

倾斜相差对大阵列光纤相干合成的影响与分析

黄智蒙^{1,3} 唐 选^{2,3} 刘仓理^{1,3} 李剑峰^{1,3} 张大勇^{1,3} 王小军^{2,3} 韩 梅¹

¹中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900

²北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094

³中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900

摘要 根据夫琅禾费衍射理论,建立了7路和37路光纤激光相干光束合成(CBC)模型,仿真模拟了不同占空比、不同倾斜角度情况下,合成光束在远场的强度分布和光束质量,分析了倾斜角度、占空比以及合成路数对CBC远场光束质量的影响。仿真结果表明:随着子光束倾斜角度的增大,远场艾里斑内的光强逐渐减小,合成效果变差;随着合成子束的增多,远场桶中功率(PIB)随倾斜角度的增大下降加快,显示了倾斜相差随合成路数增加具有一定的累积效应,要提高相干合成的效果,必须同时控制倾斜相差和活塞相差。

关键词 激光光学; 光束合成; 激光阵列

中图分类号 TN248 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.1102003

Analysis of Influence of Tip/Tilt Phase Error on a Large Scale Coherent Beam Combination of Fiber Laser

Huang Zhimeng^{1,3} Tang Xuan^{2,3} Liu Cangli^{1,3} Li Jianfeng^{1,3} Zhang Dayong^{1,3}
Wang Xiaojun^{2,3} Han Mei¹

¹*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China*

²*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China*

³*Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China*

Abstract A model of coherent beam combination (CBC) of fiber laser with 7-channel and 37-channel is established according to Fraunhofer diffraction theory. The far-field intensity distribution and beam quality of coherent beam combination with different duty ratios and tilt angles are simulated. The influences of tip/tilt phase error, duty ratio and the number of sub-beams on CBC of far field beam quality are analyzed. Simulation results show that the far field intensity in the Airy disk decreases with increasing tilt angle, which means degraded combination effect. The power in the bucket (PIB) of the far field decreases more rapidly with tilt angle increased in a large-scale combination, which means that the accumulated effect of tip/tilt phase error with the number increase of sub-beams can appear. In order to improve the efficiency of CBC, the tip/tilt phase error and piston phase error should be controlled simultaneously.

Key words laser optics; laser beam combining; laser arrays

OCIS codes 140.0140; 140.3298; 140.3290

1 引 言

高光束质量(BQ)、高功率光纤激光在材料处理、生物医学、工业加工等方面具有广泛的应用。由于热效应和非线性效应的限制,单台光纤激光器无法达到很高的输出能量或功率,并同时保持高的光束质量。而多台

收稿日期: 2015-05-29; 收到修改稿日期: 2015-06-26

基金项目: 国家自然科学基金(11504355)、中国工程物理研究院流体物理研究所发展基金(SFZ20130302)

作者简介: 黄智蒙(1982—),男,博士,助理研究员,主要从事光纤激光器与光束合成等方面的研究。

E-mail: zhimenghuang@126.com

光纤激光器阵列的相干合成技术,能够实现高功率、高光束质量激光输出,因此成为国际上研究的热点^[1-5]。

在光纤激光相干合成中,并联主振荡功率放大(MOPA)方案由于其相位控制的精确性和主动性,适用于大阵列的激光相干合成。该方案最关键的是对光路相位进行探测与控制。目前,适用于光纤阵列相干合成的主动相位控制方法主要有外差法^[6-10]、随机并行梯度下降(SPGD)算法^[11-15]、频域多抖动法(MFD)^[16-17]、时域单抖动法(SFD)^[18]和多相位扰动法(MPD)^[19-20]等。其中,SPGD方法不需要探测子光束的相移,而只需要使用1个光电探测器获得远场的强度特征如环围功率(PIB)作为目标评价函数即可,结构简单,增加合成光束路数并不会提高系统的复杂度,其典型代表为美国雷神公司的“自适应光相控阵锁定单元(APPLE)”系统,该系统利用液晶调制器阵列和SPGD算法控制光束阵列相位,实现光纤激光阵列的全电组合输出^[21]。

