

基于目标在回路的三路光纤传输激光相干合成实验*

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)

(2011年3月3日收到; 2011年4月22日收到修改稿)

实验验证了一种利用目标回光在远场实现相干合成的技术——目标在回路技术. 建立了目标在回路相干合成的物理模型, 利用可同时调整光程和光束倾斜的自适应光纤光源准直器, 同时补偿合成光束间的平移和倾斜相差, 实现了基于目标在回路的三路光纤传输激光间相干合成, 获得了接近理想情况的合成效果, 文章为在实际大气环境中实现多路相干组束的长距离传输提供了参考.

关键词: 光纤阵列, 相干合成, 目标在回路, 自适应光纤光源准直器

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

1 引言

受限于非线性效应、热损伤等物理机制, 在提高单根光纤功率的同时保持光束质量十分困难. 光纤激光的相干合成是同时获取高光功率和高光束质量的有效手段, 已成为激光技术领域的研究热点. 基于主振荡功率放大器结构的主动式合成方案是光纤激光相干合成的主流模式之一^[1-6]. 国内的研究团队已实现了 kW 量级的光纤激光相干合成, 为文献报道的光纤激光相干合成最高功率^[6]. 而考虑到相干组束长距离传输时会受到大气湍流的影响, 还有必要补偿光束间的倾斜相差, 美国陆军研究实验室的 Vorontsov 等研制了出射光束倾斜角可控的自适应光纤光源准直器 (Adaptive Fiber Optics Collimator, AFOC), 并首次实现了相干合成中平移与倾斜相差的同时补偿^[7]. 中国科学院自适应光学重点实验室研制了一种可同时调整光程和光束倾斜的自适应光纤光源准直器, 利用远场处的光电探测器, 实现了三路光纤传输激光相干合成中平移和倾斜相差的同时校正^[8,9].

光纤激光的相干合成目前多停留在实验室阶

段, 激光的传输距离很短 (一般为几米), 且需要在远场放置探测器^[1-6]. 很多实验应用中需要实现激光长距离传输后在目标上相干合成, 无法利用目标端的探测器. 目标在回路技术^[10-16] (Target-in-the-loop, TIL) 是一种有效的解决途径. 该技术中, 光信号探测器位于发射装置附近, 通过接收远场目标的回光信号, 以成像清晰度、接收光能量等作为性能指标, 利用优化算法控制波前校正器, 获得接近理想的光束控制效果. TIL 技术尤其适合激光相控阵中的相位控制, 有望在激光定向能系统、激光遥感、自由空间光通信等领域得到应用.

目前, 将 TIL 技术应用于光纤激光相干合成的报道不多, 有一些理论研究也是针对单孔径光束的传输问题^[12-14]. 2008 年, 法国宇航实验室的 Bourdon 等用多抖动法首次实现了基于目标回光的三路光纤激光相干合成^[15], 但该实验没有校正光束间的倾斜相差. 其后, 美国空军研究实验室的 Shay 和美国陆军研究实验室的 Vorontsov 等在 2010 年的圣彼得堡激光光学会议上分别报道了各自关于 TIL 技术的研究成果. 本文介绍中国科学院自适应光学重点实验室关于目标在回路技术的实验进展, 建立

* 国家自然科学基金 (批准号: 60978050) 资助的课题.

† E-mail: blast.4006@126.com

了 TIL 物理模型, 利用可同时调整光程和光束倾斜的自适应光纤光源准直器, 首次实现了基于目标在回路的三路光纤传输激光相干合成中平移和倾斜相差的同时补偿, 为在大气环境中实现多路相干组束的长距离传输提供了参考.

2 基于目标在回路的相干合成原理

目标在回路相干合成的模型如图 1 所示. 其物理过程可用 4 个步骤描述: (1) 发射光束阵列 (光场为 U_0) 经大气传输到达目标端 (光场为 U_1); (2) 目标端的远场光斑背向散射 (光场为 U_2); (3) 散射光

经大气传输到达成像端透镜的前表面 (光场为 U_3); (4) 成像于探测端 (光场为 U_4). 其中, 成像端位于发射端附近, 探测器置于成像端的后焦面.

在发射端, 每路光可表述为:

