

基于亮度的激光光束合成系统性能

姜 曼^{1,2,3}, 马鹏飞^{1,2,3}, 周 朴^{1,2,3}, 刘泽金^{1,2,3}

¹国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;

²湖南省大功率光纤激光协同创新中心, 湖南 长沙 410073;

³高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073

摘要 光束合成是突破单路激光功率限制、获得高功率激光输出的重要手段。以亮度为判据, 对不同光束合成方法的合成效果进行理论研究, 给出了激光光束合成效果的预评价方法。分析了亮度、光束质量因子和 Strehl 比 3 个描述光束质量的重要参量之间的关系, 给出了亮度与 Strehl 比的关系式, 据此得出了相干合成系统与光谱合成系统亮度的定标放大公式, 并对两种系统的功率与亮度定标放大能力进行了比较。

关键词 光纤光学; 光谱合成; 相干合成; 亮度; Strehl 比; 光纤激光

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0714001

Performance of Laser Beam Combination System Based on Brightness

Jiang Man^{1,2,3}, Ma Pengfei^{1,2,3}, Zhou Pu^{1,2,3}, Liu Zejin^{1,2,3}

¹ College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

² Hunan Provincial Collaborative Innovation Center of High Power Fiber Laser, Changsha, Hunan 410073, China;

³ Hunan Provincial Key Laboratory of High Power Laser Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract Beam combination is an important method to break through single laser power limit and obtain high power laser output. Brightness is taken as the criterion, and theoretical investigation about the combination effect of different methods is carried out. The pre-evaluation method of laser beam combination effect is given. Relationship among three important parameters used to describe beam quality, including brightness, beam quality factor and Strehl ratio, are analyzed. The formula describing the relationship between brightness and Strehl ratio is given, and brightness scaling magnification formulas of coherent beam combination system and spectral beam combination system are obtained. The power and the brightness scaling amplification capability of the two systems are compared.

Key words fiber optics; spectral beam combination; coherent beam combination; brightness; Strehl ratio; fiber laser

OCIS codes 140.3298; 140.3280; 060.2320

1 引 言

热畸变、非线性效应和光热损伤等是限制单元激光器获得高功率、高光束质量激光输出的重要因素^[1-2]。相干合成(CBC)和光谱合成(SBC)是提升激光输出功率并保持良好光束质量的重要手段^[3], 近年来成为高能激光技术领域的研究热点^[4-5]。实现 CBC 和 SBC 的方法有多种, 在合成系统的研制过程中, 一般需要事先对拟采用的技术方案进行评估, 其中关键是要对合成系统的功率定标放大能力与合成后的光束质量进行评估。

在 CBC 系统中, 各单元激光自身的特性及它们之间的相对相位、强度、偏振等的随机变化对合成效果有重要影响^[6-7]。人们采用 Strehl 比(S_{tr})、光束传输因子、合成效率等参数评价 CBC 的效果^[6-14], 并给出了单路激光特性、光路准直、合成路数等因素对合成效率及合成中心光强的影响, 但这些方法大都不能评判在特

收稿日期: 2017-01-12; **收到修改稿日期:** 2017-03-10

作者简介: 姜 曼(1990—), 女, 博士研究生, 主要从事光纤激光技术方面的研究。E-mail: jiangman7@126.com

导师简介: 周 朴(1984—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事高功率光纤激光方面的研究。

E-mail: zhoupu203@163.com(通信联系人)

定条件下各种合成方案的优劣。相比于 CBC 系统, SBC 的伺服系统相对简单, 在一些对时间相干性没有要求 (即对线宽要求不高) 的应用领域受到了广泛关注^[2,4,15-22]。SBC 系统中多路不同波长的激光在近场和远场同时合成, 可采用亮度较为方便地描述输出光束质量^[15]。亮度与系统的总功率和光束质量相关。文献[5]给出了亮度 B 与合成激光路数 N 以及光束质量因子 M^2 的粗略关系, 即 $B \approx fNP_0/[\lambda^2(M^2)^2]$, 其中 P_0 为单路激光功率, f 为小于 1 的系数, λ 为波长。利用该公式可以描述 SBC 系统的输出亮度^[15]。对于 CBC 系统, M^2 不能准确描述 CBC 的光束质量, 因此无法直接利用该公式描述 CBC 系统的输出亮度。

本文围绕 CBC 系统和 SBC 系统的亮度开展研究。利用亮度公式分析 CBC 系统中各单元激光之间的相对相位、强度、偏振等物理量的控制精度对系统亮度定标放大的影响; 利用亮度公式对 CBC、SBC 进行了比较分析。在对 B 、 M^2 和 S_{tr} 3 个参量进行比较与分析的基础上, 建立了 B 与 S_{tr} 的关系式; 该关系式可用于研究合成系统亮度定标放大的主要影响因素, 反映合成激光的光束质量变化和定标放大极限条件, 体现对系统设计的技术要求。推导了激光合成系统的亮度公式, 利用亮度对 CBC、SBC 的合成效果进行比较与评价, 并建立了两者共同的评价参量。

2 光束质量参量 S_{tr} 、 M^2 、 B 及其相互关系

在激光合成系统的应用中, 发射焦平面(或远场)中心光斑能量集中度是系统设计关注的重点, 有多种指标参量可对其进行描述, 如光束传输因子、桶中功率、亮度等。研究人员根据不同的研究对象和目标选择适当的指标参量对系统进行评价。在 CBC 系统中, 最简单的方法是采用 S_{tr} 来评价合成光束的光束质量。 S_{tr} 可以建立远场中心光强变化与光束质量的影响因素之间的联系^[8-10], 但不能反映合成系统的综合性能^[11]。在 SBC 系统中, 输出光束质量受单元激光光束质量与合成元件对不同波长激光色散的影响, 一般可以采用 M^2 描述系统输出光束质量^[17-19]。

