

倾斜相差对光纤激光相干合成的影响 与模拟校正*

耿超^{1)2)†} 李新阳¹⁾ 张小军¹⁾ 饶长辉¹⁾

1) (中国科学院自适应光学重点实验室, 成都 610209)

2) (中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2010年11月25日收到; 2010年12月22日收到修改稿)

选取不同路数和不同填充因子的合成光束模型, 模拟并分析了倾斜相差对相干合成的影响. 介绍了倾斜校正的关键器件——自适应光纤光源准直器. 在主振荡功率放大器结构的光纤激光相干合成系统中, 模拟了随机并行梯度下降 (SPGD) 算法校正七路激光阵列间时变倾斜相差的动态过程, 分析了不同倾斜相差幅值和频率对校正能力的影响. 实验表明, 要提高相干合成的效果, 必须校正倾斜相差; 而 SPGD 算法校正倾斜相差的能力随着倾斜相差幅值和频率的增加而降低. 文章为在实际大气环境中实现多路高功率光纤激光的相干合成提供了参考.

关键词: 光纤激光, 相干合成, 倾斜相位差, 动态分析

PACS: 42.25.Kb, 42.55.Wd, 42.90.+m

1. 引言

光纤激光的相干合成是获取高功率、高质量激光的重要途径, 在民用和国防等领域有着广阔的应用前景. 国内外研究机构报道了多种光纤激光相干合成的系统方案, 如主振荡功率放大器 (MOPA)^[1-4]、非线性自组织^[5]、外腔法^[6]等. 其中基于 MOPA 结构的主动式方案是当前的研究主流, 该结构中控制相位的方式有外差法^[1]、多抖动法^[7]和随机并行梯度下降 (SPGD) 算法^[3,4]等. 基于 SPGD 算法的系统调节简单、结构紧凑、容易实现, 更适合可扩展、可定标放大的高能激光系统, 越来越得到重视. 周朴等^[8]利用 SPGD 算法数值模拟了平移相差对光纤激光相干合成的影响.

目前的光纤激光相干合成系统主要着眼于光束间平移相差的校正. 实际上, 激光经大气传输会产生动态的倾斜相差, 从而对合成效果产生极大影响; 在光纤激光阵列的调节过程中, 各光束间也不可避免地存在倾斜残差. 所以, 要进一步提高相干合成效果, 必须对光束间的倾斜相差进行校正^[9]. 国外报道了同时补偿光束间平移和倾斜相差的相

控阵系统^[10], 其中校正倾斜相差的关键器件是自适应光纤光源准直器^[11,12] (adaptive fiber optics collimator).

本文选取不同的合成光束模型, 模拟了倾斜相差对合成效果的影响. 仿真研究了 MOPA 结构中用 SPGD 算法校正激光阵列间时变倾斜相差的过程, 分析了合成效果与倾斜相差幅值、频率的关系. 为在大气传输环境中实现多路高功率光纤激光相干合成提供了参考.

2. 倾斜相差影响分析

激光阵列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和能量分布. 选取几组有代表性的合成光束模型, 模拟倾斜相差对相干合成的影响.

2.1. 模型介绍

假设光纤激光阵列各单元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, 孔径半径与腰斑半径相同. 激光阵列沿 Z 轴传输, 选取 $Z = 0$ 平面为出射孔径位

* 国家自然科学基金 (批准号: 60978050) 资助的课题.

† E-mail: blast_4006@126.com

置,各单元的出射光场可表示为

$$\begin{aligned} & \mathbf{u}_{\text{sub}}(\mathbf{r}_{\text{sub}}) \\ &= A_0(\mathbf{r}_{0\text{sub}}) \exp\left(-\frac{|\mathbf{r}_{\text{sub}} - \mathbf{r}_{0\text{sub}}|^2}{a^2}\right) \\ & \quad \times \exp[\mathbf{j}\mathbf{k}_{\text{sub}} \cdot \mathbf{r}_{\text{sub}} + \mathbf{j}\delta_{\text{sub}}^{\text{piston}} + \mathbf{j}\sigma_{\text{sub}}^{\text{tilt}}(\mathbf{r}_{\text{sub}})] \\ & \quad \times \text{circ}_{\text{sub}}(\mathbf{r}_{\text{sub}}) \\ &= A_0(x_{0\text{sub}}, y_{0\text{sub}}) \\ & \quad \times \exp\left[-\frac{(x_{\text{sub}} - x_{0\text{sub}})^2 + (y_{\text{sub}} - y_{0\text{sub}})^2}{a^2}\right] \\ & \quad \times \exp[\mathbf{j}(k_{x\text{sub}}x_{\text{sub}} + k_{y\text{sub}}y_{\text{sub}}) + \mathbf{j}\delta_{\text{sub}}^{\text{piston}} \\ & \quad + \mathbf{j}\sigma_{\text{sub}}^{\text{tilt}}(x_{\text{sub}}, y_{\text{sub}})] \cdot \text{circ}_{\text{sub}}(x_{\text{sub}}, y_{\text{sub}}), \quad (1) \end{aligned}$$

其中 a 为腰斑半径, \mathbf{k}_{sub} 为子光束波矢, $\delta_{\text{sub}}^{\text{piston}}$ 为子光束平移相差, $\sigma_{\text{sub}}^{\text{tilt}}(\mathbf{r}_{\text{sub}})$ 为子光束倾斜相差, $\mathbf{r}_{0\text{sub}}$ 为子光束中心位置坐标, $\text{circ}_{\text{sub}}(\mathbf{r}_{\text{sub}})$ 为子光束的孔径函数,

$$\text{circ}_{\text{sub}}(\mathbf{r}_{\text{sub}}) = \begin{cases} 1 & |\mathbf{r}_{\text{sub}} - \mathbf{r}_{0\text{sub}}|^2 \leq a^2, \\ 0 & |\mathbf{r}_{\text{sub}} - \mathbf{r}_{0\text{sub}}|^2 > a^2, \end{cases} \quad (2)$$

