

光纤非相干合成光束在湍流大气中的传输特性

吴武明^{1,2,3} 郭少锋³ 陶汝茂³ 吴毅¹ 宁禹³

¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031
² 中国科学院大学, 北京 100049
³ 国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

摘要 建立了高功率光纤非相干合成光束在湍流大气中的传输模型。综合考虑了准直系统、对准误差、光束抖动和大气湍流的影响,分析了单模、多模光纤光束非相干合成系统的传输特性。理论计算表明,在准直系统设计为最佳值时,功率为 10 kW 的单模激光由准直系统导致的光束质量退化率约为 10%,而光束质量 M^2 因子为 13、功率为 30 kW 的多模激光,其光束质量退化率约为 1%。对于数目都为六束,总功率分别为 60 kW、180 kW 的单模、多模光纤光束组成的非相干合成系统,在倾斜误差没有校正时,单模光束阵列较多模光束的传输特性优势随湍流强度的增大而降低。在传输距离为 5~15 km 时,单模光束阵列倾斜误差完全校正时的到靶光强是无校正时的 1.32 倍左右,而多模光束阵列的到靶光强变化不明显。

关键词 光纤激光;非相干合成;大气湍流;准直系统;传输特性

中图分类号 TN012; TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.s114008

Propagation Performance of Incoherent Combined Beams of Fiber Lasers in Atmospheric Turbulence

Wu Wuming^{1,2,3} Guo Shaofeng³ Tao Rumao³ Wu Yi¹ Ning Yu³

¹ Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
³ College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract The theoretical model of high-power fiber incoherent combined beams propagating in atmospheric turbulence is established, including single mode laser and multi-mode laser. The influences of collimating system, mechanical jitter and atmospheric turbulence are considered. The results show that the beam quality's degeneration ratio of 10 kW single mode fiber laser is 10% resulting from the collimating system. And the ratio of 30 kW multi-mode fiber laser is 1%. For six incoherent combined beams without tip-tilt correction, the advantage in propagation performance of single mode beam decreases with the increase of the intensity of turbulence when the propagation distance is longer than 5 km. The maximum intensity gain due to tip-tilt correction of single mode beams is 1.32 times than without tip-tilt correction when the propagation distance is 5~15 km, while the gain of multi-mode beams is not obvious.

Key words fiber laser; incoherent combining; turbulent atmosphere; collimating system; propagation performance

OCIS codes 010.1300; 010.7060; 060.3510

1 引言

光纤非相干合成对单路光束的模式、相位、谱宽

和偏振态等没有任何要求。只需控制各光纤光束发射至目标处^[1]。与相干合成相比,具有结构简单、扩

收稿日期: 2012-11-10; 收到修改稿日期: 2013-01-07

基金项目: 中国科学院大气成分与光学重点实验室开放课题基金(2012JJ05)资助课题。

作者简介: 吴武明(1981—),男,博士研究生,主要从事激光大气传输方面的研究。E-mail: treewwm@gmail.com

导师简介: 吴毅(1960—),男,硕士,研究员,主要从事激光大气传输方面的研究。

E-mail: wuyi@aiofm.ac.cn

充性强的优点,特别是单路光束不需要特定的模式和线宽输出,容易向高功率方向发展^[2,3]。光纤激光器近几年内得到了飞速发展,单模光纤激光器(宽谱线、随机偏振)的功率已经达到 10 kW,多模光纤激光可实现大于 50 kW 的功率输出^[4,5]。而在 2010 年,美国海军海上系统司令部采用 6 台 5 kW 光纤激光器组成的非相干合成系统,于加州圣尼古拉斯岛烧毁了 4 架无人机^[6]。

