年来发展非常迅速,出现了很多方案,如主振荡-功率放大(MOPA)<sup>[4~8]</sup>、多芯光纤<sup>[9,10]</sup>以

收稿日期:2007-07-20; 收到修改稿日期:2007-10-10

基金项目:国防预研基金(51326010207)资助项目。

作者简介:曹润秋(1981—),男,河北人,博士研究生,主要从事光纤激光器相干合成的研究。E-mail:jq\_cao@126.com

导师简介:陆启生(1942—),男,江苏人,教授,博士生导师,主要从事激光器以及激光与物质相互作用方面的研究。

E-mail:luqsheng@public.cs.hn.cn

及外腔法<sup>[11~15]</sup>等,相关文献也对远场光场的分布进行了分析<sup>[8~12]</sup>。但是,这些分析都是建立在理想条件下的,即输出端的排列是完全对称且相互平行的。这种假设在真实的相干合成系统中是不可能实现的,因为调整仪器的精度以及制作工艺的限制,不可避免地会在输出端组合的过程中引入误差(即组束误差)。本文将讨论这些误差会对系统输出光场的远场分布造成的影响,同时,也将讨论输出端的占空比对远场光场分布的影响。

## 2 模型及相关理论

### 2.1 模型介绍

在主振荡-功率放大光纤激光器相干合成系统中,其输出端可以看作是多个输出单元的组合,而每一个单元由光纤激光器以及与其相联的扩束微透镜组成,因此,在该系统中,每一个单元的光束输出过程都是相互独立的。假设各输出单元是相同的,由于单模光纤的输出光场可近似为高斯光束<sup>[16]</sup>,因此,假设每个单元的输出光场为高斯光束,同时假设每个单元的输出孔径为圆形。由于本文关注的是光场的远场分布,因此,假设圆形孔径的位置与高斯光束的腰斑位置重合,且半径与腰斑半径相同。考虑

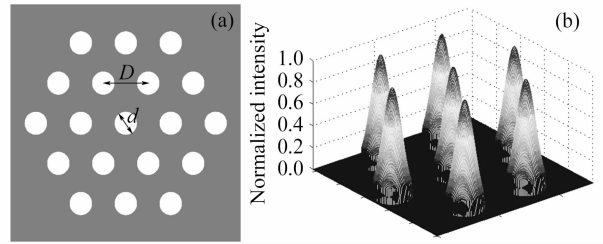


图1 输出端的横向截面图( $N=3$ ) (a) 和强度分布图( $N=2$ ) (b)

Fig. 1 Distribution of the output elements ( $N=3$ ) (a) and the intensity distribution of laser beams at the output end ( $N=2$ ) (b)

到各输出单元紧凑排列时的分布情况,令各单元满足正六边形分布。输出端的横向截面和强度分布如图1所示。图中, $d$ 为圆形孔径的直径, $D$ 为相邻孔径圆心间的距离, $N$ 为输出单元排列的层数。占空比为

$$R_{\text{duty}} = d/D, \quad (1)$$

而阵列中输出单元(即光纤激光器)的数量  $n$  为

$$n = 3N(N-1) + 1, \quad (N=1, 2, 3, \dots). \quad (2)$$

输出端平面的光场  $U_i(x_i, y_i)$  可由输出单元光场的叠加来表示,其表达式为

$$U_i(x_i, y_i) = \sum_{m=1}^n U_{\text{Gauss}_m}(x_i, y_i) \text{circ}_m(x_i, y_i, d), \quad (3)$$

式中  $U_{\text{Gauss}_m}(x_i, y_i) \text{circ}_m(x_i, y_i, d)$  为第  $m$  个输出单元的光场,  $\text{circ}_m(x_i, y_i, d)$  为圆形孔径函数,可以表示为

$$\text{circ}_m(x_i, y_i, d) = \begin{cases} 1 & \sqrt{(x_i - x_{0m})^2 + (y_i - y_{0m})^2} \leq \frac{d}{2} \\ 0 & \sqrt{(x_i - x_{0m})^2 + (y_i - y_{0m})^2} > \frac{d}{2} \end{cases}, \quad (4)$$