为了在宏观层面对不同的合成技术方案进行比较与分析, 应选取能与光束的相位、抖动等残差直接关联的指标参量进行分析, 以评估系统的技术要求。在光束质量的评价因子中, S_{tr} 适用于从理论上分析激光系统输出光束质量的变化规律, 而 B 能够反映远场中心光斑的能量集中度。设激光近场复振幅 $\tilde{U}(\mathbf{r}) = A(\mathbf{r})\exp[i\phi(\mathbf{r})]$ 。传输距离 z 满足的远场中心光强分布为

$$I(\mathbf{r}', z) = \frac{1}{(\lambda z)^2} \left| \iint A(\mathbf{r}) \exp(i\phi) \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda z} \mathbf{r} \cdot \mathbf{r}'\right) d\mathbf{r} \right|^2, \quad (1)$$

式中 $\mathbf{r} = (x, y)$ 为光场横截面的坐标, ϕ 为光束相位分布函数。这里假设 z 满足远场条件 $z \gg d^2/\lambda$, d 为光束口径, 积分区域为光束横截面分布区域。 S_{tr} 定义为远场中心光强与无相位残差理想光束(光束入射功率相同、近场口径相同且近场光束的相位和光强均匀分布)的中心光强 $I_i(\mathbf{r}', z)$ 之比^[23], 即

$$S_{tr} = I(\mathbf{r}' = 0, z) / I_i(\mathbf{r}' = 0, z) = \frac{\left| \iint A(\mathbf{r}) \exp(i\phi) d\mathbf{r} \right|^2}{\left| \iint A(\mathbf{r}) d\mathbf{r} \right|^2}. \quad (2)$$

(2)式可以用于分析光束波前相位畸变对 S_{tr} 的影响程度, 如当波前畸变均方差为 σ_ϕ^2 时, S_{tr} 近似为 $\exp(-\sigma_\phi^2)$ 。

描述光束质量的另一重要参量为 M^2 , 在一定条件下建立 M^2 与 S_{tr} 的关系。在多数情况下, 激光远场中心光斑光强分布可近似为高斯分布^[24]。对于强度为高斯分布的光束, 光束近场口径不变的条件下, 可以证明峰值功率 P' 与理想条件下的峰值功率 P'_i 以及 M^2 满足^[25]

$$P' = \frac{P'_i}{(M^2)^2}. \quad (3)$$

由(2)式可得

$$S_{tr} = \frac{1}{(M^2)^2}. \quad (4)$$

M^2 可定义为^[26]

$$M^2 = \frac{w\theta}{w_0\theta_0}, \quad (5)$$

式中 w, θ 分别为实际光束的腰斑半径和远场半角宽度, w_0, θ_0 分别为理想光束的腰斑半径和远场半角宽度。

B 的定义为单位面积(光束横截面积 S)、单位立体角(远场光斑的立体角 Ω) 内的功率, 即 $B = P / (S\Omega)$, 其中 P 为光束的总功率, $\Omega = \pi\theta^2$, $S = \pi w^2$, 光束亮度为

$$B = \frac{P}{S\Omega} = \frac{P}{\pi^2 (w\theta)^2} = \frac{P}{\pi^2 (w_0\theta_0)^2 \left(\frac{w\theta}{w_0\theta_0}\right)^2} = \frac{P}{\lambda^2 (M^2)^2}, \quad (6)$$

(6)式利用了(5)式和理想高斯光束满足的关系式 $w_0\theta_0 = \lambda/\pi$ 。由(4)、(6)式可得光束的亮度为

$$B = \frac{P}{\lambda^2 (M^2)^2} = \frac{P}{\lambda^2} S_{tr}。 \quad (7)$$

(7)式表明只有在光束质量不变的条件下, 功率放大才能实现相应的亮度放大。

为了描述多光路合成系统, 重新定义合成光束的 S_{tr} 为远场中心光强与相同功率条件下光强均匀分布在相同口径的理想光束的中心光强 $I_{in}(\mathbf{r}', z)$ 之比。根据 $P = \iint |\tilde{U}(\mathbf{r})|^2 d\mathbf{r} = \iint |A(\mathbf{r})|^2 d\mathbf{r}$ 可得到该光束光强均匀分布时的平均振幅为

$$A_{in} = \left(\frac{1}{S} \iint |A(\mathbf{r})|^2 d\mathbf{r} \right)^{1/2}。 \quad (8)$$

由(1)、(3)式可得, 相同口径下光强均匀分布的理想光束的远场中心光强为

$$I_{in}(\mathbf{r}'=0, z) = \frac{1}{(\lambda z)^2} \left| \iint A_{in} d\mathbf{r} \right|^2 = \frac{1}{(\lambda z)^2} \left| \iint \left(\frac{1}{S} \iint |A(\mathbf{r})|^2 d\mathbf{r} \right)^{1/2} d\mathbf{r} \right|^2 = \frac{S}{(\lambda z)^2} \iint |A(\mathbf{r})|^2 d\mathbf{r} = \frac{SP}{(\lambda z)^2}。 \quad (9)$$

根据(9)式, S_{tr} 的定义可扩展为

$$S_{tr} = \frac{I(\mathbf{r}'=0, z)}{I_{in}(\mathbf{r}'=0, z)} = \frac{\left| \iint A(\mathbf{r}) \exp(i\phi) d\mathbf{r} \right|^2}{S \iint |A(\mathbf{r})|^2 d\mathbf{r}} = \frac{\left| \iint A(\mathbf{r}) \exp(i\phi) d\mathbf{r} \right|^2}{SP}。 \quad (10)$$

激光的性能可通过光束的内秉参量(如相位、光强等特征参量)来描述, 与光束的口径和传输距离等外在参数无关。通过扩展 S_{tr} 的定义, 可使(10)式适用于多光束合成系统的性能描述。

