

基于新型子孔径形状的高占空比孔径填充阵列相干合成

奚加超, 支冬, 马阎星, 司磊*

国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073

摘要 提出了基于 2 种新型子孔径形状的填充方案, 相较于传统圆形子孔径正六边形排列填充方案, 所提方案能获得更高的面积填充占比。通过评估相干合成的远场光束质量, 权衡光束截断导致的能量损耗与占空比改善带来的光束质量提升, 计算得到最优解。仿真结果表明, 相比于圆形子孔径正六边形排列填充方案, 所提 2 种方案能将远场桶中功率占比分别提升 9.2% 和 13.9%。所提孔径填充优化方案对提高光纤激光阵列分孔径相干合成效率具有一定的指导意义。

关键词 激光光学; 光纤激光阵列; 孔径填充; 占空比; 截断系数

中图分类号 TN24

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.041401

Coherent Beam Combining Based on High Filling Factor Array with New Sub-Aperture Shape

Xi Jiachao, Zhi Dong, Ma Yanxing, Si Lei*

College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China

Abstract Two filling schemes based on new sub-aperture shapes are proposed, which can achieve a higher area filling ratio than that for the filling scheme based on a hexagonal close-packed array with traditional circular sub-apertures. By the evaluation of the far-field beam quality and the balance between the energy loss caused by beam truncation and the beam quality improvement by filling factor improvement, an optimal solution is obtained. The simulation results show that these two new schemes can increase the proportion of power in the far field bucket by 9.2% and 13.9% comparing with those based on a hexagonal close-packed array with circular sub-apertures. The proposed aperture filling optimization schemes have some guidance value for increasing the efficiency of tiled-aperture coherent beam combining of fiber laser arrays.

Key words laser optics; fiber laser array; aperture filling; filling factor; truncation coefficient

OCIS codes 140.3510; 140.3290; 140.3298

1 引言

光纤激光器具有输出光束质量好、热管理方便、结构紧凑、转换效率高等优点, 在国防、工业以及医疗等领域得到了广泛应用^[1-2]。但是由于非线性效应、模式不稳定、热效应及材料损伤特性等因素的限制, 导致单台光纤激光器的输出功率有限^[3]。光纤激光相干合成通过对多束同频光纤激光的倾斜相差、活塞

相差以及偏振方向、光程差等因素进行控制, 使多束激光在目标处实现干涉, 从而达到在保证高光束质量输出的同时大幅提高光束输出功率的目的, 是突破单台光纤激光器输出功率限制的有效手段。

相干合成根据孔径填充的实现方式可以分成共孔径合成和分孔径合成两种方式。共孔径合成的各子光束由一个共同的孔径发射, 对于合束器件的高功率承受能力提出了较高的要求, 难以向大路数高功率

收稿日期: 2018-07-23; 修回日期: 2018-08-15; 录用日期: 2018-09-04

基金项目: 国家自然科学基金(61405255)

* E-mail: w_zt@163.com

扩展。目前报道的光纤激光共孔径相干合成最大功率是2016年美国空军实验室 Flores 等^[4]采用基于衍射光学元件实现的总输出功率4.9 kW。而分孔径合成的各子光束由分立的孔径输出,将承受的总功率分散到每一路子孔径上,有利于克服热损伤效应带来的功率提升限制问题,在合成路数拓展方面有着非常好的应用前景,2015年美国麻省理工学院林肯实验室利用42路光纤输出相干合成实现了44 kW的高功率接近理想光束质量的激光输出,并计划在2018年将系统改进为50 kW功率输出^[5]。