目前,光纤相干合成技术研究主要着眼于各子光束之间平移相差即活塞相差的控制。而在实际应用中,随着光纤激光功率的不断提高,相干合成光路中光学元件的热变形所引起的光束抖动越来越严重,光束抖动所引入的倾斜相差也越来越严重;另外,激光在大气中传输的过程中由于大气湍流等原因也会引入倾斜相差,由此看来,倾斜相差及其控制效果也是影响光束相干合成远场桶中功率和光束质量的重要因素。要想提高相干合成效果,须同时控制合成子束间的活塞相差与倾斜相差进行^[22]。

本文建立了多组束光纤激光相干合成模型,仿真模拟了光纤相干合成光束在远场的光强分布和光束质量,分析了不同占空比情况下,倾斜角度对远场光束质量的影响,明确了要想提高相干合成的效果,必须同时控制倾斜相差和活塞相差。这为大阵列光纤激光相干合成设计提供了参考依据。

2 考虑倾斜相差的光纤激光相干合成模型

激光阵列受热形变引起的光束抖动以及传输时受大气湍流扰动产生的光束间动态倾斜相差会改变合成光斑的形状分布和能量集中度。选取占空比较高、有代表性的六角排布光纤激光相干合成模型,模拟7束和37束倾斜相差对相干合成的影响。

假设光纤激光阵列各子束出射光场为高斯光束,出射孔径为圆形。同时假设出射孔径的位置与高斯光束腰斑重合。激光阵列沿Z轴传输,选取Z=0平面为出射孔径位置,各单元的出射光场可表示为

$$u_i(r_i) = A_0(r_{0i}) \exp\left(-\frac{|r_i - r_{0i}|^2}{a^2}\right) \times \exp[jk_i \cdot r_i + j\delta_i^{\text{piston}} - j\delta_i^{\text{phase-locked}} + j\sigma_i^{\text{tilt}}(r_i) - j\sigma_i^{\text{tilt-control}}(r_i)] \times \text{circ}_i(r_i), \quad (1)$$

式中 a 为腰斑半径,对所有光束都相同, A_0 为光场振幅, i 表示第 i 路激光阵列, k_i 为子光束波矢, δ_i^{piston} 为平移相差, $\sigma_i^{\text{tilt}}(r_i)$ 为子光束倾斜相差, $\delta_i^{\text{phase-locked}}$ 为平移相差校正量, $\sigma_i^{\text{tilt-control}}$ 为倾斜相差校正量, r_{0i} 为子光束中心位置坐标, $\text{circ}_i(r_i)$ 为子光束的孔径函数,

$$\text{circ}_i(r_i) = \begin{cases} 1, & |r_i - r_{0i}|^2 \leq A^2 \\ 0, & |r_i - r_{0i}|^2 > A^2 \end{cases}, \quad (2)$$

其中, A 为出射孔径半径。

N 路激光阵列在 $Z=0$ 平面的出射光场为

$$U = \sum_{i=1}^N u_i(r_i). \quad (3)$$

根据夫琅禾费衍射理论,远场 $Z=z$ 平面的光场与出射平面处光场的关系为

$$U_t(x_t, y_t) = \frac{1}{j\lambda z} \exp\left(j\frac{2\pi z}{\lambda}\right) \exp\left(j\pi \frac{x_t^2 + y_t^2}{\lambda z}\right) \times \mathcal{F}\{U(x, y)\}_{f_x = \frac{x_t}{\lambda z}, f_y = \frac{y_t}{\lambda z}}, \quad (4)$$

式中 λ 为波长, $\mathcal{F}\{\cdot\}$ 表示傅里叶变换, (x, y) 和 (x_t, y_t) 分别为出射平面和远场处的横向坐标。远场的光强分布可表示为

$$I_t(x_t, y_t) = |U_t(x_t, y_t)|^2 = \frac{1}{\lambda^2 z^2} \left| \mathcal{F}\{U(x, y)\}_{f_x = \frac{x_t}{\lambda z}, f_y = \frac{y_t}{\lambda z}} \right|^2. \quad (5)$$