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

$$\mathbf{U} = \sum_{\text{sub}=1}^N \mathbf{u}_{\text{sub}}(\mathbf{r}_{\text{sub}}). \quad (3)$$

根据夫琅和费衍射理论,远场 $Z=z$ 平面的光场与出射平面处光场的关系为

$$\begin{aligned} U_f(x_f, y_f) &= \frac{1}{\mathbf{j}\lambda z} \exp\left(\mathbf{j}\frac{2\pi z}{\lambda}\right) \exp\left(\mathbf{j}\pi \frac{x_f^2 + y_f^2}{\lambda z}\right) \\ & \quad \times F\{U(x, y)\}_{f_x = \frac{x_f}{\lambda z}, f_y = \frac{y_f}{\lambda z}}, \quad (4) \end{aligned}$$

其中 λ 为波长, $F\{\cdot\}$ 表示傅里叶变换, (x, y) 和 (x_f, y_f) 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

$$\begin{aligned} I_f(x_f, y_f) &= |U_f(x_f, y_f)|^2 \\ &= \frac{1}{\lambda^2 z^2} |F\{U(x, y)\}_{f_x = \frac{x_f}{\lambda z}, f_y = \frac{y_f}{\lambda z}}|^2. \quad (5) \end{aligned}$$

选取桶中功率 PIB 作为算法评价指标

$$\text{PIB} = \iint_S I_f(x_f, y_f) dx_f dy_f. \quad (6)$$

而经锁相和倾斜校正后,子光束的相位修正为

$$\begin{aligned} & \exp[\mathbf{j}\mathbf{k}_{\text{sub}} \cdot \mathbf{r}_{\text{sub}} + \mathbf{j}\delta_{\text{sub}}^{\text{piston}} - \mathbf{j}\delta_{\text{sub}}^{\text{phase-locked}} \\ & + \mathbf{j}\sigma_{\text{sub}}^{\text{tilt}}(\mathbf{r}_{\text{sub}}) - \mathbf{j}\sigma_{\text{sub}}^{\text{tilt-control}}(\mathbf{r}_{\text{sub}})], \quad (7) \end{aligned}$$

其中 $\delta_{\text{sub}}^{\text{phase-locked}}$ 为平移相差校正量, $\sigma_{\text{sub}}^{\text{tilt-control}}(\mathbf{r}_{\text{sub}})$ 为倾斜相差校正量.

2.2. 模型选取

子光束口径、激光路数和填充因子是研究相干合成时必须考虑的因素. 近场激光阵列的填充因子定义为子光束口径与相邻光束中心距的比,其在 0 到 1 间取值. 填充因子越大,合成光斑能量向艾里斑主瓣集中,合成效果越好;反之,效果越差.

为了使模型更具普遍性,选取两路,三路和七

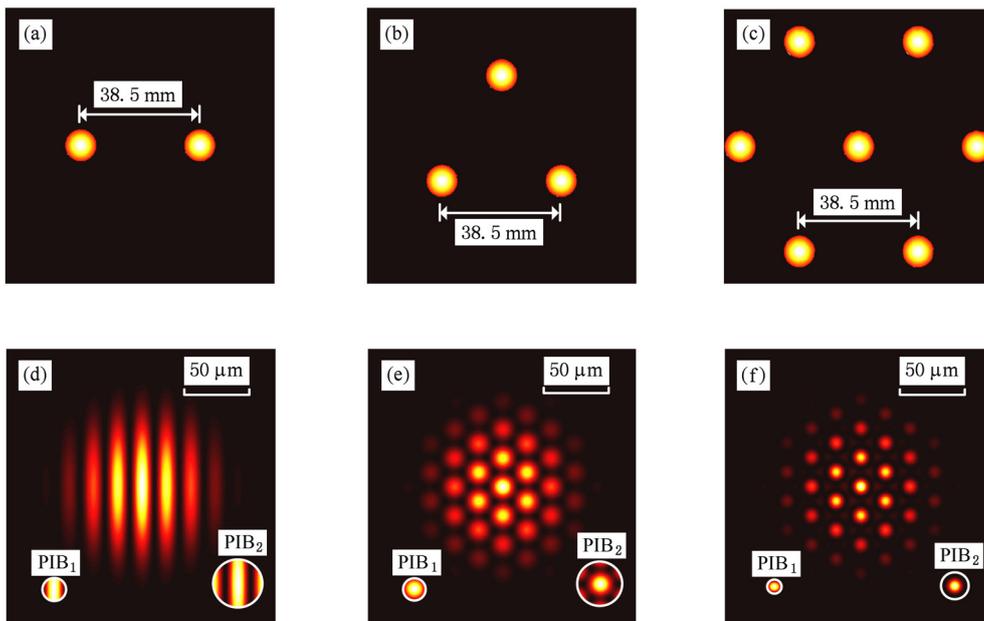


图 1 填充因子 0.26 的激光阵列近场排布和理想远场光斑图 (a) 两路激光,近场; (b) 三路,近场; (c) 七路,近场; (d) 两路激光,远场; (e) 三路,远场; (f) 七路,远场

路激光束,分别按线性排列、三角排列和六角排列参与相干合成,子光束的腰斑半径为 5 mm. 为了在有限距离观察到夫琅和费衍射,用远场变换透镜将光束聚焦,透镜焦距为 1 m. 图 1 是填充因子为 0.26 的激光束近场排布和远场合成光斑图. 图 1(a), (b), (c) 为两路,三路和七路激光阵列的近场分布,相邻光束中心距 38.5 mm. 图 1(d), (e), (f) 是理想情况下两路,三路和七路激光的远场合成光斑,其

中 PIB_1 为艾里斑半宽圆域内的图样, PIB_2 为艾里斑图样,艾里斑直径分别为 $31.8 \mu\text{m}$, $28.3 \mu\text{m}$ 和 $17.7 \mu\text{m}$.