3 CBC 亮度影响因素分析

CBC 利用各路激光的光场在远场的相干叠加来实现系统功率和亮度的增加。如图 1(a)所示, 考虑 N 束激光在空间并列排布, 设每束激光光场为 $A_j(\mathbf{r} - \mathbf{r}_j) \exp(i\phi_j)$ [$\mathbf{r}_j = (x_j, y_j)$ 为第 j 束激光的中心坐标], 近场横截面积为 S_0 , 每束激光的平均面积 $S_{i0} = S/N$, 平均功率为 P_0 , N 束激光空间分布的总横截面积为 S , 总功率 $P_{tot} = NP_0$, 则由(1)式得到 CBC 的远场光强为

$$I(\mathbf{r}', z) = \left\langle \frac{1}{(\lambda z)^2} \left| \sum_j \iint A_j(\mathbf{r} - \mathbf{r}_j) \exp(i\phi_j) \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda z} \mathbf{r} \cdot \mathbf{r}'\right) d\mathbf{r} \right|^2 \right\rangle = \left\langle \frac{1}{(\lambda z)^2} \left| \sum_j \iint A_j(\mathbf{r}) \exp(i\phi_j) \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda z} \mathbf{r}_j \cdot \mathbf{r}'\right) \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda z} \mathbf{r} \cdot \mathbf{r}'\right) d\mathbf{r} \right|^2 \right\rangle。 \quad (11)$$

由(10)式可得 CBC 光束的 S_{tr} 可表示为

$$S_{tr} = \frac{I(\mathbf{r}'=0, z)}{I_{in}(\mathbf{r}'=0, z)} = \frac{\left\langle \left| \sum_j \iint A_j(\mathbf{r}) \exp(i\phi_j) d\mathbf{r} \right|^2 \right\rangle}{S \iint \left| \sum_j A_j(\mathbf{r}) \right|^2 d\mathbf{r}} = \frac{S_0 \left\langle \left| \frac{\sum_j \iint A_j(\mathbf{r}) \exp(i\phi_j) d\mathbf{r}}{S_0} \right|^2 \right\rangle}{NS_{i0} NP_0} = F \frac{\left\langle \left| \frac{\sum_j \iint A_j(\mathbf{r}) \exp(i\phi_j) d\mathbf{r}}{S_0} \right|^2 \right\rangle}{N^2 P_0}, \quad (12)$$

式中 $F = NS_0/S = S_0/S_{i0}$ 为占空比。

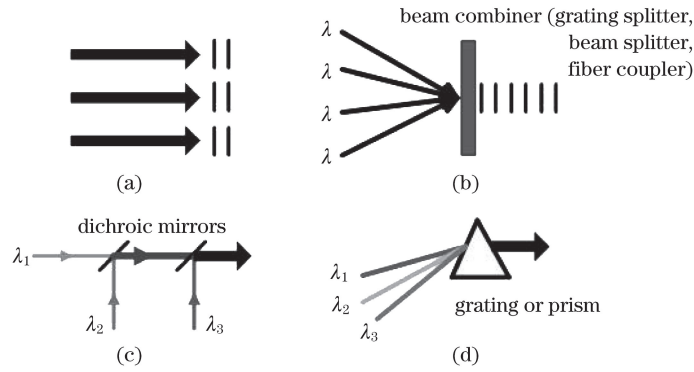


图 1 激光合成系统原理示意图。(a)多光路相干并束;(b)多光路相干合束;
(c)纵向级联型 SBC;(d)横向并联型 SBC

Fig. 1 Principle schematic of laser combination system. (a) Multi-pass coherent parallel beams;
(b) multi-pass coherent combination beams; (c) longitudinal-cascaded SBC;
(d) transverse-parallel SBC

3.1 每路激光光束近场均匀且相位相互不关联

假设每路激光光束近场光强均匀,即 $A_j(\mathbf{r})=A_0$,且不同相位之间相互不关联,并假设 $\langle \phi_j \rangle = 0$,而均方差 $\sigma_\phi^2 = \langle \phi^2 \rangle - \langle \phi \rangle^2 = \langle \phi^2 \rangle$,由(12)式得到该条件下的 S_{tr} 可表示为

$$S_{R^0} = F \frac{\left\langle \left| \sum_j \exp(i\phi_j) \right|^2 \right\rangle}{N^2} = F \frac{\left\langle \sum_l \sum_j \exp(i\phi_j) \exp(-i\phi_l) \right\rangle}{N^2} = F \left\{ 1 + \frac{N-1}{N} [1 + \exp(-\sigma_\phi^2)] \right\}. \quad (13)$$

上述分析使用了 $\langle \exp(i\phi) \rangle = \exp(-\sigma^2/2)$ 和

$$\left\langle \sum_l \sum_j \exp(i\phi_j) \exp(-i\phi_l) \right\rangle = \delta_{jl} \exp(-\sigma_\phi^2), \quad (14)$$

以及^[9,27]

$$\left\langle \sum_l \sum_j \exp(i\phi_j) \exp(-i\phi_l) \right\rangle = \left\{ \sum_l \sum_j \langle \exp(i\phi_j) \exp(-i\phi_l) \rangle_{j \neq l} + \sum_l \sum_j \langle \exp(i\phi_j) \exp(-i\phi_l) \rangle_{j=l} \right\} = (N^2 - N) \exp(-\sigma_\phi^2) + N = N^2 \left\{ 1 - \frac{N-1}{N} [1 - \exp(-\sigma_\phi^2)] \right\}. \quad (15)$$