选取PIB作为算法评价指标,用 P 表示(s 为桶的大小,即远场衍射极限半角对应的面积),

$$P = \iint I_r(x_r, y_r) dx_r dy_r \quad (6)$$

将各子束简化为同偏振的高斯光束。7路、37路子光束按照图 1~2 中的六角方式排列。设子光束外半径 r 与子光束发射孔径外半径 r_0 相等,子光束外沿相切,具有最大的占空比,设 $r=r_0=2\text{ cm}$,高斯光束束腰半径为 1.8 cm 。目标特征函数 J 为以远场原点为中心,环围能量与理想无相差情况下的环围能量之比,即为相对桶中功率(RPIB, R_{PIB}),取值区间为(0.0, 1.0)。

图 1(c)给出 7 束相干合成(占空比 0.778)时,在无相差(平移相差和倾斜相差),光束质量 $Q_B=1.03832$,对应衍射极限艾里斑内的能量约占总能量的 77.9%。同样,从图 2(c)得出 37 束相干合成(占空比 0.755)时,无相差下,光束质量 $Q_B=1.02027$,对应衍射极限艾里斑内的能量约占总能量的 80.7%。

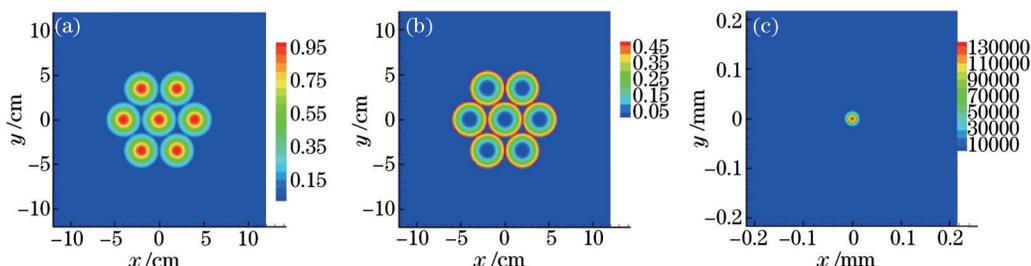


图 1 $r/r_0=1.0$ (占空比 0.778)时, 7 子束无相差排布方式。(a) 近场幅值; (b) 子束相位分布; (c) 远场幅值

Fig.1 Distribution of 7 sub-beams without phase error when $r/r_0=1.0$ (filling ratio of 0.778). (a) Near field amplitude; (b) sub-beam phase distribution; (c) far field amplitude

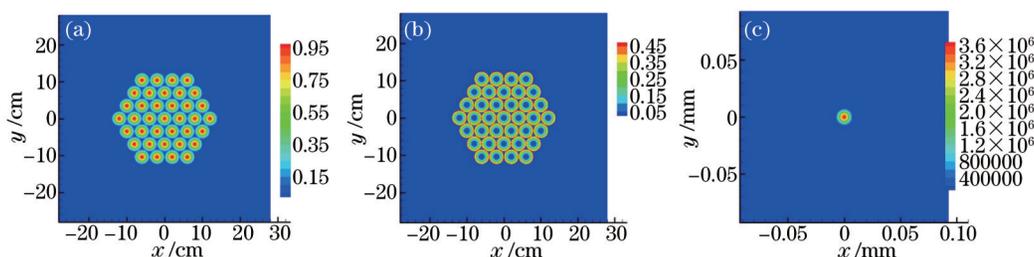


图 2 $r/r_0=1.0$ (占空比 0.755)时, 37 子束无相差排布方式。(a) 近场幅值; (b) 子束相位分布; (c) 远场幅值

Fig.2 Distribution of 37 sub-beams without phase error when $r/r_0=1.0$ (filling ratio of 0.755). (a) Near field amplitude; (b) sub-beam phase distribution; (c) far field amplitude