非相干合成已成为当前高功率激光系统的首选方案,但其面临的子光束是选用光束质量更好的单模光纤激光还是功率更高的多模光纤激光问题,为此有必要综合考虑各因素的影响,为高功率非相干合成系统的构建提供参考。周朴等^[7,8]利用广义惠更斯-菲涅耳原理,分析了大气湍流对总功率相同而路数不同的单、多模光纤激光非相干合成系统光束质量以及传输效率的影响,但没有考虑准直系统以及光束抖动、校正倾斜误差的影响。而在实际应用情况下,高能光纤激光系统从光纤激光器输出的光束需要经过准直系统后再经过大气传输,高能激光束通过准直系统时,常常会产生光学非线性效应,造成光束质量的退化。另外各光束的光轴指向不可能严格与设计值一致,而是有一个倾斜量,这是合成高能激光系统与单一口径系统的重要区别。基于此,本文综合考虑了准直系统、光束对准误差和光束抖动的影响,分析了大气湍流导致的光斑漂移、扩展等效应。在有倾斜误差校正系统的情况下,计算了路数相同的单模、多模激光非相干合成光束在湍流大气中的传输特性。相应的分析结果可为高功率非相干合成光纤激光系统设计提供一定的参考。

2 非相干合成系统参数

光纤激光阵列按照如图 1 所示的环形结构放

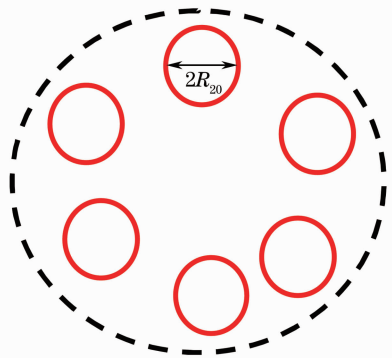


图 1 光纤激光阵列排布图

Fig. 1 Schematic diagram of the laser array

置,激光波长 $\lambda = 1.08 \mu\text{m}$,单路光束经准直系统后的光斑半径为 R_{20} ,阵列光束同时经发射系统聚焦到水平距离为 L 的远处目标处。为了比较同样数目的单、多模光纤激光的传输性能,假设光纤激光排布 2 圈(共 6 个),单路单模光纤激光功率为 10 kW,光束质量因子 $M^2 = 1$,总功率为 60 kW;而对于多模光纤激光,单路功率为 30 kW,光束质量因子 $M^2 = 13$ ^[9],总功率为 180 kW。

3 理论模型

当光斑半径为 R_{20} 的单束光纤激光聚焦传输到距离 L 处时,对于长曝光的光斑,其强度分布可以近似为一个高斯光斑,表达式为^[9]

$$\langle I(r, L) \rangle = I_0 \frac{R_{20}^2}{R^2(L)} \exp\left[\frac{-2r^2}{R^2(L)}\right], \quad (1)$$

式中 $R(L) = \Theta_{\text{spread}}(L)L$ 为聚焦长曝光光斑半径,它受短曝光光斑半径和由大气湍流导致的光斑漂移影响。 Θ_{spread} 为光束总体发散角,它由衍射所致发射角 Θ_{diff} 、光束质量所致发散角 Θ_{quality} 、大气湍流所致发散角 Θ_{turb} 、光束对准误差和抖动所致发散角 Θ_j 以及热晕所致发散角 Θ_{bloom} 共同组成,表达式为^[9]

$$\Theta_{\text{spread}} = (\Theta_{\text{diff}}^2 + \Theta_{\text{quality}}^2 + \Theta_{\text{turb}}^2 + \Theta_j^2 + \Theta_{\text{bloom}}^2)^{1/2}, \quad (2)$$

式中 $\Theta_{\text{diff}} = \lambda / (\pi R_{20})$ 。而光束质量所致发射角为

$$\Theta_{\text{quality}} = (M^2 - 1)\lambda / (\pi R_{20}). \quad (3)$$

对于总功率约 100 kW 的激光系统,由于 $1.08 \mu\text{m}$ 波长激光吸收系数较小且考虑横向风的影响,其热晕效应较小,所以这里不考虑热晕的影响^[10]。