相干合成理想远场为多级衍射光斑,中央主瓣的能量占比是系统合成效率的直接体现。分孔径相干合成目标光束的中心主瓣功率与占空比密切相关,提高光束的占空比是获得高光束质量的关键。光纤激光的基模近似服从高斯分布,加上机械装配等因素影响,各路光束排布不可能无限紧密,光纤激光阵列的占空比一般远小于1^[6-8]。为了提高合成光束的占空比,需要在提高光束口径的同时减小相邻光束之间的距离,由此可以提高近场激光阵列有效出光面积占整个输出孔径面积的比率。由于高斯光束的能量分布均匀度较低,为提高相干合成效率,通常将输出的高斯光束截断,以牺牲边缘少量能量为代价获得更加均匀的强度分布。因此,如何利用孔径拼接等方式来尽可能提高激光阵列的占空比,具有很大的研究价值^[9-12]。2011年,美国戴顿大学和陆军研究实验室合作,利用自适应光纤准直器方案,将7路圆形子孔径采用六边密集堆积,实现7路100 mW量级相干合成^[13]。2013年,美国戴顿大学、Optonicus公司、美国陆军实验室又报道了7路、19路、21路大口径、高占空比光束拼接系统^[14],这3个系统的光斑直径为29.4 mm,相邻光束中心距离为37 mm,占空比为0.79。2017年,美国陆军研究实验室提出了一种7SH-MFF(semi-hexagonal, medium fill factor)的光束拼接方案^[15],中间采用一个正六边形的透镜,旁边围绕6个半六边形拼接的阵列,提高了占空比及合成效率。

本文提出了2种新的高占空比孔径填充方案,计算了高斯光束透过能量占比公式,得到每种拼接方案的最优截断系数值,并利用对相干合成效率的数值仿真验证了这2种方案的优越性。

2 基本原理

2.1 高斯光束传输理论

由激光谐振腔发出的基模高斯光束的横截面振幅分布遵守高斯函数,无论稳定腔的结构如何,沿 z 轴方向传播的基模高斯光束,都可以表示为^[16]

$$E(r, z) = \frac{c}{w(z)} \exp\left[-\frac{r^2}{w^2(z)}\right] \exp\left\{-i\left[k\left(z + \frac{r^2}{2R(z)}\right) - \arctan\frac{z}{f}\right]\right\}, \quad (1)$$

式中: c 为常数因子; f 为高斯光束的共焦参数; $R(z)$ 为在 z 点处与传播轴线相交的高斯光束等相位面上的曲率半径; $w(z)$ 为在 z 点处与传播轴线相交的高斯光束等相位面上的光斑半径; k 为波数; r 为任意一点与原点之间的距离。

根据波的叠加原理,当同时存在多列波时,其重叠区域中的每个点的振动是由该点处的各列波产生的振动合成。对于非相干叠加情况下的光强,可以简单地看作各个光束的光强算术和。

2.2 阵列光束拼接系统

在分孔径相干合成中,一种常用的方法是准直器直接拼接,即将多个准直器按照一定的空间位置排布。为了获得高的占空比,需要在提高光斑有效口径的同时减少相邻准直器间的距离。目前最常使用的紧密排列方式是六边形密积排列,如图1(a)所示。在此基础上,提出了2种新型子孔径的填充方案,如图1(b)和(c)所示,目标是在同样大小的阵列输出口径里获得更高的面积填充占比,以达到提高合成效率的效果。

2.3 高斯光束截断的数值计算

假定高斯光束在 $z=0$ 的发射平面上排列成阵列形式,中心单元的光束中心坐标为 $(0, 0)$,则发射平面上单元光束的光场可表示为

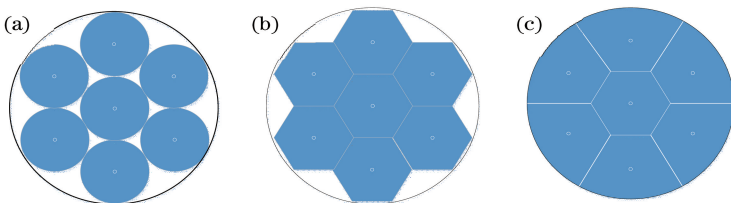


图1 3种子孔径填充方案。(a)圆形;(b)六边形;(c)组合

Fig. 1 Three filling schemes with different sub-aperture shapes. (a) Circle; (b) hexagon; (c) combination

$$E(x, y, 0) = A_0 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\omega_0^2}\right), \quad (2)$$

式中: A_0 为振幅常量; ω_0 为光束的腰斑半径。相干组束时, 为了获得更加均匀的光强分布, 通常采用硬边光阑将光束截断, 但是孔径光阑的存在会导致部分光能