高斯光束  $U_{\text{Gauss}_m}(x_i, y_i)$  的光场分布为

$$U_{\text{Gauss}_m}(x_i, y_i) = \exp(jkz) \exp\left\{jp(z) + \frac{j\mathbf{k}}{q(z)}[(x_i - x_{0m})^2 + (y_i - y_{0m})^2]\right\}, \quad (5)$$

$$\text{式中 } p = j \ln\left[\sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi\omega_0^2}\right)^2}\right] - \arctan\left(\frac{\lambda z}{\pi\omega_0^2}\right), \quad q = z - j \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda}, \quad (6)$$

$(x_{0m}, y_{0m})$  为第  $m$  个输出单元的中心位置坐标,  $\omega_0$  为腰斑半径,  $\mathbf{k}, \lambda$  分别为输出光场的波矢和波长。

根据夫琅禾费衍射理论,远场光场  $U_f(x_f, y_f)$  和输出端平面的光场  $U_i(x_i, y_i)$  之间的关系为

$$U_f(x_f, y_f) = \frac{\exp(jkz) \exp\left[j \frac{\mathbf{k}}{2z}(x_0^2 + y_0^2)\right]}{j\lambda z} F\{U_i(x_i, y_i)\}_{f_x = \frac{x_f}{z}, f_y = \frac{y_f}{z}}, \quad (7)$$

其中  $(x_i, y_i), (x_f, y_f)$  分别为输出端平面(取为  $z=0$ )和远场平面的横向坐标。

### 2.2 光束质量的评价参数

为了能够较为全面地反映光场能量分布情况,

选用多种评价参数。由于在计算过程中除所需考察的参数外,其他参数的选取都是一致的,而且本文关注的是远场光场的各参数的相对变化规律,故用相对值即可反映远场光场的变化规律;另外,远场评价

参数的绝对值只能与特殊情况相对应,该情况由具体的光场参数(如波长、传输距离等)决定,因此,由此得到的结论的普遍性很难体现;而采用相对值进行分析,则避免了结论对于特定光场参数的依赖,从而使结论更具普遍性,能够更好地体现相应的物理本质。所以本文中的各评价参数的值都采用相对值。

由(7)式可以看出,远场光强分布为

$$I_f(x_f, y_f) = |U_f(x_f, y_f)|^2 = \frac{1}{\lambda^2 z^2} |F\{U_i(x_i, y_i)\}_{f_x = \frac{x_f}{\lambda z}, f_y = \frac{y_f}{\lambda z}}|^2, \quad (8)$$

对于特定的光场和远场观察平面,  $\lambda$  和  $z$  是一定的。因此远场光强可由  $I'_f(f_x, f_y) = |F\{U_i(x_i, y_i)\}|^2$  来评价。由此,各参数定义如下:

1) 峰值功率:  $P_{\max} = \max[I'_f(f_x, f_y)]$ ;

2) 中心光斑半径  $w$  定义为光场的第一个零点坐标( $x$  轴和  $y$  轴位置近似相等);因此,中心光斑总功率为

$$P_{\text{cen}} = \int_{-w}^w \int_{-w}^w I'_f(f_x, f_y) df_x df_y, \quad (9)$$

该参量用来衡量中心光斑所包含的光场能量。由于在计算过程中,各微分元  $df_x, df_y$  的大小是相等的,因此,中心光斑的总功率由

$$P_{\text{cen}} = \sum_{f_x = -w}^w \sum_{f_y = -w}^w I'_f(f_x, f_y) \quad (10)$$

来评价,则中心光斑的平均光强定义为  $P_{\text{ave}} = \frac{P_{\text{cen}}}{\pi w^2}$ ;

3) 引入次级峰值功率比  $\eta = \frac{P'_{\max}}{P_{\max}}$  来衡量次级峰(旁瓣)的大小。其中,  $P'_{\max}$  表示次最大峰值功率。

本文利用 Matlab 软件进行了数值模拟,在模拟过程中,空间傅里叶变换是利用 Matlab 软件中的函数 `fft2` 来实现的。同时,假设光场在真空中传播,即不考虑传输过程中的波前畸变,且假设各输出单元的光场之间也是完全相干的。在计算过程中,取  $d = 5\lambda$ ;为了保证计算的精度,将光场所在平面划分为  $2048 \times 2048$  个网格,每个网格的大小为  $\frac{\lambda}{2} \times \frac{\lambda}{2}$ 。

## 3 结果与讨论

### 3.1 输出单元的数量对远场光场的影响

虽然该问题已经被多次讨论过<sup>[8-12]</sup>,但为了保证讨论的完整性,这里再次进行简单的分析,给出了  $N = 1, 3, 5$  的峰值功率和中心光斑的平均光强,如