3.1 准直系统影响

对于实际的高能光纤激光系统,从光纤激光器输出的各单路光束要经过各自的准直系统后再经大气传输。高能光纤激光通过准直系统时,其光束质量与透镜结构参数、激光功率等有关^[11]。单路光束准直系统结构如图 2 所示,采用共焦的望远镜结构,由两片凸透镜组成,其焦距分别为 f_1 和 f_2 ,其厚度分别为 L_{10} 和 L_{20} ;通过调节第二块凸透镜的曲率半径 R_{2c} ,可以改变准直后的光斑半径 R_{20} (即透镜的半径),其大小满足如下关系式^[12]:

$$R_{20} = (3/4)R_{2c} \{1 - [1 - L_{20}/(2R_{2c})]^2\}^{1/2}. \quad (4)$$

假设透镜吸收系数很小,光纤激光经准直系统中第 i 块透镜后的光束质量理论值 M_i^2 可近似为^[13]

$$M_i^2 = \left[(M_{i-1}^2)^2 + \frac{\pi^2 R_{i0}^2}{2\lambda^2} \alpha_{i3}^2 \right]^{1/2}, \quad (5)$$

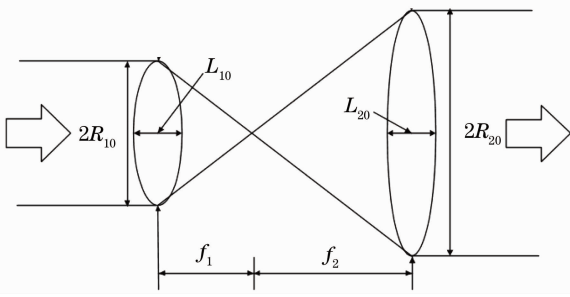


图2 准直系统结构图

Fig.2 Schematic diagram of the collimating system

式中 $\alpha_{i3} = [(n_{i0} - 1) + g_i \Delta T_i(0)] \left(\frac{R_{i0}^3}{R_{ic}^3} \right) + g_i \bar{T}_i \cdot \frac{4L_{i0}}{R_{i0}} \left(1 - \frac{2R_{i0}^2}{R_{ic}L_{i0}} \right)$, $g_i = (\partial n / \partial T)_i + (n_{i0} - 1)\alpha_{iT}$, n_{i0} 、 R_{i0} 、 R_{ic} 和 L_{i0} 分别为第 i 个透镜不存在热效应时的折射率、半径、表面曲率半径和厚度, $\bar{T}_i = \alpha_i P / (4\pi\kappa_i)$, $\Delta T_i(0) = 2\gamma(x) \bar{T}_i$; 其中 $(\partial n / \partial T)_i$ 、 κ_i 和

α_i 为第 i 个透镜的折射率温度系数、热膨胀系数和吸收系数, P 为激光功率。 $\gamma(x) \approx 0.58 + \Gamma(0, x) + \ln(x)$, $\Gamma(0, x)$ 为 0 阶不完全伽马函数。

3.2 对准误差和光束抖动的影响

各光束偏离设计值的均方值 σ_i 可定义为对准误差, 定义光束抖动角的均方值为 σ_j 。光束抖动本质上是一种快速的倾斜, 从时间统计平均的角度而言, 光束抖动 σ_j 和对准误差 σ_i 对传输特性的影响都是倾斜量。这两种误差导致的倾斜误差发散角可表示为^[13]

$$\Theta_j = 1.57\sigma_{ij} = 1.57(\sigma_j + \sigma_i). \quad (6)$$

3.3 大气湍流的影响

一般大气湍流强弱可以用 Rytov 方差 $\sigma_R^2 = 0.63(\lambda L / r_0^2)^{5/6}$ 来界定, 其中 $r_0 = 0.184[\lambda^2 / (C_n^2 L)]^{0.6}$ 为 Fried 参数(球面波的相干长度), C_n^2 为大气折射率结构常数。当 $\sigma_R^2 > 1$ 为强湍流, $\sigma_R^2 < 1$ 为弱湍流。大气湍流所致发散角 Θ_{turb} 表达式为^[14]

$$\Theta_{\text{turb}} = \begin{cases} [2.16(\lambda / \pi R_0)^2 (R_0 / r_0)^{5/3}]^{1/2}, & \text{weak turbulence} \\ [2.6(\lambda / \pi R_0)^2 (R_0 / r_0)^2]^{1/2}, & \text{strong turbulence} \end{cases} \quad (7)$$