量在近场被耗散。对于圆形子孔径, 定义高斯光束腰斑半径 ω_0 与单元光束孔径半径 r 的比值为单元光束的截断系数 T , 即 $T = \omega_0 / r$, T 值越大表明单元光束被截断的部分越多, 损失能量也越多。经光阑后的透射能量与总能量的比值随截断系数 T 的变化关系为^[17-18]

$$\begin{aligned} \gamma_1(T) &= \frac{\int_{-r}^r \int_{-r}^r |E_0(x, y)|^2 dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |E_0(x, y)|^2 dx dy} = \frac{\int_{-r}^r \int_{-r}^r A_0^2 \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{\omega_0^2}\right] dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A_0^2 \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{\omega_0^2}\right] dx dy} = \\ &= \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^r A_0^2 \exp\left(-\frac{2\rho^2}{\omega_0^2}\right) \rho d\rho d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{+\infty} A_0^2 \exp\left(-\frac{2\rho^2}{\omega_0^2}\right) \rho d\rho d\theta} = \frac{A_0^2 \times \frac{\pi\omega_0^2}{2} \left[1 - \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right)\right]}{A_0^2 \times \frac{\pi\omega_0^2}{2}} = 1 - \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{2}{T^2}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

对于正六边形子孔径, 定义高斯光束腰斑半径 ω_0 与六边形单元光束孔径内接圆半径 r 的比值为单元光束的截断系数 T ; 对于第 3 种的切角扇形子孔径, 虽然为非中心对称图形, 但可以与正六边形类似, 定义高斯光束腰斑半径 ω_0 与单元光束孔径内接圆半径 r 的比值为单元光束的截断系数 T 。通过数值计算得到透过子孔径的能量占比与截断系数之间的关系数据, 对计算结果进行数值拟合, 可以得到正六边形与切角扇形子孔径透射

的能量与总能量的比值 γ 与截断系数 T 的拟合方程分别为

$$\gamma_2(T) = 1 - \exp\left(-\frac{2.193}{T^2}\right), \quad (4)$$

$$\gamma_3(T) = 1 - \exp\left[-\frac{2.696}{(T + 0.053)^2}\right]. \quad (5)$$

拟合结果如图 2 所示, 计算数据点基本落在拟合方程曲线上, 相关系数 R^2 非常接近于 1, 表示拟合效果非常好。

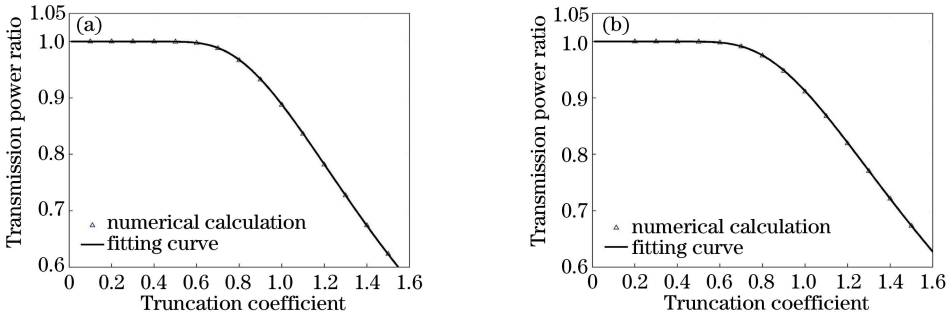


图 2 子孔径透射能量占比与截断系数间的关系。(a)六边形;(b)切角扇形

Fig. 2 Relationship between transmission power ratio and truncation coefficient. (a) Hexagon; (b) cut sector

2.4 相干合成光束质量评价因子

对于实际的高能激光系统, 光束传输到远距离处的聚焦能力是激光光束质量的典型表征, 也是非常重要的性能指标, 光束聚焦能力最直观的体现就是远场靶面上的能量集中度。因此, 对于相同发射口径的光束而言, 传输到远场靶面上的激光能量集中程度能够直接反映光束质量的优劣。光束传输因子(Beam Propagation Factor, BPF)可以较好地评价相干合成光束的光束质量, BPF 定义为^[19-20]

$$\eta_{\text{BPF}} = 1.19(P/P_{\text{total}}), \quad (6)$$

式中: P 为在远场靶面半径为 $1.22\lambda L/D$ 大小的桶中功率, λ 为激光波长, L 为激光传输距离, D 为激光阵列的外接圆直径; P_{total} 为输出光束的总功率。其中 $1.22\lambda L/D$ 和 1.19 是从理想均匀平面波的圆孔衍射得到的判据, 1.19 是圆孔衍射远场艾里斑内能量占总能量 83.8% 的倒数。