表 1 所示。

表 1 远场光场能量分布随输出单元数量的变化  
Table 1 Distribution of the far field corresponding to different numbers of output elements

$N(n)$	$N = 1(1)$	$N = 3(19)$	$N = 5(61)$
$P_{\max}$	158.93	$5.40 \times 10^4$	$5.473 \times 10^5$
$P_{\text{ave}}$	$36.1 \times 10^6$	$1.3101 \times 10^{10}$	$1.3287 \times 10^{11}$

由表 1 中的数据可以看出,远场光场的峰值功率与单元数的平方成正比,因为空间频谱中零频分量的相干叠加导致峰值功率与单元数的平方成正比;同时,中心光斑的平均光强也与单元数的平方成正比。

### 3.2 占空比对远场光场的影响

对  $N = 3$  时,不同的占空比( $R_{\text{duty}} = 0.1 \sim 1$ )对远场光场分布的影响进行了模拟,结果如表 2 和表 3 所示。这里需要说明的是:在表 2 中,远场光场分布三维图的横坐标为  $\frac{x_f}{\lambda z}(f_x)$ ,纵坐标为  $\frac{y_f}{\lambda z}(f_y)$ ,色标表示归一化光强,右侧的二维图分别是  $x_f = 0$  和  $y_f = 0$  平面的归一化光强分布;如果没有特别说明,后面的图形均使用与之相同的坐标系。

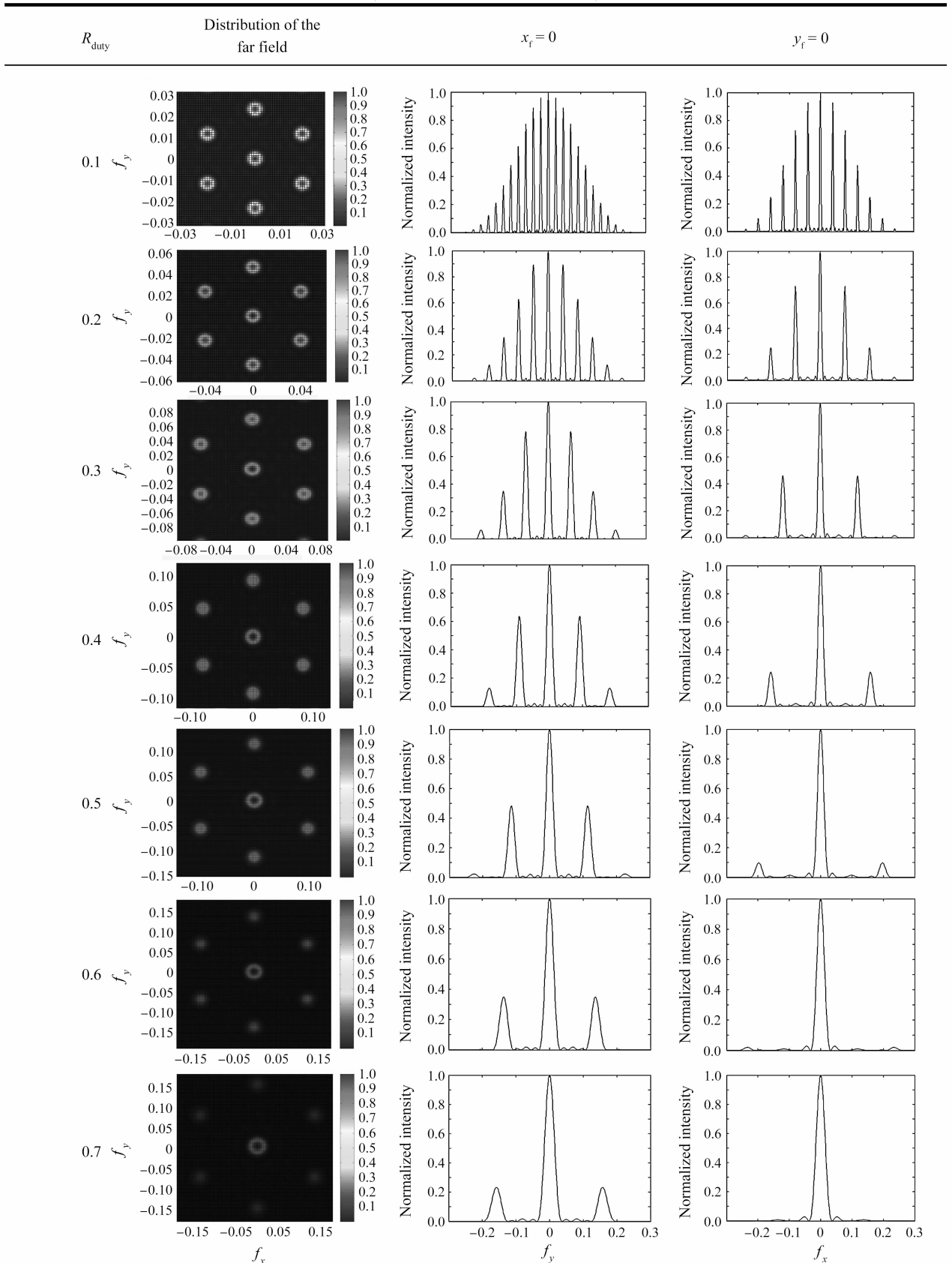
从表 2,表 3 可以看到占空比对远场光场的影响:1) 占空比减小会使中心光斑的能量降低、半径减小,而旁瓣的能量增加,光场能量分布更加分散;这与文献[8]报道的实验结果相符;2) 占空比的改变不会影响峰值功率以及中心光斑的能量密度。随着  $D$  的增加,占空比减小,导致各级衍射光斑半径以及各衍射级之间的距离减小,从而导致次级峰的能量增加以及中心光斑的能量减少(由光场全部能量的 70% 降到 0.7%);同时,由于空间频谱中的零频分量不受占空比的影响,因此峰值功率不会发生变化。通过计算可以发现:占空比对中心光斑的总功率和面积的影响可以抵消,使得中心光斑的平均光强不变。