图 2 对应填充因子为 1 的情形. 图 2(a), (b), (c) 为两路,三路和七路激光的近场排布,相邻光束中心距 10 mm. 图 2(d), (e), (f) 为理想情况下两路,三路和七路激光的远场合成光斑,艾里斑直径分别为 $77.2 \mu\text{m}$, $71.2 \mu\text{m}$ 和 $51.5 \mu\text{m}$.

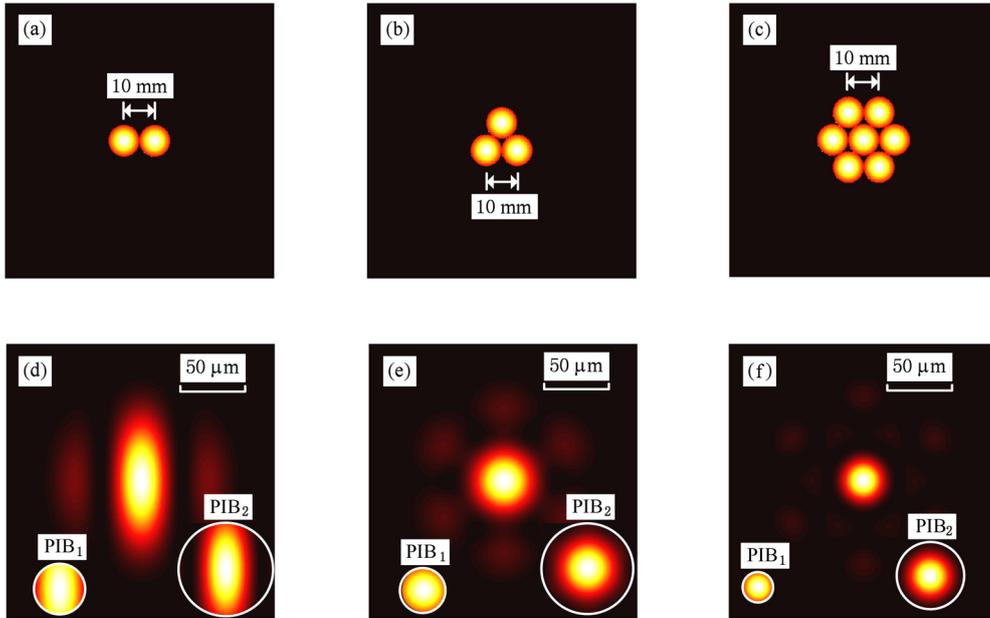


图 2 填充因子为 1 的激光阵列近场排布和理想远场光斑图 (a) 两路激光,近场; (b) 三路,近场; (c) 七路,近场; (d) 两路激光,远场; (e) 三路,远场; (f) 七路,远场

2.3. 影响分析

图 3 给出了 2.2 节中激光模型的合成效果随倾斜相差幅值 σ 的变化规律,左边图的填充因子为 0.26,右边图的填充因子为 1, PIB_1 为艾里斑半宽圆域内的能量, PIB_2 为艾里斑内的能量,小插图为相应 σ 下的远场光斑图. 图 3(a), (b) 为两路激光的情形,倾斜相差为 $t_x = \sigma \times \{-1, 1\} \mu\text{rad}$, $t_y = \sigma \times \{1, -1\} \mu\text{rad}$; 图 3(c), (d) 为三路激光,倾斜相差为 $t_x = \sigma \times \{-1, 1, 1\} \mu\text{rad}$, $t_y = \sigma \times \{1, -1, 1\} \mu\text{rad}$; 图 3(e), (f) 对应七路激光,倾斜相差为 $t_x = \sigma \times \{-1, 1, -1, 1, 0, 0, 0\} \mu\text{rad}$, $t_y = \sigma \times \{1, 1, -1, -1, -1, 1, 0\} \mu\text{rad}$. 带“o”和“x”的实线分别为 PIB_1 和 PIB_2 的变化曲线;粗实线和点状线分别表示 PIB_1 与总能量比值、 PIB_2 与总能量比值的变化曲线.

由图 3 可知,随着 σ 变大,相干合成的效果越差. σ 较小时, PIB_1 和 PIB_2 曲线几乎重合,随着 σ 增大, PIB_1 比 PIB_2 下降更快,因此, PIB_1 对 σ 的变化更敏感. 仿真中发现,对于两路,三路和七路激光,当 σ 大于 $15 \mu\text{rad}$ 时, PIB_2 下降到 0.8 以下,此时,为了提高合成效果,必须校正倾斜相差. 仿真同时表明,对于相同激光路数的近场排布,填充因子越大合成效果越好(艾里斑内的能量在总能量中比重越大),因此,填充因子为 1 的结构其实用性远强于填充因子为 0.26 的情形.

图 4 研究了不同填充因子的激光阵列中,倾斜相差对相干合成的影响. 图 4(a), (b), (c) 分别为两路,三路和七路激光. 由图可知,随填充因子增大,艾里斑内能量在总能量中的比例越高,能量集中度越好;而在不同填充因子的结构中,相干合成效果都随倾斜相差的增大而下降.