(13)式反映了光束占空比和单元激光的随机相位对合成光束 S_{tr} 的影响,这里的随机相位是由单元激光随机相位噪声、光程差等产生的。从(13)式可以看出,CBC 中 S_{R^0} 与占空比呈正比例关系。例如,在光纤激光 CBC 中,合成光束按图 2 所示的空间形式排布,可获得的最大占空比 $F=0.78(d/D)^2=0.78(D$ 为合成光束口径)^[25],表明占空比对 CBC 系统的 S_{R^0} 影响显著且不可消除,在 CBC 系统的设计中应充分考虑占空比给系统的合成激光亮度带来的影响。

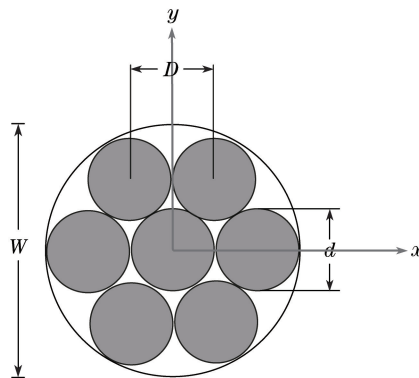


图 2 光纤激光 CBC 空间排布图
Fig. 2 Schematic of spatial arrangement of fiber laser CBC

3.2 单路激光倾斜与抖动的影响

如果考虑单路激光波前畸变和准直误差,单路激光的相位可表示为 $\Phi_j = \phi_j + \varphi_j(\mathbf{r})$ 。各路激光间的相对准直误差可以等效为单路激光的抖动,则合成光束的 S_{tr} 可由(13)式改写为^[28]

$$S_{R_1^a} = S_{R^a} \frac{\exp(-\sigma_\varphi^2)}{1 + [D/(0.44\lambda)]^2 \sigma_a^2}, \quad (16)$$

式中右边分子积的分子表示激光束波前畸变所带来的影响, $\sigma_\varphi^2 = \langle \varphi^2 \rangle - \langle \varphi \rangle^2$ 为波前畸变均方差;分母表示单路激光准直误差对 S_{tr} 的影响,其中 σ_a^2 为各单元激光相对准直均方差。此处采用文献[28]的结果,将该均方差等效为单路激光抖动。

3.3 单路激光的光强与偏振涨落影响

设合成光束的平均振幅 $\bar{A}_0 = \sum_j A_{j0}/N$, 单路光束的振幅 $A_j = A_0 + \delta A_j$ (A_0 为合成光束的振幅)、光场 $\mathbf{A}_j = A_0 [\cos(\delta\chi_j) \mathbf{e}_x + \sin(\delta\chi_j) \mathbf{e}_y]$, 其中 $\delta\chi_j$ 表示偏振态的扰动量, \mathbf{e}_x 为 x 轴方向的单位光场, \mathbf{e}_y 为 y 轴方向的单位光场。光束偏振的主方向为 y 轴, $\delta\chi_j$ 为小量时 $\cos(\delta\chi_j) \approx (1 - \delta\chi_j^2)$ 。利用(13)式、文献[6]中的(16)式和文献[7]中的(64)式,可得到各单元光束的强度和偏振发生涨落时合成光束的 S_{tr} 为

$$S_{R_2^a} = S_{R_1^a} \left(1 - \frac{\sigma_A^2}{\bar{A}_0^2} \right) \left\{ 1 - \frac{N-1}{N} [1 - \exp(-\sigma_\chi^2)] \right\}, \quad (17)$$

式中右边分子乘积的第二项、第三项分别表示各光束间强度相对变化均方差、偏振涨落的作用, $\sigma_A^2 = (\langle \delta A_j^2 \rangle - \langle \delta A_j \rangle^2) / \bar{A}_0^2$, σ_χ^2 为偏振涨落的均方差。

3.4 各单元激光束间相位相互关联的影响

在 CBC 中,若各路激光光束间的相位相互关联,将会对 S_{tr} 产生重要影响。假设 CBC 中各光束间的相位相干度为 γ , 则相位对 S_{tr} 产生的影响为^[8] $\langle S \rangle = \frac{2(1-\gamma^N)}{N(1-\gamma)} - \frac{2\gamma[1-N\gamma^{N-1}+(N-1)\gamma^N]}{N^2(1-\gamma)^2} - \frac{1}{N}$ 。假设光束 j 与光束 $j+k$ 间的相干度满足^[5] $\gamma^k = \delta_{j,j+k} = \langle A_j A_{j+k}^* \rangle / \langle |A_j|^2 \rangle$ (其中 A_{j+k}^* 为 A_{j+k} 的共轭)。当光束完全相干时 $\gamma=1$, 完全不相干时 $\gamma=0$ 。

将上述影响因素均考虑在内,可得到 CBC 输出光束的 S_{tr} 为

$$S_{R_1^c} = S_{R_2^a} \langle S \rangle, \quad (18)$$

或

$$S_{R_1^c} = \frac{F \exp(-\sigma_\varphi^2) \left(1 - \frac{\sigma_A^2}{\bar{A}_0^2} \right) \left\{ 1 - \frac{N-1}{N} [1 - \exp(-\sigma_\chi^2)] \right\}}{1 + [D/(0.44\lambda)]^2 \sigma_a^2} \left\{ \frac{2(1-\gamma^N)}{N(1-\gamma)} - \frac{2\gamma[1-N\gamma^{N-1}+(N-1)\gamma^N]}{N^2(1-\gamma)^2} - \frac{1}{N} \right\}. \quad (19)$$