### 3.3 位置误差对远场光场的影响

位置误差指各输出单元保持平行的条件下,输出端面上各输出单元的相对位置发生变化,它反映了输出单元位置的不规则性。在数值模拟过程中,相对位置的不确定度是通过在原中心位置坐标上( $x_0, y_0$ ) 分别加上一随机数组( $\delta x_0, \delta y_0$ ) 实现的,该随机数组中的元素均在  $(-\delta d, \delta d)$  范围内满足平均分布。计算结果如表 4 和表 5 所示。在数值模拟过程中,  $N = 3$ , 占空比为 0.5。

表 2 占空比对远场光场分布的影响

Table 2 Influence of the duty ratio on the intensity distribution of the far field



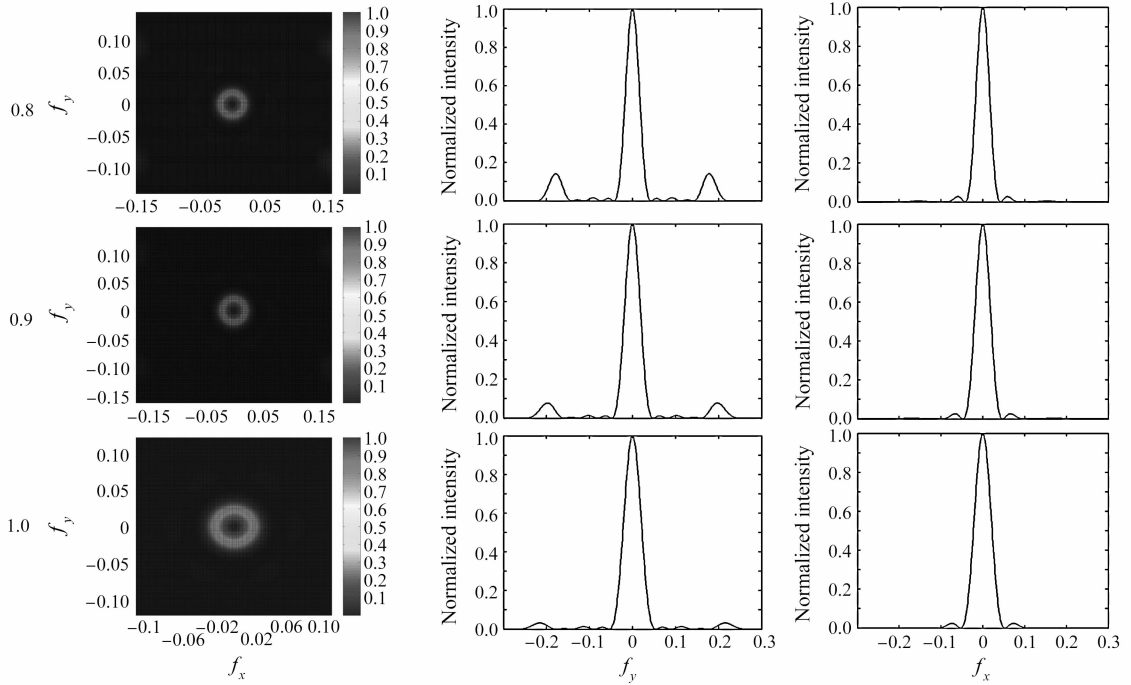


表 3 各评价参数随占空比的变化

Table 3 Influence of the duty ratio on the diagnostic parameters

$R_{duty}$	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
$P_{max} / \times 10^4$	5.4	5.54	5.54	5.55	5.49	5.4	5.47	5.46	5.4	5.4
$\eta / \%$	3.2	7.8	14.1	23.3	35.0	48.3	63.6	78.0	89.3	95.7
$\omega / \times 10^{-3}$	52.9	48.8	42.0	37.3	32.2	27.4	21.5	16.6	10.7	4.89
$P_{cen} / \times 10^6$	115.2	95.91	76.61	58.73	43.05	29.43	19.16	10.76	4.739	1.179
$P_{ave} / \times 10^{10}$	1.31	1.28	1.38	1.34	1.32	1.25	1.32	1.24	1.32	1.57