子束半径 r 变化时改变了子光束的空间占空比,设子光束外半径 $r=2\text{ cm}$,子光束发射孔径半径 $r_0=1.6$,高斯光束束腰半径为 1.5 cm 。这时,7路、37路子光束按照图 3~4 中的六角方式排列。从图 3(c)可以得出,7 束相干合成时(占空比 0.498),在无相差(平移相差和倾斜相差),光束质量 $Q_B=1.27966$,对应衍射极限艾里斑内的能量约占总能量的 51.3 %。

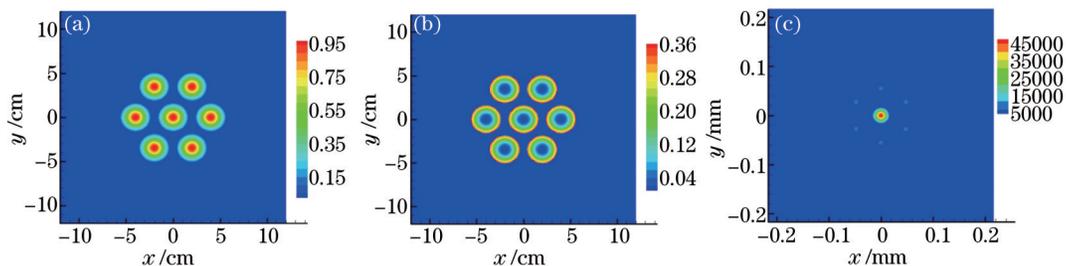


图 3 $r/r_0=1.25$ (占空比 0.498)时, 7 子束无相差排布方式。(a) 近场幅值; (b) 子束相位分布; (c) 远场幅值

Fig.3 Distribution of 7 sub-beams without phase error when $r/r_0=1.25$ (filling ratio of 0.498). (a) Near field amplitude; (b) sub-beam phase distribution; (c) far field amplitude

同样,图 4(c)给出 37 束相干合成(占空比 0.483),无相差时,光束质量 $Q_B=1.24915$,对应艾里斑内的能量约占总能量的 53.8 %。从图 1~4 可以看出,由于占空比的下降,合成光束质量随之下降,能量集中度也有明显退化,反之,阵列占空比越高,相干合成光束质量越好,能量集中度也越高。下面,分别选取图 1、图 2、图 3

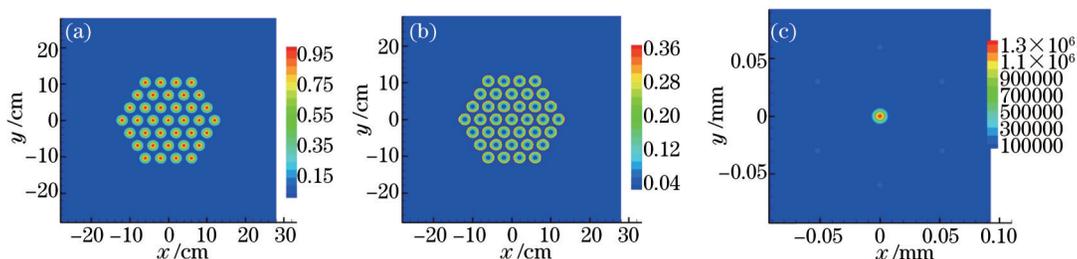


图4 $r/r_0=1.25$ (占空比0.483)时,37子束无相差排布方式。(a) 近场幅值; (b) 子束相位分布; (c) 远场幅值
Fig.4 Distribution of 37 sub-beams without phase error when $r/r_0=1.0$ (filling ratio of 0.483). (a) Near field amplitude; (b) sub-beam phase distribution; (c) far field amplitude

作为计算设置条件,模拟分析7束(2种占空比即0.778和0.498)和37束(占空比0.755)相干合成无活塞相差情况下,倾斜相差幅度对相干合成BQ和RPIB的影响。最后以图4作为计算依据,仿真分析37束(占空比0.483)光纤相干合成条件下,倾斜相差和平移活塞相差都存在(开环),只锁相以及二者同时控制(闭环)时,远场相干合成效果。