3 数值模拟

对以上所提出的几种孔径填充方案的相干合成效果进行仿真分析。在数值仿真中, 激光波长设置

为1064 nm,激光输出阵列的外接圆直径设置为9 cm,远场位置选在一倍衍射距离处,即 $z = kD^2/8$ 处,仿真中采用的参数及详细数值如表1所示。

表1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Value
Wavelength λ /nm	1064
Diameter of array D /cm	9
Launch distance L /km	5.98

3.1 7路不同子孔径形状相干合成效果随截断系数的变化关系

考虑到系统截断的影响,对于以上所提到的3种子孔径拼接方案,分别给出了相干合成BPF与截断系数 T 的关系曲线。如图3所示,3种方案的最优截断系数分别为0.89, 0.94, 0.97。

3.2 7路不同子孔径形状相干合成效果

对每一种形状都采取最优截断系数进行仿真分析,仿真结果见表2及如图4所示。

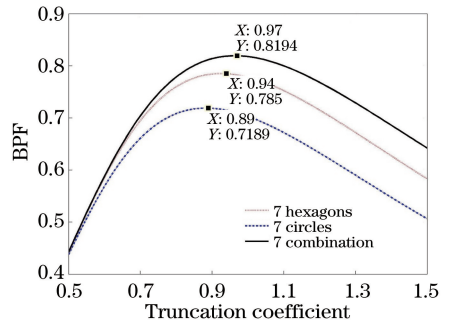


图3 不同子孔径拼接方案的BPF与截断系数间的关系
Fig. 3 Relationship between BPF and truncation coefficient for splicing schemes with different shapes

表2 仿真结果

Table 2 Simulation results

Shape	(a) 7	(b) 7	(c) 7
	circles	hexagons	combination
Area filling ratio	0.78	0.83	1
Normalized peak power	0.191	0.274	0.351
BPF	0.719	0.785	0.819