由此可见,对于中心光斑来说,输出单元位置的不规则除使其形状有较小改变外,不会对其能量及能量密度造成影响。但是,这种误差会使旁瓣的能量降低,这意味着光纤激光器相干合成系统的能量转换效率降低,为了减小这种不利影响,可以通过提高占空比来弥补。因为占空比的提高,不但可以减小各输出单元之间的距离,使位置误差更加容易控制,同时,占空比的增加可以提高中心光斑的能量,从而减弱位置误差对系统能量转换效率的影响。

### 3.4 平行度误差对远场光场的影响

所谓平行度误差,指各输出单元之间的光轴并不是完全平行的。在实际应用中,要实现完全的平行也是不可能的。若假设一条标准光轴(设为  $z$  轴),那么这种平行度误差可以看作是各输出单元的光轴与标准光轴之间的夹角,在数值模拟过程中,这种夹角是通过分别以  $x$  轴和  $y$  轴进行两次旋转实现的,如图 2 所示。由三角函数,有  $\cos\gamma = \cos\alpha \cdot \cos\beta$ ; 若  $\alpha, \beta, \gamma$  很小,可改写为  $\gamma^2 \approx \alpha^2 + \beta^2$ 。因此,在数值

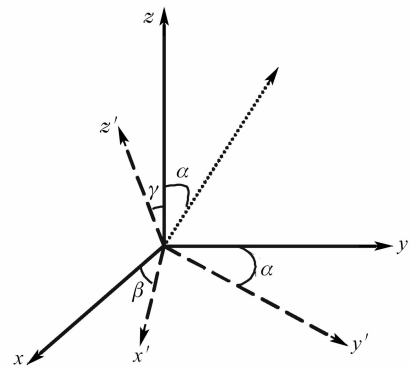


图 2 坐标旋转示意图

Fig. 2 Scheme of the rotation of the coordinate  
模拟中,令  $\alpha, \beta$  取在  $(-\delta\alpha, \delta\alpha)$  的范围内满足平均分布的随机数,则  $\gamma$  约在  $(-\sqrt{2}\delta\alpha, \sqrt{2}\delta\alpha)$  范围内随机变化,从而实现对平行度误差的模拟。计算结果如表 6 和表 7 所示。在数值模拟过程中,仍取  $N = 3$ , 占空比为 0.5。

表 4 位置误差对远场光场的影响(坐标系选取同表 2)

Table 4 Influence of the position error on the intensity distribution of the far field (the coordinate is the same as Table 2)