3 仿真结果与影响分析

图5~7给出了第2节中图1~3所示光纤激光模型的合成效果随倾斜相差幅值 σ 的变化规律。图5为7束光纤相干合成在占空比为0.778时的相干合成效果。图5(a)为合成远场RPIB随倾斜相差幅值的变化情况,当倾斜角度从0增大到30 μrad 时, R_{PIB} 从1下降到0.0956815。图5(b)为合成远场BQ随倾斜相差幅值的变化情况,倾斜角度从0增大到30 μrad 时, Q_B 从1.03832退化到3.35674。

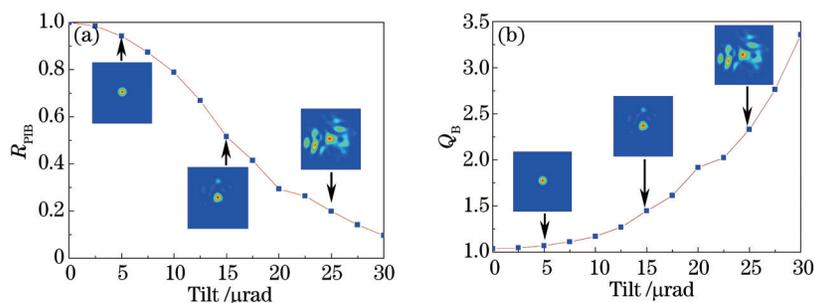


图5 7子束相干合成(占空比0.778)效果随倾斜相差幅值的变化曲线。(a) RPIB曲线; (b) BQ曲线
Fig.5 RPIB and BQ versus tilt without phase error amplitude in coherent beam combination of 7 sub-beams (filling ratio of 0.778). (a) RPIB curve; (b) BQ curve

图6所示为7束光纤相干合成在占空比为0.498时的相干合成效果。图6(a)为合成远场RPIB随倾斜相差幅值的变化情况,当倾斜角度从0增大到30 μrad 时, R_{PIB} 从1下降到0.0695489。图6(b)为合成远场BQ随倾斜相差幅值的变化情况,倾斜角度从0增大到30 μrad 时, Q_B 从1.27966退化到3.35138。

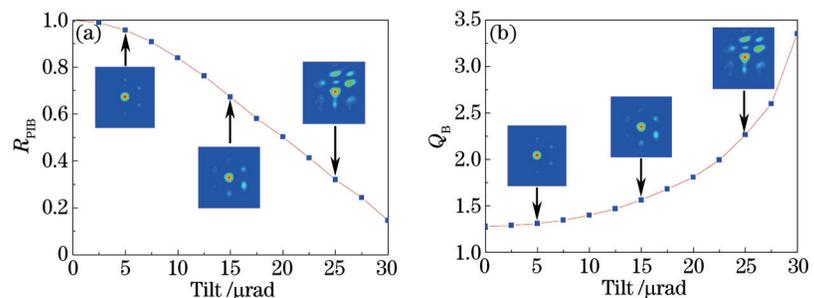


图6 7子束相干合成(占空比0.498)效果随倾斜相差幅值的变化曲线。(a) RPIB曲线; (b) BQ曲线
Fig.6 RPIB and BQ versus tilt without phase error amplitude in coherent beam combination of 7 sub-beams (filling ratio of 0.498). (a) RPIB curve; (b) BQ curve

图7所示为37束光纤相干合成在占空比为0.755时的合成效果。

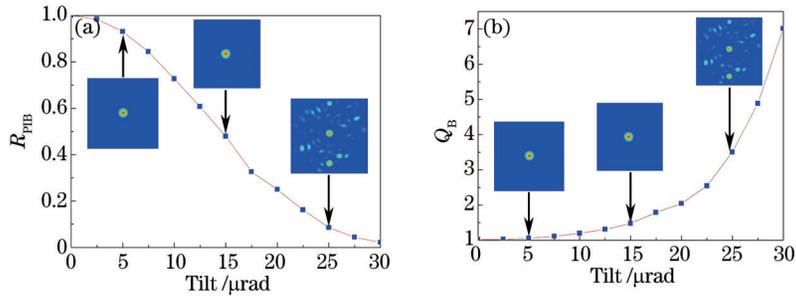


图7 37子束相干合成(占空比0.755)效果随倾斜相差幅值的变化曲线。(a) R_{PIB}曲线; (b) BQ曲线

Fig.7 R_{PIB} and BQ versus tilt without phase error amplitude in coherent beam combination of 37 sub-beams (filling ratio of 0.755).