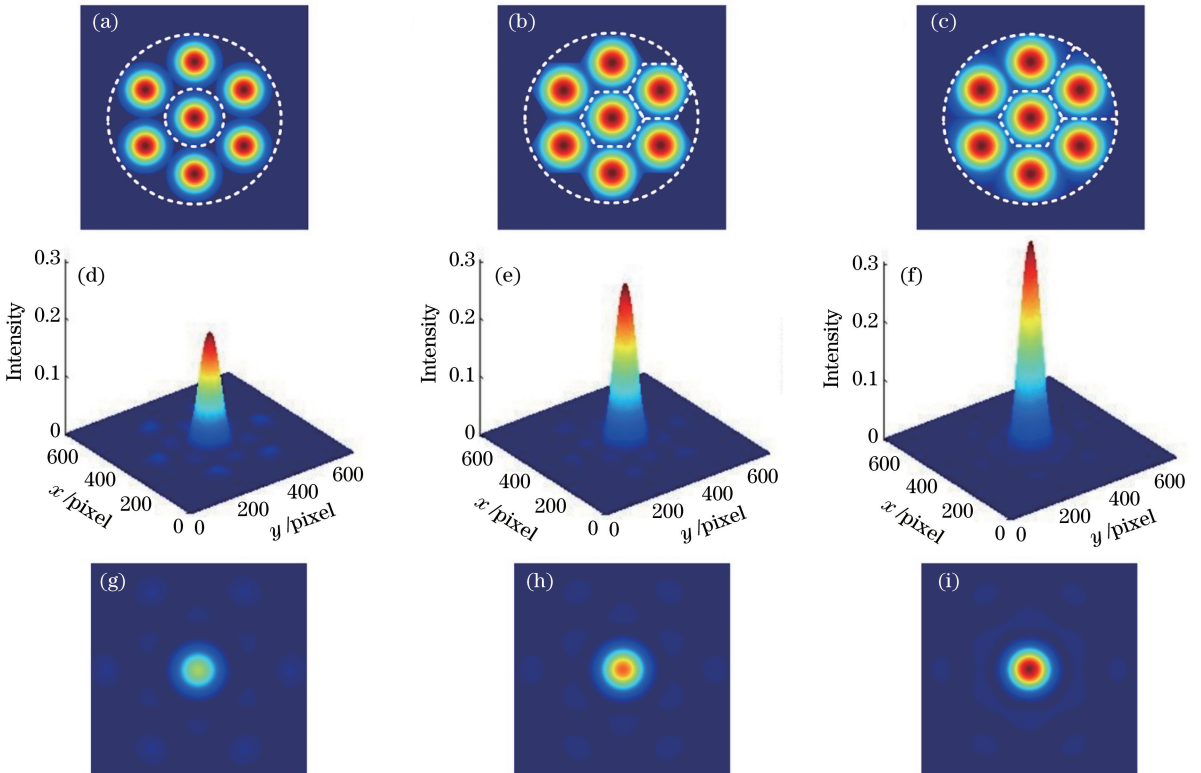


图4 基于3种子孔径拼接方案模拟的近场与远场图样。(a) 7路圆形近场图样;(b) 7路六边形近场图样;(c) 7路组合形状近场图样;(d) 7路圆形远场3D图样;(e) 7路六边形远场3D图样;(f) 7路组合形状远场3D图样;(g) 7路圆形远场2D图样;(h) 7路六边形远场2D图样;(i) 7路组合形状远场2D图样

Fig. 4 Near-field and far-field patterns simulated based on three sub-aperture splicing schemes. (a) Near-field pattern for 7 circles; (b) near-field pattern for 7 hexagons; (c) near-field pattern for 7 combination; (d) 3D far-field pattern for 7 circles; (e) 3D far-field pattern for 7 hexagons; (f) 3D far-field pattern for 7 combination; (g) 2D far-field pattern for 7 circles; (h) 2D far-field pattern for 7 hexagons; (i) 2D far-field pattern for 7 combination

在相同的阵列总口径和发射距离情况下,3种形状孔径拼接方案的最理想面积填充占比分别为78%,83%,100%,在出射子光束峰值功率归一化的情况下,相干合成远场峰值功率分别为0.191,0.274,0.351,如图5所示,其旁瓣能量占比逐渐下降,峰值功率逐渐提升,各自所能达到的最高BPF分别0.719,0.785,0.819,仿真计算结果表明,新提出的孔径拼接方案相较于传统方案可以提升相干合成光束质量。

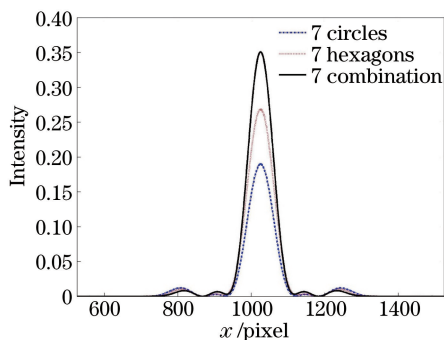


图5 远场图样中心沿 x 轴的光强曲线

Fig. 5 Light intensity distribution along x -axis of far-field pattern center

4 结 论

对光纤激光分孔径合成的高效拼接方法进行了研究,提出了2种新型单元子孔径拼接方案。计算拟合出2种子口径的透过能量占比与截断系数之间的函数关系,得到了2种新方案截断系数的最优值。在此基础上,利用基模高斯光束作为子光束,分析比较了3种子孔径方案的相干合成效果。结果表明,2种新的子孔径拼接方案相比于圆形子孔径正六边形排列填充方案能将远场桶中功率占比分别提升9.2%和13.9%,这是由于改进的拼接方案能够在同样大小的口径得到更多的有效面积输出。需要说明的是,实际组成的激光阵列由于机械装配存在缝隙,不可能达到理想的面积填充占比,总是低于理想值,但在同样的装配条件下,所提方案相较于传统方案依然能获得更优的BPF,而且这2种方案都易于向更多路数如19路、37路、61路等扩展。因此,所提方案对于实验中提升阵列光束的相干合成效率具有一定的指导意义,实验上仍待进一步探究。

参 考 文 献

[1] Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: a review[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 219-241.