3.4 传输特性评价

能量传输等应用领域关心远场特定面积内的桶中功率 P_{PIB} (Power In Bucket), 这里定义目标上一定半径 $R_T = 5.6 \text{ cm}$ (面积为 100 cm^2) 内的桶中功率, 考虑大气透射率影响, 其表达式为^[14]

$$P_{\text{PIB}} = \int_0^{R_T} r \langle I(r, L) \rangle dr = P_0 \exp(-\xi L) \{1 - \exp[-2R_T^2 / R^2(L)]\}, \quad (8)$$

式中 $\xi = 0.12 \text{ km}^{-1}$ 为大气消光系数^[6]。

3.5 校正倾斜误差自适应系统的影响

为了获得更高的传输特性, 高功率光纤非相干合成光束系统可以考虑使用高速倾斜镜来校正由光束控制系统的抖动和大气湍流带来的光斑倾斜误差。特别是如果各单路光束间距小于大气相干长度时, 各光束的大气湍流导致的光斑漂移具有相关性, 可以共用一套倾斜校正系统, 大大减少了校正系统的复杂性。对于聚焦光束, 不考虑湍流外尺度的影响, 光束抖动和大气湍流导致的倾斜误差可以近似表示如下^[14, 15]:

$$R_w^2(L) = \begin{cases} 0.16\lambda^2 L^2 / (R_0 r_0^5)^{1/3} + \Theta_j^2 L^2, & \text{weak turbulence} \\ 0.624\lambda^2 L^2 / (R_0 r_0^5)^{1/3} (R_0 r_0 / \lambda L)^{1/3} + \Theta_j^2 L^2, & \text{strong turbulence} \end{cases} \quad (9)$$

完全校正倾斜误差与无校正系统时目标处的轴上光强比值 β 表达式为^[14]

$$\beta = \frac{\langle I(0, L) \rangle_{\text{with-calibration}}}{\langle I(0, L) \rangle_{\text{without-calibration}}} = \frac{1}{1 - [R_w^2(L) / R^2(L)]}. \quad (10)$$

4 计算结果与分析

单路光束准直系统结构如图 2 所示, 采用共焦望远镜结构^[8], 由两片凸透镜组成, 通过调节第二块

凸透镜的曲率半径 R_{2c} , 可以改变准直后的光斑直径 R_{20} 。假设光纤激光发射端距第一个透镜距离 z 和聚焦距离 L_f 都为 25 cm, 透镜的材料都为熔融石英, 其具体参数如表 1 和 2 所示, 而折射率均取 $n_0 = 1.45$ ^[13]。

联合(4)、(5)式, 可得功率为 10 kW 单模 ($M^2 = 1$)、30 kW 多模 ($M^2 = 13$) 光纤的光束质量参数 M^2 随曲率半径 R_{2c} 变化图。可以看出, 当曲率半径约为 -0.84 m 时, 10 kW 单模光纤激光经准直系统后的

光束质量最佳,其 M^2 理论值约为 1.1,光束质量退化为 10%。而 30 kW 多模光纤光束经曲率半径约

为 -0.65 m 时,准直系统后的光束质量 M^2 值从 13 变大到 13.11,光束质量退化不到 1%。

表 1 准直系统结构参数

Table 1 Structure parameters of the collimating system

Structure parameter	Single mode beam		Multi-mode beam	
	Lens 1	Lens 2	Lens 1	Lens 2
R_0/mm	3.00	40	12.50	40
L_0/mm	2.20	7.00	3.50	7.00
R_c/mm	-10.65	Variable quantity	-76.66	Variable quantity
f/mm	9.00	500.00	75.00	500.00