(a) R_{PIB} curve; (b) BQ curve

图7(a)为合成远场 R_{PIB} 随倾斜相差幅值的变化情况,当倾斜角度从0增大到30 μrad时, R_{PIB} 从1下降到0.0211952。图7(b)为合成远场 BQ 随倾斜相差幅值的变化情况,倾斜角度从0增大到30 μrad时, Q_B 相应地从1.02027退化到7.008。对比图5和图7的结果可以看出,相比7束相干合成,37束相干合成在相同的倾斜相差幅度下,光束质量更差,并随着倾斜相差幅度的增大退化更快,程度也更严重。这也表明,随着合成路数的增加,倾斜相差对合成效果的影响呈现出一定的累积效应。

4 系统与算法控制

4.1 系统结构

基于孔径填充阵列的光纤激光 MOPA 结构,同时控制光束间活塞和倾斜相差的光纤相干合成系统如图8所示。种子激光(MO)经分束器分成 N 路,再经过锁相模块、光纤放大器模块后到达自适应光纤光源准直器, N 路激光准直输出。准直光经远场变换透镜合束,合成光束经分光棱镜分为2束,一束经针孔到达光电探测器(PD),另一束进行传输。SPGD 算法平台根据 PD 探测的光强电压产生锁相信号和倾斜控制信号,输出到锁相模块和自适应光纤光源准直器,实现了光束间活塞和倾斜相差的实时控制。

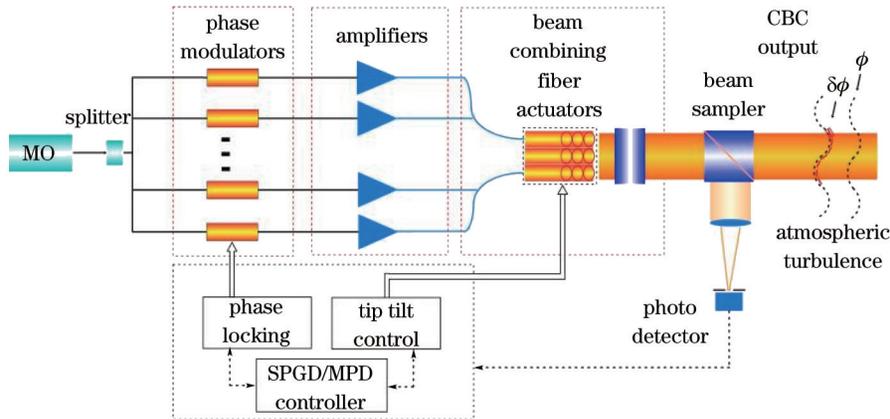


图8 基于孔径填充阵列的激光相干合成系统

Fig.8 Coherent beam combination based on a tiled array

4.2 算法控制

为此本文梳理出1种既具有大阵列相干合成的潜力,又适合于远场相干锁定的方案。其主要思想是把阵列合成光束的畸变波前 Φ 划分为若干个小的单元 $\delta\Phi$, 细小单元 $\delta\Phi$ 可以近似认为波面是均匀的,将原先对整个畸变波前的校正转化为对各子束倾斜相差即指向偏差的控制,这样就可以完成对合成光束大气扰动的补偿,从而找到1种可实现光束定标放大的技术途径。如图8所示,利用SPGD算法、相位调制器与自适应光纤光源准直器对各子束的活塞相差和倾斜相差进行同时校正,然后通过孔径填充准直阵列进行合束输出。