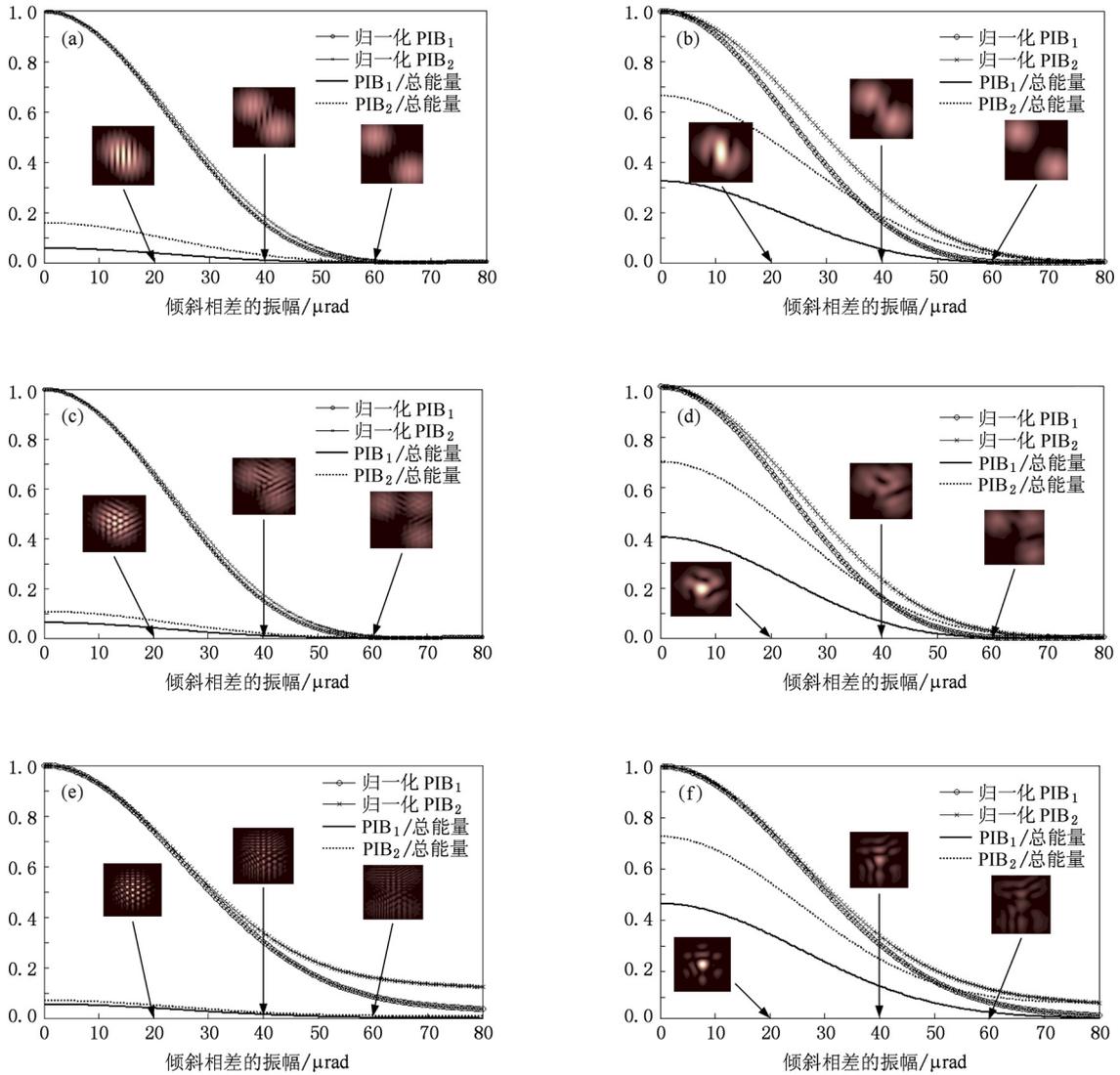


图3 相干合成效果随倾斜相差幅值的变化曲线 (a) 两路激光, 填充因子0.26; (b) 两路激光, 填充因子1; (c) 三路激光, 填充因子0.26; (d) 三路激光, 填充因子1; (e) 七路激光, 填充因子0.26; (f) 七路激光, 填充因子1

3. 系统与算法控制

3.1. 倾斜校正的关键器件——自适应光纤光源准直器

美国陆军研究实验室的Beresnev等于2005年研制了光束倾斜角可控的光纤光源准直器, 并将其应用于相控阵系统. 该器件直接驱动光纤尖端, 运动惯性小, 机械谐振频率高, 结构紧凑, 有利于阵列化集成. 自适应光纤光源准直器由基座、两对双压电驱动器、柔性十字梁及准直透镜组成, 结构如图5所示. 光纤端面固定于十字梁的中心, 由在 x, y 方向布

置的两对双压电驱动器驱动, 在焦平面内平移. 出射光束经透镜准直后产生方向上的变化. 准直透镜的焦距为 f , 光纤端面在焦平面内沿 x 轴偏移 Δx , 则出射激光相对于光轴偏转角度 $\varphi = \arctan(\Delta x/f)$, 由于偏转角度很小, 近似为 $\varphi \approx \Delta x/f$. 准直透镜的焦距确定后, 偏转角 φ 的大小取决于光纤端面的偏移量.