3.5 CBC 的亮度因子

亮度作为合成光束输出的评价指标,既能反映功率放大程度又能描述远场光斑能量集中度。将亮度与 S_{tr} 公式推广到合成系统,由(7)、(19)式得到 CBC 系统的亮度为

$$B = \frac{P_{\text{tot}}}{\lambda^2} S_{R_1^c} = \frac{NP_0}{\lambda^2} S_{R_2^a} \left\{ \frac{2(1-\gamma^N)}{N(1-\gamma)} - \frac{2\gamma[1-N\gamma^{N-1}+(N-1)\gamma^N]}{N^2(1-\gamma)^2} - \frac{1}{N} \right\} = \frac{NP_0}{\lambda^2} \frac{F \exp(-\sigma_\varphi^2) \left(1 - \frac{\sigma_A^2}{\bar{A}_0^2} \right) \left\{ 1 - \frac{N-1}{N} [1 - \exp(-\sigma_\chi^2)] \right\}}{1 + [D/(0.44\lambda)]^2 \sigma_a^2} \left\{ \frac{2(1-\gamma^N)}{N(1-\gamma)} - \frac{2\gamma[1-N\gamma^{N-1}+(N-1)\gamma^N]}{N^2(1-\gamma)^2} - \frac{1}{N} \right\}. \quad (20)$$

由(20)式可知,影响 CBC 系统输出光束亮度的因素主要包括:1)填充因子;2)单路激光特性,包括波前相位畸变、光束抖动、振幅涨落及偏振度的变化;3)各光束间的相干性。填充因子和单路激光特性对系统亮度的影响与合成路数无关,即合成系统的亮度与路数满足定标放大关系。需要特别说明的是,单路

激光的偏振度对合成光束亮度的影响表现为偏振因子 $1 - \frac{N-1}{N}[1 - \exp(-\sigma_x^2)]$ 随 N 的增加而减小, 最终趋于定值。图 3(a) 所示为 $1 - \frac{N-1}{N}[1 - \exp(-\sigma_x^2)]$ 随 N 的变化, 计算结果表明: 当 $N > 4$ 时, 偏振因子对亮度的影响趋于定值 $\exp(-\sigma_x^2)$, 该值仅与合成系统中各光束间的偏振涨落均方差有关。因此, 各单元光束的偏振涨落影响合成光束的亮度, 但不影响合成光束亮度与 N 之间的定标放大关系。图 3(b) 所示为归一化亮度 $B/(aP_0)$ 随 N 的变化, 其中 $a = S_{R_1^y} (1 - \sigma_\lambda^2 / \bar{A}_0^2) / \lambda^2$ (计算中假设各路光束完全相干, 即 $\gamma = 1$)。各光束间的相干度对合成光束亮度的影响使得亮度与 N 之间呈非线性增长关系。图 4 给出了不同相干度条件下合成系统输出光束亮度与 N 的关系, 纵坐标为 $B/(aP_0)$, 计算中假设各路光束的偏振一致 (即 $\sigma_x^2 = 0$)。由图 4 可知, 当各光束间的相干度小于 1 时, 亮度放大速率随 N 的增加而减小; 当 $\gamma < 0.9$ 、 $N > 20$ 时合成光束亮度的增加趋于饱和。由此可见, CBC 系统中各路光束之间的相干性对合成效果产生了重要影响。

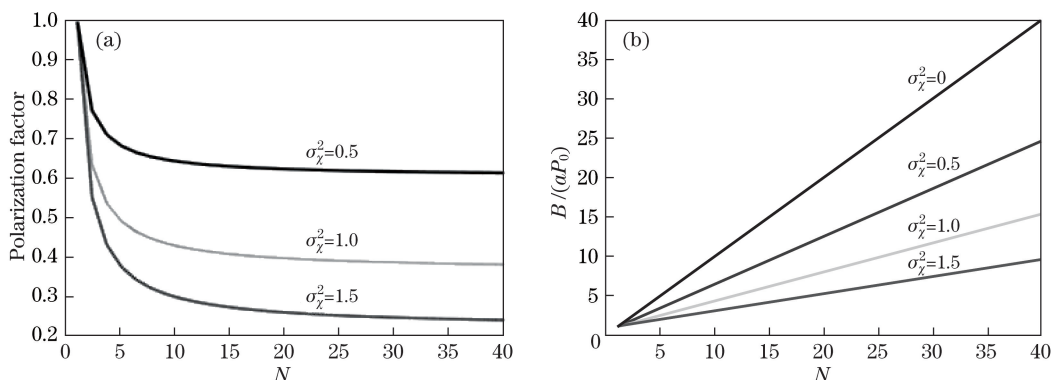


图 3 单路激光的偏振度对合成亮度的影响。(a) 偏振因子随合成路数的变化;
(b) 归一化亮度随合成路数的变化

Fig. 3 Effect of polarization degree of single laser on combination brightness.

(a) Variation in polarization factor with combination number;
(b) variation in normalized brightness with combination number

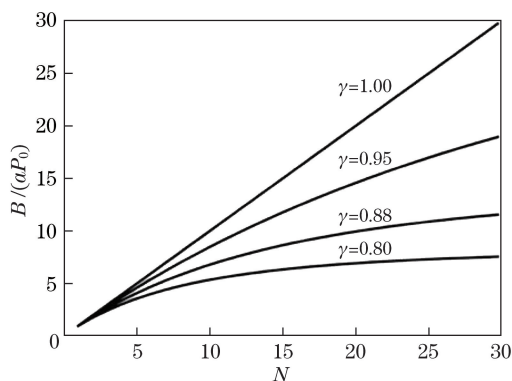


图 4 各路光束间相干度对合成亮度的影响

Fig. 4 Effect of correlation degree among beams on combination brightness

同时考虑各单元光束之间的偏振涨落和相干度对合成光束亮度的影响, 计算结果如图 5 所示。比较图 5(a)、(b) 可以得到: 在 CBC 系统中, 单元激光的偏振度主要影响合成光束亮度随路数的增加速率 (斜率效率), 而不改变亮度的增加趋势; 各单元光束之间的相干度是影响合成光束亮度增加趋势的主要因素。