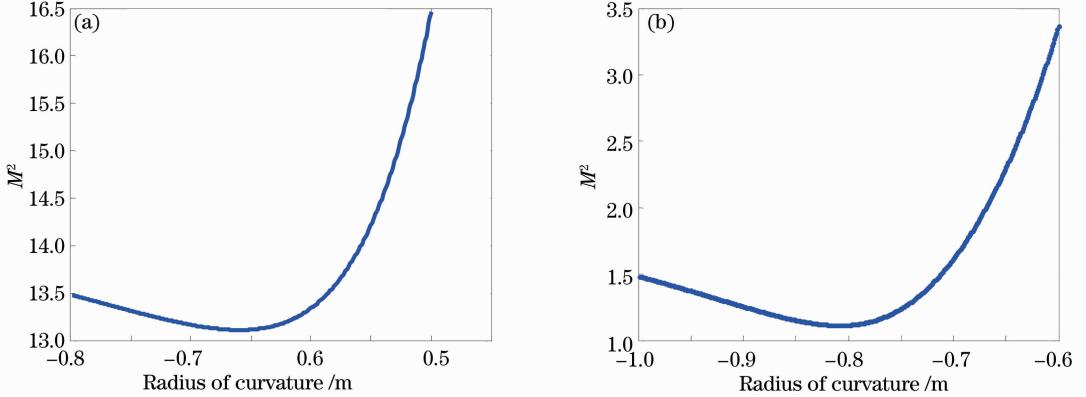


图 3 光纤激光经准直系统后的质量参数。(a)单模光束; (b)多模光束

Fig. 3 Beam quality of laser after collimating system. (a) Single mode beam; (b) multi-mode beam

表 2 透镜材料参数

Table 2 Thermal and optical parameters for UV-grade fused silica

Material	Fused Silica
α / cm^{-1}	5×10^{-5}
$\kappa / [\text{W}/(\text{cm} \cdot \text{K})]$	1.4×10^{-2}
$\partial n / \partial T / \text{K}^{-1}$	10^{-5}

假定单束光纤经准直系统后光斑半径都为 50 mm,通过合理选择准直系统的参数,使单模、多模光纤激光经准直后的光束质量 M^2 为最小值,分

别为 1.1 和 13.11。当光束抖动 σ_t 和对准误差 σ_a 分别为 $2.5 \mu\text{rad}$ 且无校正倾斜误差自适应系统时,联合(1)~(8)式,可得单模、多模光纤光束非相干合成系统在不同强度湍流大气中的水平传输特性与传输距离之间的关系,如图 4、5 所示。计算结果表明,在强湍流大气($C_n^2 = 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$)中传输时,湍流导致的光斑扩展主要决定到靶光斑大小,由于多模光束合成系统的总功率为单模光束合成系统的 3 倍,多模光束合成系统在目标处的 100 cm^2 内的桶中功率 P_{PB} 约为单模光束合成系统的 2 倍;而在弱湍流大

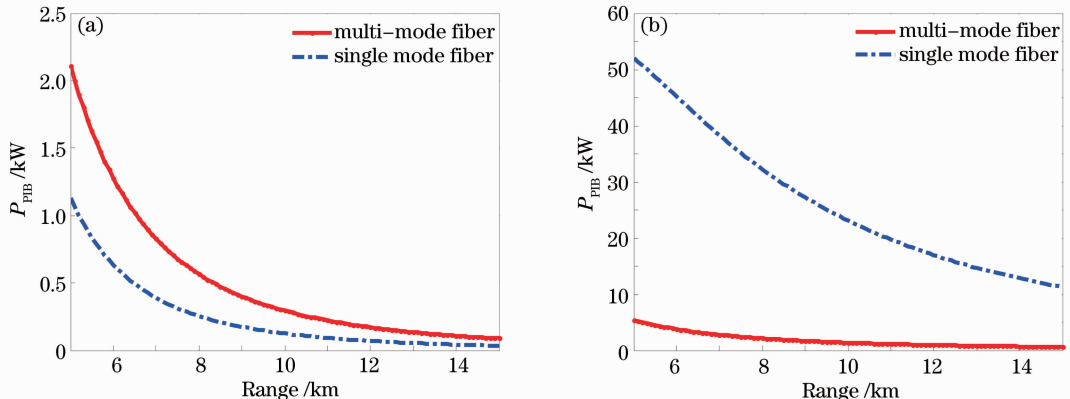
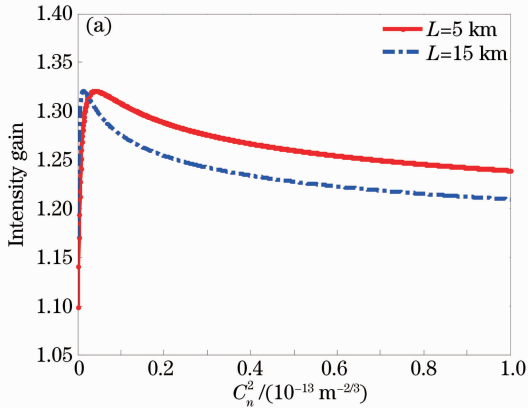