3.2. 系统结构

基于 MOPA 结构, 同时校正光束间平移和倾斜相差的光纤激光相干合成系统如图6所示. 种子激光经分束器分成 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

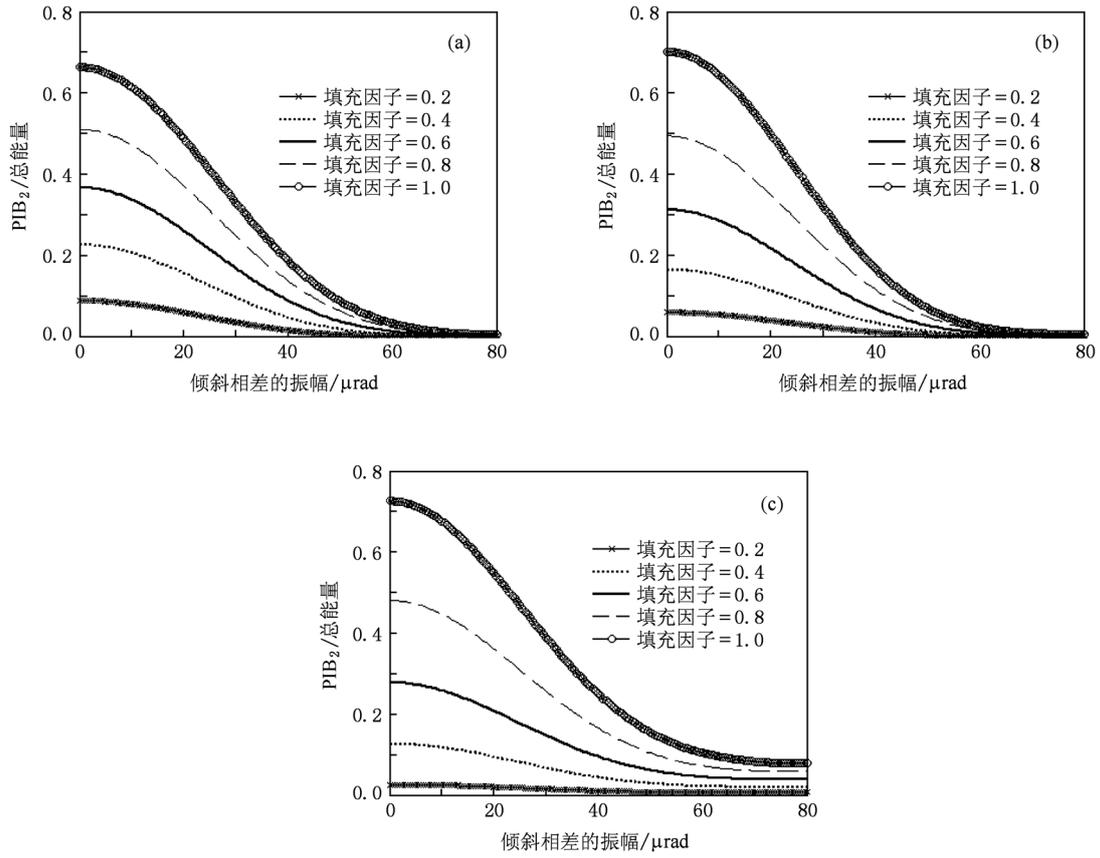


图4 不同填充因子的激光阵列中, 倾斜相差对相干合成的影响 (a) 两路激光; (b) 三路激光; (c) 七路激光

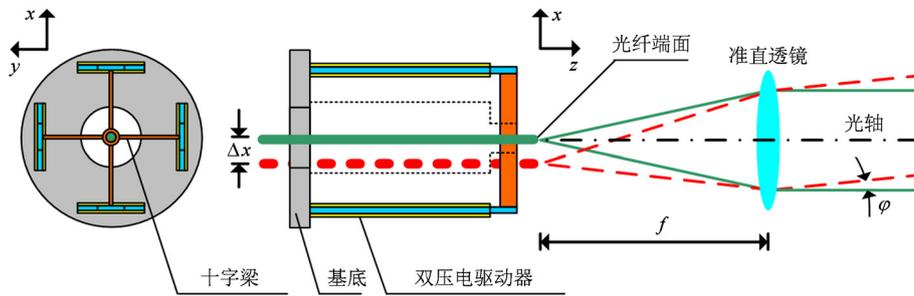


图5 自适应光纤光源准直器原理图

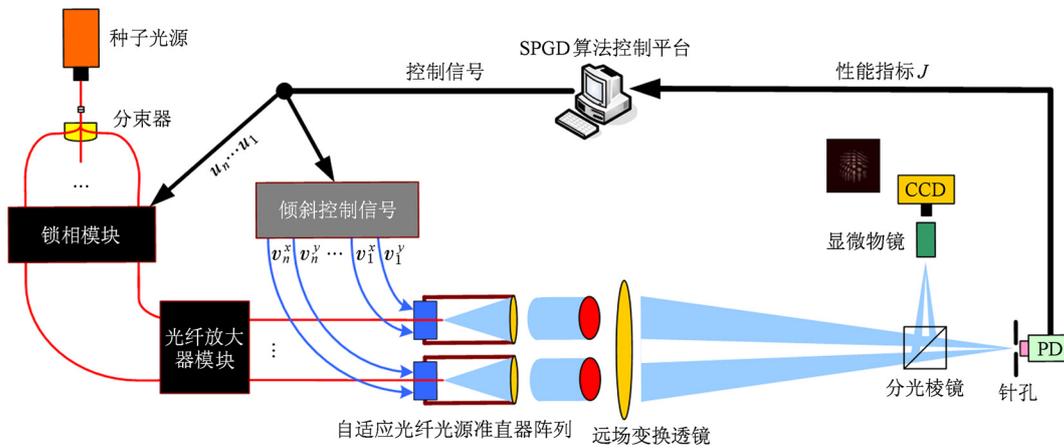


图6 MOPA 结构光纤激光相干合成系统图

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两束, 一束经针孔到达光电探测器 (PD), 另一束到达 CCD 用于观察. 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, 实现了光束间平移和倾斜相差的实时校正.

图 7 是基于该平台的三路光纤激光相干合成实验结果. 三路激光品字型排列, 填充因子为 0.26, 子光束口径 10 mm. 图 7(a) 为开环, 图 7(b) 为仅锁相, 图 7(c) 为锁相并校正倾斜, 图 7(d) 为理想情况. 由实验结果知, 在存在倾斜相差的系统中, 必须先校正光束间的倾斜相差才能提高相干合成效果.