图9是基于该平台的37路光纤激光相干合成模拟结果。37路激光六角形排列(如图4所示),填充因子

为 0.483, 子光束外半径 $r=2$ cm, 子光束发射孔径半径 $r_0=1.6$, 高斯光束束腰半径为 1.5 cm。图 9(a) 为开环阵列相位分布, 倾斜相差为 $30 \mu\text{rad}$, 图 9(b) 为开环远场光斑, Q_B 为 11.4649, R_{PIB} 为 0.0118709, 图 9(c) 为仅锁相效果, Q_B 为 7.39079, R_{PIB} 为 0.0285657, 图 9(d) 为锁相并校正倾斜, Q_B 为 1.24915, R_{PIB} 为 1。

由仿真结果知, 在存在倾斜相差的系统中, 必须同时控制光束间的活塞相差与倾斜相差才能提高相干合成效果。

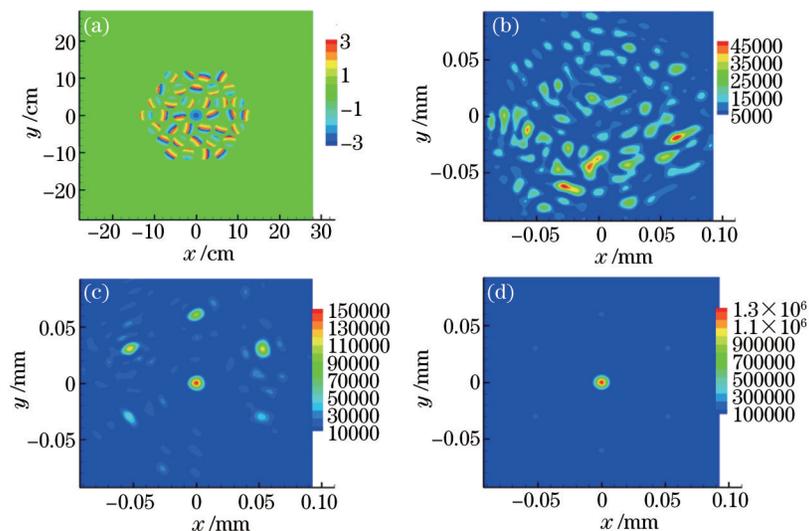


图 9 37 路光纤激光相干合成仿真结果图。(a) 开环相位分布; (b) 开环光强分布; (c) 仅锁相; (d) 锁相并校正倾斜

Fig.9 Simulation results of coherent beam combination of 37 fiber laser beams. (a) Distribution of phase in open loop; (b) distribution of light intensity in open loop; (c) only phase locking; (d) locking of phase and tip/tilt phase error

5 结 论

根据大阵列光纤激光相干合成模型, 仿真分析了占空比、倾斜相差幅度随着合成路数增加对相干合成远场能量集中度和光束质量的重要影响。动态模拟了 SPGD 算法在 MOPA 结构光纤激光相干合成系统中对倾斜相差的控制。仿真结果表明, 随着合成路数的增加, 倾斜相差对合成效果的影响呈现出一定的累积效应。因此要想提高大阵列光纤激光相干合成的效果, 必须同时控制倾斜相差和活塞平移相差。

参 考 文 献

- 1 J Nilsson, D N Payne. High-power fiber lasers[J]. Science, 2011, 332(6032): 921-922.
- 2 Cesar Jauregui, Jens Limpert, Andreas Tünnermann. High-power fibre lasers[J]. Nature Photonics, 2013, 7(11): 861-867.
- 3 Jay Marmo, Injeyan Hagop, Komine Hiroshi, *et al.*. Joint high power solid state laser program advancements at northrop grumman[C]. SPIE, 2009, 7195: 719507.
- 4 Wang Xiaolin, Tao Rumao, Zhang Hanwei, *et al.*. 1 kilowatt single-end pumped all-fiber laser oscillator with good beam quality and high stability[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1105001.
王小林, 陶汝茂, 张汉伟, 等. 1 kW 单端抽运、高光束质量、高稳定性全光纤激光振荡器[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1105001.
- 5 He Bing, Zhou Jun, Liu Houkang, *et al.*. Study on characteristics of passive coherent beam combination with all-optical feedback loop [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0601001.
何 兵, 周 军, 刘厚康, 等. 复合环形腔被动相干合成技术重要特性研究[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0601001.
- 6 S J Augst, T Y Fan, A Sanchez. Coherent beam combining and phase noise measurements of ytterbium fiber amplifiers[J]. Opt Lett, 2004, 29(5): 474-476.
- 7 Huang Zhimeng, Luo Yongquan, Zhang Dayong, *et al.*. Active phase control in laser coherent combination based on liquid crystal optical modulator[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(7): 1713-1716.
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.
- 8 Z M Huang, D Y Zhan, Y Q Luo, *et al.*. A new configuration for phase control in laser coherent combination utilizing liquid crystal optical modulator[J]. Appl Phys B, 2010, 101(3): 559-563.