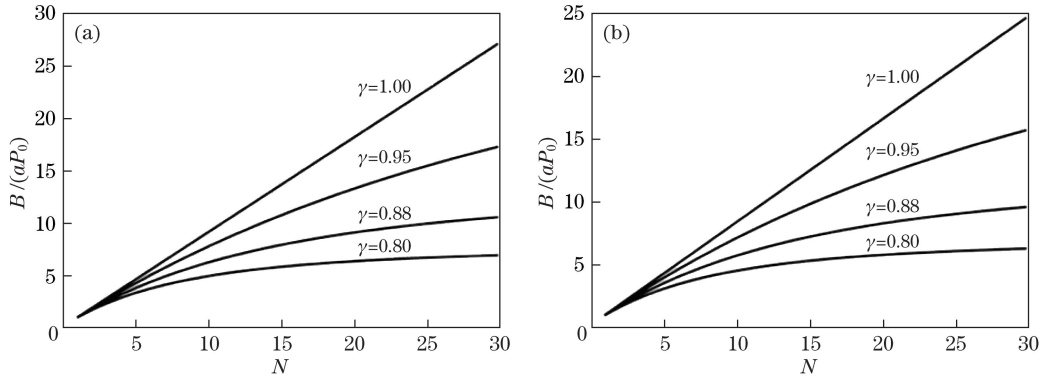


图 5 各单元光束之间的偏振涨落和相干度对合成亮度的影响。(a) $\sigma_x^2 = 0.1$; (b) $\sigma_x^2 = 0.2$

Fig. 5 Effects of polarization fluctuation and correlation degree among beams on combination brightness.

(a) $\sigma_x^2 = 0.1$; (b) $\sigma_x^2 = 0.2$

4 SBC 亮度影响因素分析

利用色散元件或双色元件实现不同波长的多路激光在近场和远场的 SBC[图 1(c)、(d)],从而提高输出激光的功率和亮度。这种合成方式要求各路光束近场光轴重合(即传输方向相同)、光瞳重合,因此合成光束的光强为 N 路单元激光光强之和,即

$$P_t = \sum_j P_j = \sum_j \iint |A_j \exp(i\Phi_j)|^2 dr. \quad (21)$$

根据亮度的定义,合成光束的亮度可以表示为各单束激光亮度 B_j 之和,即

$$B_{\text{cl}} = \sum_j B_j = \sum_j \frac{\eta_j P_j}{\lambda_j^2 (M^2)^2}, \quad (22)$$

式中 P_j 、 λ_j 、 η_j 分别为单路激光的功率、波长、耦合效率。

假设 SBC 中各路激光的耦合效率近似相等($\eta_j = \bar{\eta}$, 其中 $\bar{\eta}$ 为耦合效率),且功率 $P_j = \bar{P}_0 = \sum_j P_j / N$ 。同时,各单元激光相邻光束波长差 $\Delta\lambda$ 在 nm 量级,则有

$$\frac{1}{\lambda_j^2} \approx \frac{1}{\lambda_0^2} \left(1 - \frac{\delta_\lambda}{2\lambda_0}\right), \quad (23)$$

式中 $\lambda_0 = \sum_j \lambda_j / N$ 为中心波长。根据(23)式,可将(22)式近似为

$$B_{\text{cl}} \approx \sum_{j=-N/2}^{N/2} \frac{\bar{\eta} \bar{P}_0}{\lambda_0^2 (M^2)^2} \left(1 - \frac{\delta_\lambda}{2\lambda_0}\right) \approx \frac{N \bar{\eta} \bar{P}_0}{\lambda_0^2 (M^2)^2}. \quad (24)$$

(24)式表明,在 SBC 中,合成光束的亮度随合成路数呈线性增加,即合成亮度与合成路数呈线性定标放大关系。影响合成效果的因素是合成元件对光束的耦合效率和合成光束的光束质量,但这两个因素均不影响(24)式所表达的定标放大关系。(24)式适用于多光束的近场光轴重合和光瞳重合方式的非相干合成。此处仅以光栅 SBC 为例,讨论非相干 SBC 的亮度。

光栅 SBC 是通过光栅色散元件将不同波长、不同入射角的光束在近场和远场同时合成,如图 6 所示,其原理是光栅分光的逆向使用。为了提高合成的耦合效率,采用电介质光栅作为合成元件,该光栅采用多层介质结构以达到反射率高、热稳定的目的。在一定波长范围、一定入射角条件下,电介质光栅在特定衍射级上的衍射效率可达到 99% 以上^[16,29-30]。光栅 SBC 理论上可以实现 20~100 路的多光束合成^[15]。

由(24)式可知,SBC 中影响输出光束亮度的主要原因是单路激光光束质量的退化。在光栅 SBC 过程中,影响光束质量的因素主要有以下 3 个方面:1)光栅色散;2)各单元光束间的准直相对角偏差;3)高功率情况下光栅热畸变对光束波前的影响。光栅 SBC 中,单光栅合成系统中光栅色散对 M^2 的影响表现为^[19]

$$\begin{cases} M_x^2 = M_{x0}^2 + \frac{\Delta\lambda \pi d}{2\lambda \Delta \cos \psi}, \\ M_y^2 = M_{y0}^2 \end{cases} \quad (25)$$