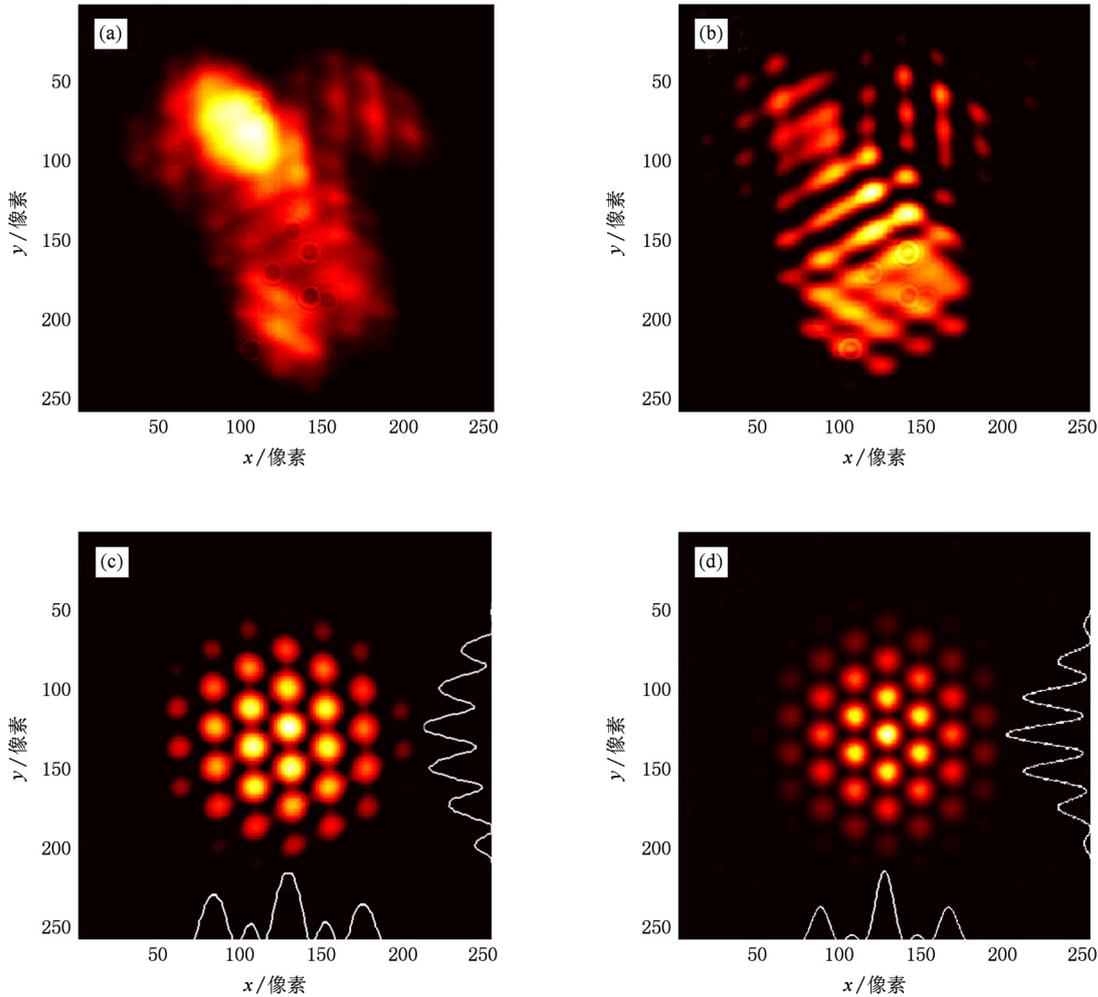


图 7 三路光纤激光相干合成实验结果图 (a) 开环; (b) 仅锁相; (c) 锁相并校正倾斜; (d) 理想情况

3.3. SPGD 控制

系统采用 SPGD 算法优化性能指标. 受限于校正器件性能, 锁相模块与倾斜校正模块的执行速率一般不同, 但是, 两过程可采用相同的性能指标. 将通过针孔到达 PD 的光强作为性能指标, $J = J(u_1, \dots, u_n; v_1^x, v_1^y, \dots, v_n^x, v_n^y)$, 其中 u_1, \dots, u_n 作用于锁相模块, $v_1^x, v_1^y, \dots, v_n^x, v_n^y$ 作用于自适应光纤光源准直器. 锁相的迭代过程为: 1) 将 $U = \{u_1, \dots, u_n\}$ 作用于锁相模块, 得到 J ; 2) 模拟生成一组伯努利分布的

随机电压扰动 $\Delta U = \{\Delta u_1, \dots, \Delta u_n\}$; 3) 将 $U_+ = U + \Delta U$ 作用于锁相模块, 得到 J_+ ; 再用 $U_- = U - \Delta U$ 得到 J_- ; 4) 将锁相信号更新为 $U = U + \gamma_p \Delta U (J_+ - J_-)$. 倾斜校正的迭代过程为: 1) 将 $V = \{v_1^x, v_1^y, \dots, v_n^x, v_n^y\}$ 作用于自适应光纤准直器, 得到 J ; 2) 模拟生成一组随机电压扰动 $\Delta V = \{\Delta v_1^x, \Delta v_1^y, \dots, \Delta v_n^x, \Delta v_n^y\}$; 3) 将 $V_+ = V + \Delta V$ 作用于自适应光纤准直器, 得到 J_+ , 再用 $V_- = V - \Delta V$ 得到 J_- ; 4) 将倾斜校正信号更新为 $V = V + \gamma_t \Delta V (J_+ - J_-)$. 其中 $\gamma_p = \{\gamma_p, \dots, \gamma_p\}$, $\gamma_t = \{\gamma_t, \gamma_t, \dots, \gamma_t, \gamma_t\}$ 为算法增益.