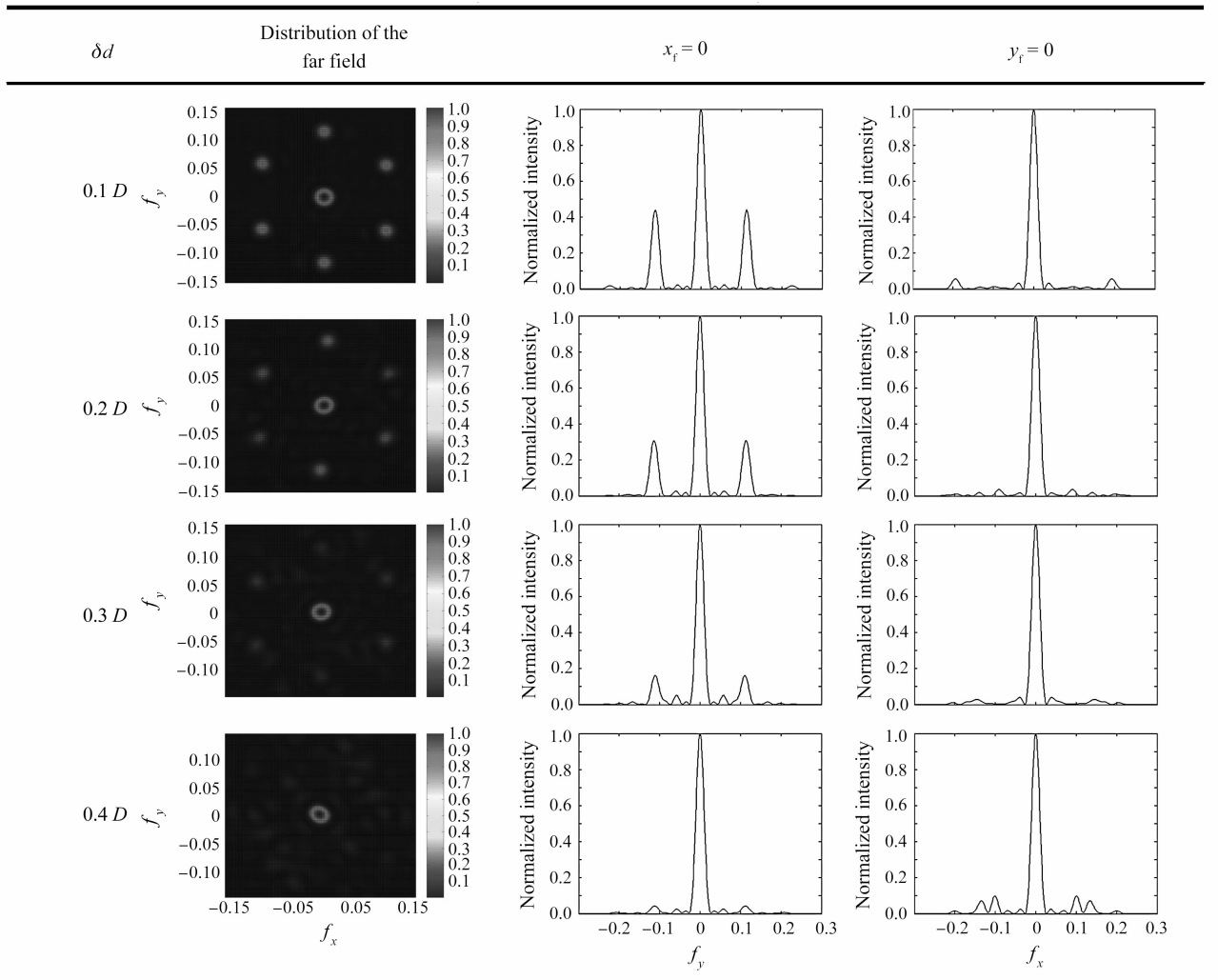


表 5 位置误差对各评价参数的影响

Table 5 Influence of the position error on the diagnostic parameters

$\delta d$	0.1D	0.2D	0.3D	0.4D
$P_{\max} / \times 10^4$	5.53	5.56	5.57	5.55
$\eta / \%$	44	31	16	10
$\tau / \times 10^{-2}$	2.74	2.75	2.74	2.74
$P_{\text{cen}} / \times 10^6$	29.38	30.84	30.35	30.28
$P_{\text{ave}} / \times 10^{10}$	1.2460	1.3076	1.2866	1.2839

从表 6,表 7 可以看出,平行度误差会使峰值功率降低,中心光斑的总功率和平均光强减小,同时,会使旁瓣的能量增加,能量分布更加分散且没有规律。这是由于平行度误差改变了相干合成系统输出光场的空间频谱分布,从而使得远场光场发生变化。当  $\delta\alpha$  达到 0.05 rad 时,其远场分布已经产生明显的变化,当  $\delta\alpha$  达到 0.5 rad 时,远场光场的能量分布已经非常分散,无法确定中心光斑的位置,峰值功率也