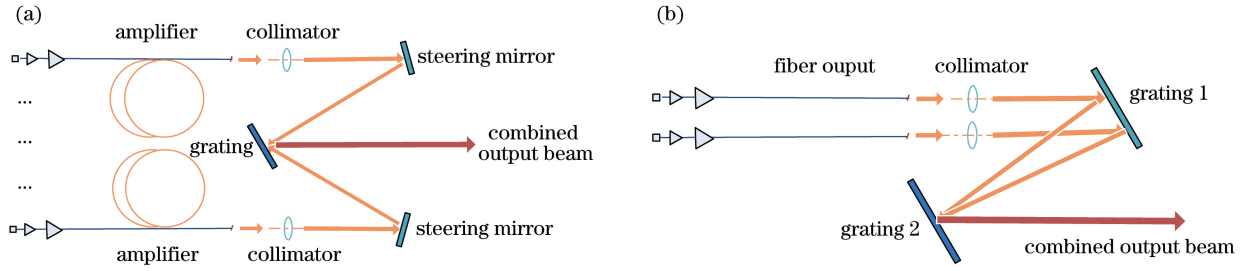


图 6 光栅 SBC 系统示意图。(a)单光栅 SBC;(b)双光栅 SBC

Fig. 6 Schematic of grating SBC system. (a) Single-grating SBC; (b) dual-grating SBC

式中 M_x^2 、 M_y^2 分别为单元光束在 x 、 y 方向的光束质量, M_{x0}^2 、 M_{y0}^2 分别为单元光束在 x 、 y 方向的初始光束质量, ψ 和 Λ 分别为光束相对光栅平面法线的入射角和光栅常数。这里假设光谱在 $\Delta\lambda$ 内均匀(即平顶)分布。在双光栅合成系统中,光栅色散对光束质量的影响为^[19]

$$\begin{cases} M_x^2 = M_{x0}^2 \left(1 + \frac{\Delta D \Delta \lambda}{2d \delta_\lambda} \right), \\ M_y^2 = M_{y0}^2 \end{cases} \quad (26)$$

式中 ΔD 为相邻单元激光束之间的间距。

各单元光束间的准直相对角偏差可以等效为单路抖动 $1 + [D/(0.44\lambda)]^2 \sigma_a^2$ 。高功率激光致使光栅发热产生的光束波前畸变的影响为 $1/\exp(-\sigma_{th}^2)$, 其中 σ_{th}^2 为波前畸变均方差。综合以上因素,可以得到光栅 SBC 的亮度为

$$B_{t1} \approx \frac{N \bar{\eta} \bar{P}_0}{\lambda_0^2 M_x M_y [1 + [D/(0.44\lambda)]^2 \sigma_a^2] \exp(\sigma_{th}^2)} \quad (27)$$

由上述分析可知,在 SBC 中各单路激光光束间的相干性不会影响合成光束质量;光束同时在近场和远场实现合成,因此无需考虑单元激光光束空间排布的占空比优化问题。(27)式表明光栅 SBC 可以实现合成功率 and 亮度的同时定标放大。

综上所述,在 CBC 中偏振和相位控制是影响合成光束质量的重要因素。各单元光束间的相干度使得系统在 $N > 4$ 时亮度开始偏离线性增加趋势,并随 N 的增加出现饱和效应。相比于 CBC,非相干 SBC 需要的控制简单很多。表 1 比较了 CBC 与 SBC 的光束质量影响因素。

表 1 激光合成亮度因子影响因素

Table 1 Influence factors of laser combination brightness factor

Influence factors on brightness	Tiled-aperture CBC (Fig. 2)	Grating SBC (Fig. 6)
Fill factor	$F = NS_0/S = S_0/S_0$	1
Beam profile nonuniformity σ_φ^2	$\exp(-\sigma_\varphi^2)$	$\exp(-\sigma_\varphi^2)$
Pointing and wavefront error σ_a^2	$\frac{1}{1 + [D/(0.44\lambda)]^2 \sigma_a^2}$	$\frac{1}{1 + [D/(0.44\lambda)]^2 \sigma_a^2}$
Amplitude imbalance σ_λ^2	$1 - \frac{\sigma_\lambda^2}{\bar{A}_0^2}$	1
Polarization error σ_χ^2	$1 - \frac{N-1}{N} [1 - \exp(-\sigma_\chi^2)]$	1
Beam correlation	Phase correlation among multiple beams γ $\frac{2(1-\gamma^N)}{N(1-\gamma)} - \frac{2\gamma[1-N\gamma^{N-1}+(N-1)\gamma^N]}{N^2(1-\gamma)^2} - \frac{1}{N}$	Spectral dispersion (single-grating SBC) $\begin{cases} M_x^2 = M_{x0}^2 + \frac{\Delta\lambda \pi d}{2\lambda\Lambda \cos \psi} \\ M_y^2 = M_{y0}^2 \end{cases}$

5 结 论

通过分析 B 、 M^2 和 S_{tr} 3 者之间的联系,在一定条件下建立了描述光束质量的亮度因子与 S_{tr} 的关系式。利用拓展 S_{tr} 的定义式对光束合成系统输出光束的效果进行了理论评价和比较。应用亮度评价因子分别对 CBC 与 SBC 系统的合成效果进行了理论分析。

在相干并列合成系统中,影响合成光束亮度的因素包括填充因子、单元激光特性(包括波前相位畸变、光束抖动、振幅涨落、偏振度的变化)以及各光束间的相干性。填充因子和单元激光特性对亮度的影响与合成系统中的路数无关,合成系统的亮度与路数满足定标放大关系;各光束间的相干度对合成光束亮度的影响使得亮度与 N 呈非线性增加关系:当 $\gamma < 1$ 、 $N > 4$ 时,亮度定标放大速率明显变缓;当 $\gamma < 0.9$ 时, $N > 20$ 后亮度随路数的增加趋于饱和。在 CBC 系统中,各路光束的相干性对合成效果有重要影响。以光栅 SBC 系统为例对非相干合成光束的亮度进行了理论计算与分析,研究表明影响 SBC 系统亮度的主要因素为单路激光的波前相位畸变、光束抖动以及光谱色散;各光束间的相干性、偏振度不会影响合成光束的亮度。相对于 CBC 系统,SBC 系统可以较为简洁地实现功率和亮度的同时定标放大。