- 9 Z M Huang, C L Liu, J F Li, *et al.*. Numerical analysis of coherent combination for fiber lasers and application to beam steering[J]. *Laser Physics*, 2012, 22(8): 1347–1352.
- 10 Huang Zhimeng, Luo Yongquan, Zhang Dayong, *et al.*. Transformation characteristic of phase and polarization in laser coherent combination [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(S1): 172–176.
黄智蒙, 骆永全, 张大勇, 等. 激光相干合成中的相位与偏振态变化特性[J]. *中国激光*, 2010, 37(S1): 172–176.
- 11 C X Yu, S J Augst, S M Redmond, *et al.*. Coherent combining of a 4 kW, eight-element fiber amplifier array[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(14): 2686–2688.
- 12 Z Huang, X Tang, D Zhang, *et al.*. Coherent beam combination of ten fiber arrays via stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. *J Opt Technol*, 2015, 82(1): 16–20.
- 13 Huang Zhimeng, Tang Xuan, Liu Cangli, *et al.*. Stochastic parallel gradient descent algorithm with a variable gain coefficient and its application in coherent beam combining[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(4): 0402004.
黄智蒙, 唐 选, 刘仓理, 等. 变增益随机并行梯度下降算法及其在相干合成中的应用[J]. *中国激光*, 2015, 42(4): 0402004.
- 14 Mu Jie, Jing Feng, Wang Xiao, *et al.*. Error control of piston and tilt based on SPGD in coherent beam combination[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(6): 0602002.
母 杰, 景 峰, 王 道, 等. 相干合成中基于 SPGD 算法的平移误差和倾斜误差控制[J]. *中国激光*, 2014, 41 (6): 0602002.
- 15 Zhimeng Huang, Cangli Liu, Jianfeng Li, *et al.*. A high-speed high-efficiency phase controller for coherent beam combining based on SPGD algorithm[J]. *Quantum Electronics*, 2014, 44(4): 301–305.
- 16 A Flores, T M Shay, C A Lu, *et al.*. Coherent beam combining of fiber amplifiers in a kW regime [C]. *CLEO*, 2011: CFE3.
- 17 V Jolivet, P Bourdon, B Bennai, *et al.*. Beam shaping of single-mode and multimode fiber amplifiers array for propagation through atmosphere turbulence[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2009, 15(2): 257–268.
- 18 Yanxing Ma, Pu Zhou, Xiaolin Wang, *et al.*. Coherent beam combination with single frequency dithering technique[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(9): 1308–1310.
- 19 Xuan Tang, Zhimeng Huang, Dayong Zhang, *et al.*. An active phase locking of multiple fiber channels via square wave dithering algorithm [J]. *Opt Commun*, 2014, 321: 198–204.
- 20 Zhimeng Huang, Xuan Tang, Xiaojun Wang, *et al.*. Phase locking of slab laser amplifiers via square wave dithering algorithm[J]. *Appl Opt*, 2014, 53(10): 2163–2169.
- 21 Jamie Harriman, Steve Serati, Jay Stockley, *et al.*. Comparison of transmissive and reflective spatial light[C]. *SPIE*, 2005, 5930: 59302D.
- 22 Zhang Xiaoxin, Dan Youquan, Zhang Bin. Spreading of partially coherent flat-topped beams propagating along a slant path in turbulent atmosphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1201001.
张晓欣, 但有全, 张 彬. 湍流大气中斜程传输部分相干光的光束扩展[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1201001.

栏目编辑: 史 敏