[2] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(11): B63-B92.

[3] Wang X L, Zhou P, Su R T, *et al.* Current situation, tendency and challenge of coherent combination of high power fiber lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0201001.
王小林, 周朴, 粟荣涛, 等. 高功率光纤激光相干合成的现状、趋势与挑战[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0201001.

[4] Flores A, Ehrehreich T, Holten R, *et al.* Multi-kW coherent combining of fiber lasers seeded with pseudo random phase modulated light[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9728: 97281Y.

[5] Mostly Missile Defense. Chronology of MDA's plans for laser boost-phase defense(August 26, 2016)[EB/OL]. (2016-08-26) [2018-07-20]. <https://mostlymissiledefense.com/2016/08/26/chronology-of-mdas-plans-for-laser-boost-phase-defense-august-26-2016/>.

[6] Zhou P, Wang X L, Ma Y X, *et al.* Aperture filling: An important technique in coherent beam combining of fiber laser array[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(2): 021401.
周朴, 王小林, 马阎星, 等. 孔径填充: 光纤激光阵列相干合成中的关键技术[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(2): 021401.

[7] Goodno G D, Asman C P, Anderegg J, *et al.* Brightness-scaling potential of actively phase-locked solid-state laser arrays[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(3): 460-472.

[8] Tang Q J, Shi X C, Hu Q Q. Effect of the filled factor on the far field profiles of laser beam combination[J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 28(5): 566-569.
唐前进, 施翔春, 胡企铨. 填充因子对激光组束远场功率分布的影响[J]. 推进技术, 2007, 28(5): 566-569.

[9] Huang Z M, Tang X, Li X F, *et al.* Analysis of influence of filling ratio on coherent beam combination of fiber laser arrays[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2015, 44(6): 946-950.
黄智蒙, 唐选, 李晓峰, 等. 光纤激光阵列占空比对相干合成效果影响分析[J]. 电子科技大学学报, 2015, 44(6): 946-950.

- [10] Hu Q Q, Huang Z M, Luo Y Q, *et al.* Improvement of coherent combination efficiency in parallel transmission system [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2014, 29(1): 14-17.
胡奇琪, 黄智蒙, 骆永全, 等. 提高平行发射方式相干合成效率 [J]. *光电技术应用*, 2014, 29(1): 14-17.
- [11] Xiao L L, Cheng Q S, Lu Y, *et al.* Far field power distribution of coherent beam synthesized with linear fiber array [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(7): 792-796.
肖立亮, 陈青山, 吕勇, 等. 线阵光纤阵列相干合成光束的远场光功率分布 [J]. *激光与红外*, 2016, 46(7): 792-796.
- [12] Ji W. Research on effect of laser beam coherent combination [D]. Xi'an: Xidian University, 2009.
纪雯. 激光相干合成效果的研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- [13] 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.
- [14] Weyrauch T, Vorontsov M, Mangano J, *et al.* Deep turbulence effects mitigation with coherent combining of 21 laser beams over 7 km [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(4): 840-843.
- [15] Beresnev L A, Motes R A, Townes K J, *et al.* Design of a noncooled fiber collimator for compact, high-efficiency fiber laser arrays [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(3): B169-B178.
- [16] Zhou B K, Gao Y Z, Chen T R, *et al.* The principle of laser [M]. 7th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 67-68.
周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 等. 激光原理 [M]. 7版. 北京: 国防工业出版社, 2014: 67-68.
- [17] Zhou P, Wang X L, Ma Y X, *et al.* Optimal truncation of element beam in a coherent fiber laser array [J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, 26(4): 044206.
- [18] Vorontsov M A, Lachinova S L. Laser beam projection with adaptive array of fiber collimators. I. Basic considerations for analysis [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2008, 25(8): 1949-1959.
- [19] Zhou P. Study on coherent beam combination technology of fiber lasers [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009.
周朴. 光纤激光相干合成技术研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2009.
- [20] Liu Z J, Zhou P, Xu X J. Study on universal standard for evaluating high energy beam quality [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(4): 773-778.
刘泽金, 周朴, 许晓军. 高能激光光束质量通用评价标准的探讨 [J]. *中国激光*, 2009, 36(4): 773-778.