参 考 文 献

- [1] Zhang B, Zhang R, Xue Y, *et al.* Temperature dependence of ytterbium-doped tandem-pumped fiber amplifiers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(2): 159-162.
- [2] Injeyan H, Goodno G D. High-power diode laser arrays[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1992, 28(4): 952-965.
- [3] Fan T Y. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2005, 11(3): 567-577.
- [4] Brignon A. Coherent laser beam combining[M]. Berlin: John Wiley & Sons, 2013.
- [5] Wirth C, Schmidt O, Tsybin I, *et al.* High average power spectral beam combining of four fiber amplifiers to 8.2 kW[J]. Optics Letters, 2011, 36(16): 3118-3120.
- [6] Goodno G D, Shih C C, Rothenberg J E. Perturbative analysis of coherent combining efficiency with mismatched lasers[J]. Optics Express, 2010, 18(24): 25403-25414.
- [7] Leshchenko V E. Coherent combining efficiency in tiled and filled aperture approaches[J]. Optics Express, 2015, 23(12): 15944-15970.
- [8] Leger J R. External methods of phase locking and coherent beam addition of diode lasers[J]. Surface Emitting Semiconductor Lasers and Arrays, 1993: 379-433.
- [9] Nabors C D. Effects of phase errors on coherent emitter arrays[J]. Applied Optics, 1994, 33(12): 2284-2289.
- [10] Xiao Rui, Zhou Pu, Hou Jing, *et al.* Effect of partial coherence of laser has on the irradiance distribution of coherent combining of fiber laser arrays in far field[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(2): 819-823.
肖 瑞,周 朴,侯 静,等. 激光器的部分相干性对光纤激光器阵列相干合成远场图样的影响[J]. 物理学报, 2007, 56(2): 819-823.
- [11] Zhou P, Liu Z, Xu X, *et al.* Numerical analysis of the effects of aberrations on coherently combined fiber laser beams[J]. Applied Optics, 2008, 47(18): 3350-3359.
- [12] Su Rongtao, Zhou Pu, Wang Xiaolin, *et al.* Influence of temporal error with different pulse shapes on coherent beam combination system[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(8): 084206.
粟荣涛,周 朴,王小林,等. 不同波形脉冲激光的时域误差对相干合成的影响[J]. 物理学报, 2012, 61(8): 084206.
- [13] Yu H L, Ma P F, Wang X L, *et al.* Influence of temporal-spectral effects on ultrafast fiber coherent polarization beam combining system[J]. Laser Physics Letters, 2015, 12(10): 105301.
- [14] Zhang Shulin, Feng Guoying, Zhou Shouhuan. Fiber modal content analysis based on spatial and spectral transform[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(15): 154202.
张澍霖,冯国英,周寿桓. 基于空间域和频率域傅里叶变换 F^2 的光纤模式成分分析[J]. 物理学报, 2016, 65(15): 154202.
- [15] Sanchez R A, Fan T Y, Augst S J, *et al.* Wavelength beam combining for power and brightness scaling of laser systems[J]. Lincoln Laboratory Journal, 2014, 20(2): 52-66.

- [16] Schreiber T, Wirth C, Schmidt O, *et al.* Incoherent beam combining of continuous-wave and pulsed Yb-doped fiber amplifiers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(2): 354-360.
- [17] Bochove E J. Theory of spectral beam combining of fiber lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2002, 38(5): 432-445.
- [18] Loftus T H, Thomas A M, Hoffman P R, *et al.* Spectrally beam-combined fiber lasers for high-average-power applications[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(3): 487-497.
- [19] Jiang Man, Ma Pengfei, Zhou Pu, *et al.* Beam quality in spectral beam combination based on multi-layer dielectric grating[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(10): 104203.
姜 曼, 马鹏飞, 周 朴, 等. 基于多层电介质光栅光谱合成的光束质量[J]. 物理学报, 2016, 65(10): 104203.
- [20] Loftus T H, Liu A, Hoffman P R, *et al.* 522 W average power, spectrally beam-combined fiber laser with near-diffraction-limited beam quality[J]. Optics Letters, 2007, 32(4): 349-351.
- [21] Jiang M, Ma P, Zhou P, *et al.* Spectral beam combining of fiber laser with wavelength separation broader than 60 nm[J]. Laser Physics, 2016, 26(11): 115104.
- [22] Ma Yi, Yan Hong, Peng Wanjing, *et al.* 9.6 kW common aperture spectral beam combination system based on multi-channel narrow-linewidth fiber lasers[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(9): 0901009.
马 毅, 颜 宏, 彭万敬, 等. 基于多路窄线宽光纤激光的9.6 kW共孔径光谱合成光源[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0901009.
- [23] Born M, Wolf E. Principles of optics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997: 460-464.
- [24] Hardy J W. Adaptive optics for astronomical telescopes[M]. New York: Oxford University Press, 1998: 114-115.
- [25] Motes R A, Berdine R W. Introduction to high-power fiber lasers[M]. Albuquerque: Directed Energy Professional Society, 2009: 178.
- [26] Koechner W. Solid-state laser engineering[M]. Berlin: Springer, 1999: 706.
- [27] Liang W, Satyan N, Aflatouni F, *et al.* Coherent beam combining with multilevel optical phase-locked loops[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2007, 24(12): 2930-2939.
- [28] Hardy J W. Adaptive optics for astronomical telescopes[M]. New York: Oxford University Press, 1998: 121.
- [29] Perry M D, Shannon C, Shults E, *et al.* High-efficiency multilayer dielectric diffraction gratings[J]. Optics Letters, 1995, 20(8): 940-942.
- [30] Hehl K, Bischoff J, Mohaupt U, *et al.* High-efficiency dielectric reflection gratings: Design, fabrication, and analysis[J]. Applied Optics, 1999, 38(30): 6257-6271.