4. 控制特性仿真研究

受限于器件的结构与空间排布,目前相干合成系统的填充因子不高. 填充因子为 0.5 的七路激光阵列(六角排列)是目前相干合成中较常见的结构. 这里选取该模型来研究系统对倾斜相差的控制特性.

4.1. 静态平移、倾斜相差模拟校正

图 8 为算法校正静态平移和倾斜相差的迭代曲线,每条曲线为运行程序 10 次后的平均. 设置锁相速率为 100 kHz^[10],受限于器件的性能^[12],倾斜校正的速率一般远低于锁相速率,令倾斜校正速率分别为 100 kHz,10 kHz 和 1 kHz,选取远场艾里斑半宽圆域内的能量为性能指标. 七路激光阵列的初始平移相差为 $\{0.8316, -2.5287, -1.3917, 0.2946, 2.8746, 2.921, -2.1513\}$ rad, 初始倾斜相差为 $\{-21.49, 20.95; -4.69, 26.04; 24.94, 10.72; 17.53, 15.46; 27.57, 14.59; 9.34, -6.47; -27.86, 9.33\}$ μrad . 由图发现,倾斜校正速率与锁相速率相同时,七路激光经 0.65 ms 即可将性能指标提升至 0.8,曲线很平滑;而倾斜校正速率为锁相速率的 1/10 和 1/100 时,迭代曲线为阶梯状,算法的收敛时间受限于倾斜校正的低速率,锁相过程相对于倾斜校正过程可忽略,这种现象随倾斜校正速率越低越明显.

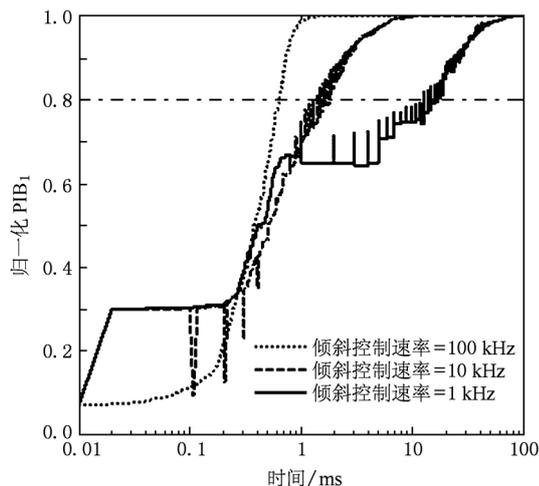


图 8 100 ms 内,算法校正静态平移和倾斜相差的迭代曲线

4.2. 动态倾斜相差模拟校正

激光在大气中传输受湍流扰动的影响,会产生

动态的倾斜相差. 4.1 节指出,当倾斜校正的速率远低于锁相速率时,校正倾斜相差的过程中可忽略锁相的影响. 下文都假设平移相差已校正. 图 9 定性给出了 5 s 内算法校正七路激光阵列中动态倾斜相差的收敛曲线. 其中,倾斜相差最大幅值为 δ , 倾斜相差在 $\pm \delta$ 间随机取值. 不失一般性,倾斜相差频率设为 33 Hz,算法校正倾斜相差的速率为 1 kHz^[12]. 选择远场艾里斑半宽圆域内的能量为性能指标. 图 9(a), (b), (c) 中, δ 分别为 20, 40 和 70 μrad , 性能指标平均值分别为 0.9417, 0.7699 和 0.3444. 由图可知, δ 较小时,算法校正效果好,随着 δ 增大,曲线的收敛性越来越差.

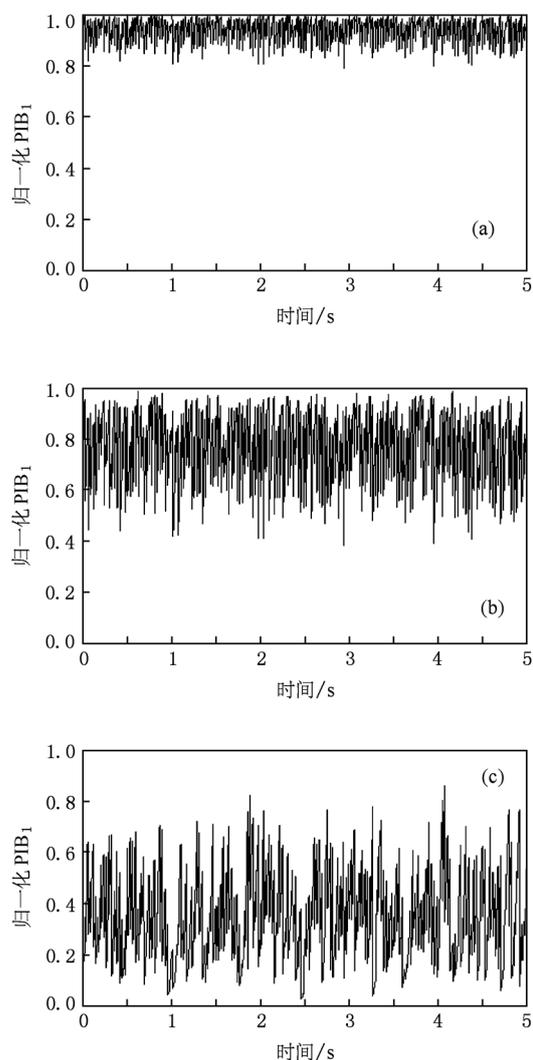


图 9 5 s 内,算法校正激光阵列间动态倾斜相差的收敛曲线 (a) $\delta = 20 \mu\text{rad}$; (b) $\delta = 40 \mu\text{rad}$; (c) $\delta = 60 \mu\text{rad}$