图 4 非相干合成光束的传输特性。(a) $C_n^2 = 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$; (b) $C_n^2 = 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$

Fig. 4 Propagation performances of incoherent combined beams. (a) $C_n^2 = 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$; (b) $C_n^2 = 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$

气($C_n^2 = 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$)中传输时,衍射所致光斑扩展主要决定到靶光斑大小,单模光束合成系统在目标上的光斑远远小于多模光束合成系统的光斑。所以当距离为 5 km 和 15 km 时,单模光束合成系统在目标处的 P_{PIB} 分别约为 52 kW 和 11 kW,而多模光束合成系统在目标处的 P_{PIB} 分别约为 5.4 kW 和 0.6 kW。这说明在实际应用中,应当根据湍流强弱、传输距离等条件来选择使用单模光纤光束还是多模光纤光束来进行构建非相干合成系统。

通过实时探测到靶功率强度,可以通过控制发



射端处的倾斜镜来校正由大气湍流和抖动带来的倾斜误差。利用(9)式可以计算得到单模、多模光束非相干合成系统在传输距离分别为 5 km 和 15 km 时,完全校正光斑倾斜误差后的目标处轴上光强相比无校正时的倍数在不同湍流强度的变化如图 5 所示。可以看出,对于单模激光非相干合成光束,倍数为 1.32 左右。而对于多模激光非相干合成光束,倍数不大,最大值为 1.17,这说明校正倾斜误差作用不明显,为减小系统复杂性,此时可以考虑不校正。

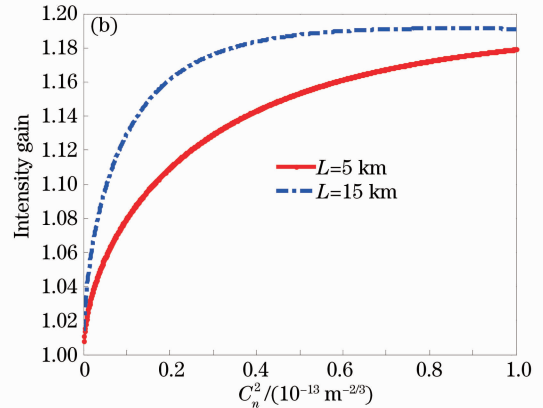


图 5 校正倾斜量后目标轴上光强的增强倍数。(a)单模光束; (b)多模光束

Fig. 5 Intensity gain due to tip-tilt correction. (a) Single mode beam; (b) multi-mode beam

5 结 论

考虑了准直系统、光束质量、大气湍流、倾斜误差的影响,对单模、多模光纤光束非相干合成在湍流大气中的传输特性进行了理论计算。结果表明,功率为 10 kW 的单模光纤光束由准直系统导致的光束质量退化率约为 10%,而功率为 30 kW、 $M^2 = 13$ 的多模光纤光束的光束质量退化率约为 1%。这说明了准直系统的设计需考虑入射光纤光束实际的功率和模式特性。对于由六路单模、多模光束组成总功率为 60 kW 和 180 kW 的非相干合成光纤系统,在强湍流大气($C_n^2 = 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$)中水平传输至 5 km 和 15 km 时,多模光束合成系统在目标处的 100 cm² 内的桶中功率 P_{PIB} 约为单模光束合成系统的 2 倍;在弱湍流大气($C_n^2 = 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$)中聚焦传输至 5 km 和 15 km 时,单模光束合成系统在目标处的 P_{PIB} 分别约为 52 kW 和 11 kW,而多模光束合成系统在目标处的 P_{PIB} 分别约为 5.4 kW 和 0.6 kW。具备校正倾斜误差能力的非相干合成系统可以一定程度上提高单模光纤阵列的传输特性,对多模光纤阵列的影响不大。所以在设计高能光纤非相干合成