大幅度降低。当  $\delta\alpha$  小于 0.01 rad 时,各参数随  $\delta\alpha$  的变化没有显著的改变,这说明此时平行度误差对远场光场的影响非常微弱。因此,在相干合成系统中,平行度误差应控制在 0.01 rad 以内。另外,由于平行度误差的影响是通过改变系统输出光场的空间频谱造成的,因此,其影响不会随着  $N$  的增加而发生变化。

表 6 平行度误差对远场光场的影响(坐标系选取同表 2)

Table 6 Influence of the parallel error on the intensity distribution of the far field (the coordinate is the same as Table 2)

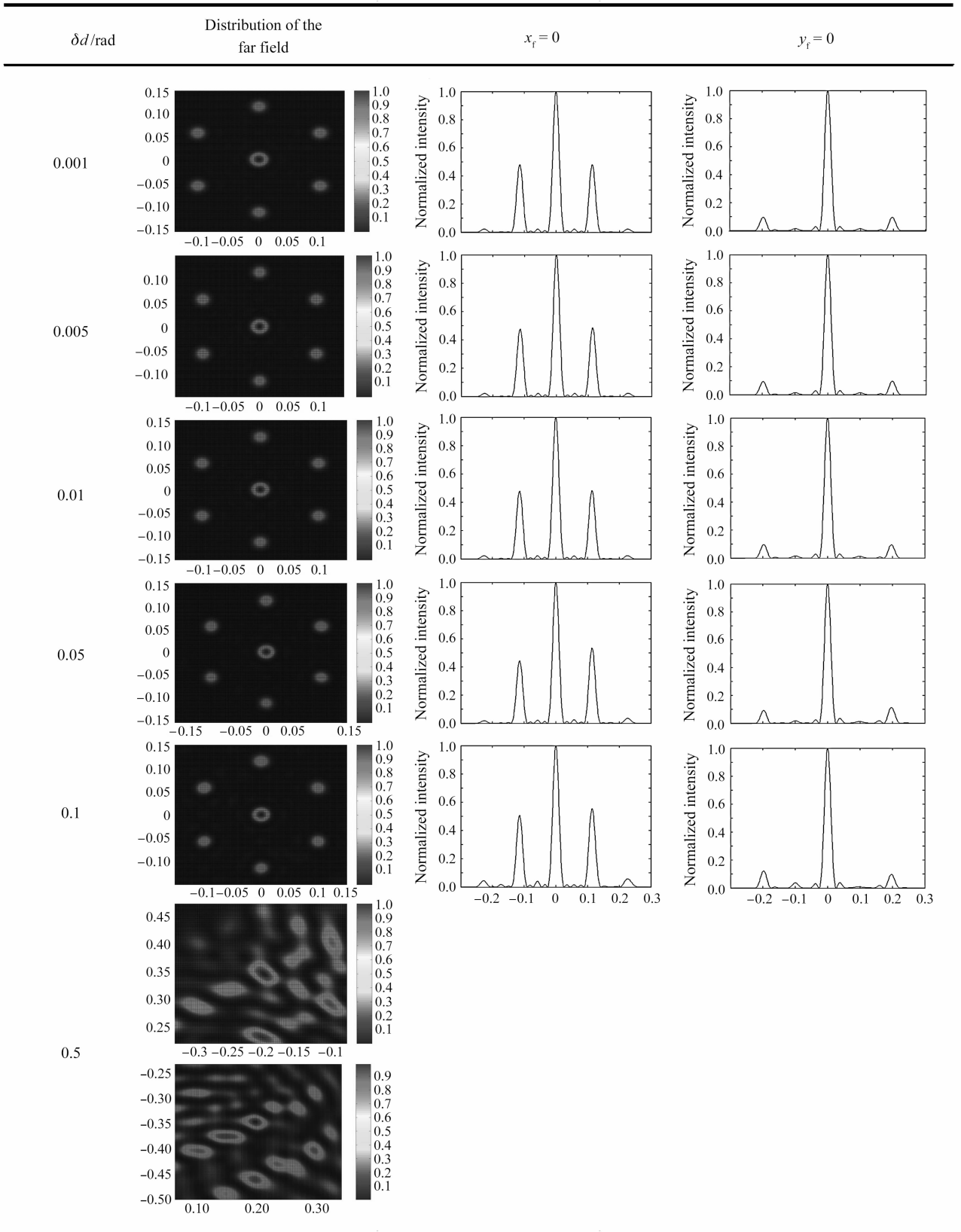


表 7 平行度误差对各评价参数的影响

Table 7 Influence of the parallel error on the diagnostic parameters

$\delta\alpha / \text{rad}$	0.5	0.1	0.05	0.01	0.005	0.001
$P_{\max} / \times 10^4$	0.21	3.88	5.00	5.44	5.45	5.45
$\eta / \%$	>95	55.5	53.5	48	47.6	48
$\tau\omega / \times 10^{-2}$		2.65	2.74	2.74	2.74	2.74
$P_{\text{cen}} / \times 10^6$		20.89	27.19	29.63	29.71	29.73
$P_{\text{ave}} / \times 10^{10}$		0.947	1.15	1.26	1.26	1.26

## 4 结 论

通过数值模拟,对占空比和组束误差对远场光场分布的影响进行了研究。分析发现,远场光场的分布直接受到输出端平面光场空间频谱的影响,特别是空间频谱中低频分量的分布将直接影响到中心光斑的平均光强和峰值功率。计算结果表明,增加输出单元的占空比只能提高中心光斑的能量,但要提高中心光斑的平均光强,只能通过增加空间频谱中低频分量的比例来实现。通过分析还发现,虽然占空比的增加无法提高中心光斑的平均光强,但是可以减小位置误差的影响,提高光纤激光器相干合成系统的能量转换效率。最后,通过对平行度误差影响的分析,发现在相干合成系统中,该误差应控制在0.01 rad以内,现有技术可以将平行度误差控制在角秒量级,是能够满足控制要求的。

## 参 考 文 献

- 1 Y. Jeong, J. K. Sahu, D. N. Payne *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(25):6088~6092
- 2 T. Y. Fan. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2005, **11**(3):567~577
- 3 Li Yongzhong, Fan Dianyuan. Beam combining of fiber laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(9):26~29  
李永忠,范滇元. 光纤激光器光束的叠加技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(9):26~29
- 4 Jesse Anderegg, Stephen Brosnan, Eric Cheung *et al.*. Coherently coupled high power fiber arrays [C]. *SPIE*, 2006, **6102**:61020U-1~61020U-5
- 5 Thomas Shay. Theory of electronically phased coherent beam combination without a reference beam [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(25):12188~12195
- 6 T. M. Shay, Vincent Benham, Lt. Justin Spring *et al.*. Self-referenced locking of optical coherence by single-detector electronic-frequency tagging [C]. *SPIE*, 2006, **6102**:61020V-1~61020V-5