图 10 研究了不同的倾斜相差最大幅值 δ 和频率 f 下,SPGD 算法校正倾斜相差的能力. 假设算法

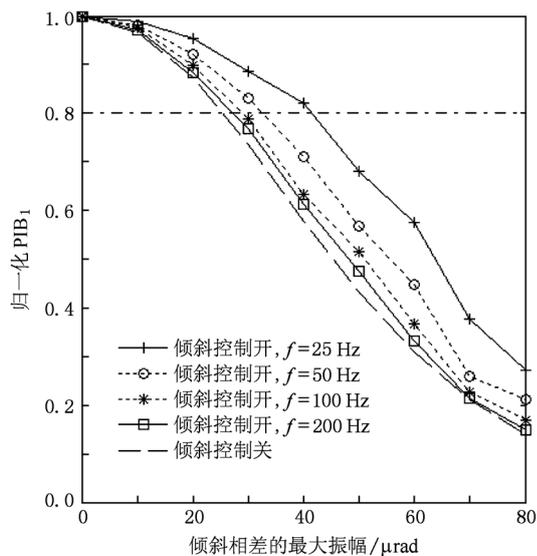


图 10 相干合成效果与倾斜相差最大幅值、频率的关系曲线

校正倾斜的速率为 $1 \text{ kHz}^{[12]}$, δ 分别为 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 和 $80 \mu\text{rad}$, f 分别为 25, 50, 100 和 200 Hz, 倾斜相差在 $\pm\delta$ 间随机取值. 算法性能指标为远

场艾里斑半宽圆域内的能量. 图 10 中每个点均为运行程序 5 s 后所取的性能指标平均值, 图中虚线对应开环的情形. 仿真结果表明, 系统经校正倾斜后的性能指标较未校正时都有改善, 本仿真实验中对频率 200 Hz 的倾斜相差都具备校正能力; 而随着 δ 和 f 的增加, 算法校正倾斜的效果都随之下降.

5. 结 论

本文利用不同的合成光束模型, 分析了倾斜相差对相干合成的重要影响, 而给出的三路光纤激光相干合成实验结果也验证了倾斜校正的必要性. 动态模拟了 MOPA 结构光纤激光相干合成系统中时变倾斜相差的校正过程, 分析了 SPGD 算法控制效果与倾斜相差幅值和频率的关系. 仿真实验表明, 校正倾斜相差后的合成效果较未校正时都有改善, 而 SPGD 算法的校正能力随着倾斜相差幅值和频率的增加而降低.

[1] Xiao R, Hou J, Jiang Z F 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 853 (in Chinese) [肖 瑞、侯 静、姜宗福 2008 物理学报 **57** 853]
 [2] Yang R F, Yang P, Shen F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8297 (in Chinese) [杨若夫、杨 平、沈 锋 2009 物理学报 **58** 8297]
 [3] Zhou P, Liu Z, Wang X, Ma Y, Ma H, Xu X 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 231106
 [4] Wang X L, Zhou P, Ma Y X, Ma H T, Xu X J, Liu Z J, Zhao Y J 2010 *Chin. Phys. B* **19** 094202
 [5] Bruesselbach H, Jones D, Mangir M, Minden M, Rogers J 2005 *Opt. Lett.* **30** 1339
 [6] Wang J M, Duan K L, Wang Y S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5627 (in Chinese) [王建明、段开棕、王屹山 2008 物理学报 **57**

5627]
 [7] Shay T, Benham V, Baker J 2006 *Opt. Express* **14** 12022
 [8] Zhou P, Ma Y X, Wang X L, Ma H T, Xu X J, Liu Z J 2009 *Chin. J. Lasers* **36** 2972 (in Chinese) [周 朴、马阎星、王小林、马浩统、许晓军、刘泽金 2009 中国激光 **36** 2972]
 [9] Vorontsov M 2005 *Proc. SPIE* **5895** 589501
 [10] Liu L, Vorontsov M, Polnau E, Weyrauch T, Beresnev L 2007 *Proc. SPIE* **6708** 67080K
 [11] Beresnev L, Vorontsov M 2005 *Proc. SPIE* **5895** 58950R
 [12] Geng C, Zhang X J, Li X Y, Rao C H *Infrared and Laser Engineering* (in Chinese) [耿 超、张小军、李新阳、饶长辉 红外与激光工程](in press)

Influence and simulated correction of tip/tilt phase error on fiber laser coherent beam combination *

Geng Chao^{1)2)†} Li Xin-Yang¹⁾ Zhang Xiao-Jun¹⁾ Rao Chang-Hui¹⁾

1) (*The Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)

2) (*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 25 November 2010; revised manuscript received 22 December 2010)

Abstract

Near-field models of coherent beam combination (CBC) with different beam channels and fill factors are employed, and the influences of tip/tilt phase errors on CBC are studied. The key device for tilt-error correction, named adaptive fiber optics collimator (AFOC), is introduced. A MOPA-configuration fiber laser CBC system compensating both piston and tip/tilt phase errors is designed. Then, the dynamic courses of tilt-error correction using stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm in a seven-channel system are simulated, and the effects of CBC at different tilt-error amplitudes and frequencies are investigated. Experimental results show that the tilt-error should be corrected to improve CBC effects, and algorithm's control ability drops off when tilt-error amplitude and frequency increase. The results in this paper present a reference for multi-channel high power fiber laser CBC systems in real atmospheric environments.

Keywords: fiber laser, coherent beam combination, tip/tilt phase error, dynamic analysis

PACS: 42.25.Kb, 42.55.Wd, 42.90.+m

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60978050).

† E-mail: blast_4006@126.com