系统时,为使传输特性最佳,需要综合考虑准直系统、大气湍流强弱、倾斜误差等因素,来选择不同功率和光束质量的单束光纤激光。

参 考 文 献

- 1 P. Sprangle, J. Peñano, A. Ting *et al.*. Incoherent Combining of High-Power Fiber Lasers for Long-Range Directed Energy Applications [R]. Interim Rept., 2006, ADA452452
- 2 Liu Zejin, Zhou Pu, Tao Rumao *et al.*. Analysis of beam combination technology of high-power LD pumped laser array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900113
刘泽金,周朴,陶汝茂等. 高能固态激光阵列光束合成技术浅析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900113
- 3 Liu Fei, Ji Xiaoling. Turbulence distance of partially coherent cosh-Gaussian array beams[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0713001
刘飞,季小玲. 部分相干双曲余弦高斯阵列光束的湍流距离[J]. *中国激光*, 2011, **38**(7): 0713001
- 4 J. Hecht. Fiber lasers ramp up the power[J]. *Laser Focus World*, 2009, **45**(12): 53~57
- 5 D. J. Richardson, J. Nilsson, W. A. Clarkson. High power fiber lasers; current status and future perspectives[J]. *J. Opt. Soc. Am. B: Opt. Phys.*, 2010, **27**(11): B63~B92
- 6 R. O'Rourke. Navy Shipboard Lasers for Surface, Air, and Missile Defense: Background and Issues for Congress[R]. CRS Report for Congress, 2012. ADA543734
- 7 Zhou Pu, Liu Zejin, Xu Xiaojun. Comparative of coherent combining and incoherent combining of fiber lasers[J]. *Chinese*

- J. Lasers*, 2009, **36**(2): 276~280
周 朴, 刘泽金, 许晓军. 光纤激光相干合成与非相干合成的比较[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 276~280
- 8 Zhou Pu, Ma Yanxing, Wang Xiaolin *et al.*. Propagation efficiency of various combined beams in turbulent atmosphere[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 733~738
周 朴, 马闯星, 王小林 等. 不同类型合成光束在湍流大气中的传输特性[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 733~738
- 9 Xiaoling Ji, Guangming Ji. Effect of turbulence on the beam quality of apertured partially coherent beams [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2008, **25**(6): 1246~1252
- 10 P. Sprangle, J. Penano, B. Hafizi. Optimum Wavelength and Power for Efficient Laser Propagation in Various Atmospheric Environments[R]. Interim Rept., 2005. ADA441474
- 11 J. Penano, P. Sprangle, A. Ting *et al.*. Optical quality of high-power laser beams in lenses [J]. *J. Opt. Soc. Am. B: Opt. Phys.*, 2009, **26**(3): 503~510
- 12 Tao Rumao, Si Lei, Ma Yanxing *et al.*. Optical quality of high-power fiber laser beams propagating through collimating systems [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(10): 104208
陶汝茂, 司 磊, 马闯星 等. 高能光纤激光经准直系统后的光束质量研究[J]. *物理学报*, 2011, **60**(10): 104208
- 13 Tao Rumao, Si Lei, Ma Yanxing *et al.*. Propagation of high-power partially coherent fibre laser beams in real environment [J]. *Chin. Phys. B*, 2011, **20**(9): 094208
- 14 P. Sprangle, A. Ting, J. Peñano *et al.*. Incoherent combining and atmospheric propagation of high-power fiber lasers for directed-energy applications [J]. *IEEE Quantum Electron.*, 2009, **45**(2): 138~148
- 15 Tao Rumao, Si Lei, Ma Yanxing *et al.*. Numerical simulation of target-in-the-loop adaptive optic systems based on fiber-laser array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1114002
陶汝茂, 司 磊, 马闯星 等. 光纤激光阵列目标在回路自适应光学系统的数值模拟[J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 1114002

栏目编辑: 王晓琰