- 7 T. M. Shay, Vincent Benham, J. T. Baker *et al.*. First experimental demonstration of self-synchronous phase locking of an optical array [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(25):12015~12021
- 8 Xiao Rui, Hou Jing, Jiang Zongfu. Study of far field distribution of fiber arrays [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(8):4550~4555  
肖 瑞,侯 静,姜宗福. 光纤放大器阵列的远场特性研究[J]. *物理学报*, 2007, **56**(8):4550~4555
- 9 P. K. Cheo, A. Liu, G. G. King. A high-brightness laser beam from a phase-locked multicore Yb-doped fiber laser array [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(5):439~441
- 10 Yanming Huo, Peter K. Cheo, George G. King. Fundamental mode operation of a 19-core phase-locked Yb-doped fiber amplifier [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(25):6230~6239
- 11 C. J. Corcoran, K. A. Pasch. Self-Fourier functions and coherent laser combination [J]. *J. Phys. A: Math. Gen.*, 2004, **37**:L461~L469
- 12 C. J. Corcoran, K. A. Pasch. Modal analysis of a self-Fourier laser cavity [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2005, **7**:L1~L7
- 13 Christopher J. Corcoran, Frederic Durville. Experimental demonstration of a phase-locked laser array using a self-Fourier cavity [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**:201118-1~201118-3
- 14 He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Coherent output power of 60W from two large-core double-cladding fiber lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8):1279~1280  
何 兵,楼祺洪,周 军等. 两根大芯双包层光纤激光器获得60 W相干输出[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8):1279~1280
- 15 He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Phase-locking and high coherent power output of two fiber lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9):1153~1158  
何 兵,楼祺洪,周 军等. 两个光纤激光器的相位锁定及高相干功率输出[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9):1153~1158
- 16 Liao Yanbiao. Fiber Optics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 38~42  
廖延彪. 光纤光学[M]. 北京:清华大学出版社, 2000. 38~42