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

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

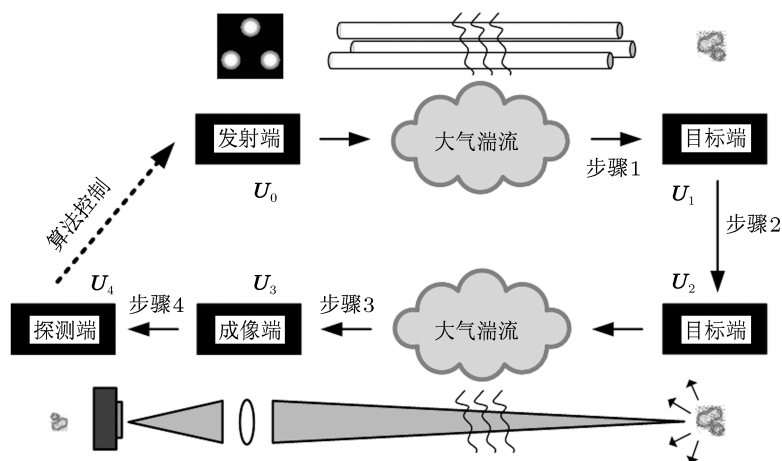


图 1 目标在回路相干合成物理模型

发射光束阵列为

$$U_0 = \sum_{\text{sub}=1}^N u_{\text{sub}}, \quad (2)$$

步骤 1 和 3 为激光大气传输过程, 满足近轴近似标量波动方程, 即

$$\begin{aligned} 2ik \frac{\partial}{\partial z} u(r, z) + \Delta u(r, z) + k^2 \left(\frac{n^2}{n_0^2} - 1 \right) u \\ + ik\alpha_t(z)u(r, z) = 0, \quad (3) \end{aligned}$$

其中, $u(r, z)$ 为光波函数, k 为波数; $n(r, z) = n_0 + n_1$ 为大气折射率, n_0 为未受扰动的大气折射率, n_1 为大气折射率扰动量; $\Delta = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$, α_t 为大气消光系数; z 轴表示光束传输方向.

在步骤 2 中, 目标端对相干照明光的强度漫反射. 对该过程可采用在 U_1 上施加高斯型的随机相位和反射截面 T (反映目标形状、位置、大小等信

息) 的方式进行描述^[17], 即

$$U_2 = U_1 \exp(i\psi_{\text{rand}}) \cdot T, \quad (4)$$

其中, ψ_{rand} 为高斯型随机相位.

对于步骤 4, 目标端可认为位于无穷远 (大于 1 km), 则目标端光斑的像都位于成像端的后焦面上, 可根据透镜的傅里叶变换性质得到 U_4 , 即:

$$U_4(x_4, y_4) = c' \exp\left(j\pi \frac{x_4^2 + y_4^2}{\lambda f}\right) F\left\{ U_3(x_3, y_3) \right\}_{f_x=x_4/\lambda f, f_y=y_4/\lambda f}, \quad (5)$$

其中, c' 为常数因子, λ 为波长, f 为成像透镜的焦距, $F\{\}$ 表示傅里叶变换.

探测端的光强分布可表示为

$$I_4(x_4, y_4) = |U_4(x_4, y_4)|^2. \quad (6)$$

一般地, 选取环围能量 (Power-in-Circle, PIC)

作为算法评价指标:

$$PIC = \iint_S I_4(x_4, y_4) dx_4 dy_4. \quad (7)$$

根据算法评价指标, 经锁相和倾斜校正后, 子光束的相位修正为

$$\exp \left[j\mathbf{k}_{\text{sub}} \cdot \mathbf{r}_{\text{sub}} + j\delta_{\text{sub}}^{\text{piston}} - j\delta_{\text{sub}}^{\text{phase-locked}} + j\sigma_{\text{sub}}^{\text{tilt}}(\mathbf{r}_{\text{sub}}) - j\sigma_{\text{sub}}^{\text{tilt-control}}(\mathbf{r}_{\text{sub}}) \right], \quad (8)$$

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

至此, 完成了闭环控制, 实现了多路激光传输后在远场目标上的相干合成.

3 实验系统

3.1 平台

基于目标在回路的三路光纤传输激光相干合成如图 2 所示. 种子光源为单模保偏 He-Ne 激光, 经分束器后, 将其中的三路连接到 AFOC 阵列 (品字型排列), 三路激光准直输出. 远场变换透镜 (透镜 1) 将出射光束聚焦, 焦距为 1000 mm. 合成光束经分光棱镜分光, 一束到达目标端的白纸漫反射屏, 一束经显微物镜 (10×) 到达 CCD 用于观察. 目标屏上的远场光斑背向散射, 经透镜 (透镜 2) 成像到发射装置附近的 CMOS 相机, 以像的 PIC 定义

性能指标. 系统采用随机并行梯度下降 (SPGD) 算法 [5,7,9], 根据性能指标产生三路锁相信号和六路倾斜校正信号, 控制 AFOC 阵列中的锁相模块和倾斜校正模块, 完成闭环控制, 在目标屏上实现相干合成. 需要强调的是, 在大气传输环境中, 透镜 2 的口径应小于大气相干长度 r_0 , 以保证系统实现目标屏上的相干合成. 本文实验中的大气环境比较宁静, 所用的透镜 2 口径为 75 mm.

3.2 自适应光纤光源准直器

实验用相位控制器件为一种可同时调整光程和光束倾斜的自适应光纤光源准直器, 包括了锁相模块与倾斜校正模块, 如图 3 所示. 光纤端面固定于十字梁中心, 在准直透镜的焦平面内平移, 激光准直输出. 锁相模块: 压电堆驱动器工作时, 于 z 方向施加电场, 压电堆驱动器的微量伸缩带动准直器做轴向的同方向运动, 调节光程, 光程改变量等于压电堆驱动器的伸缩变化量 ΔL . 倾斜校正模块: 双压电驱动器工作时, 在 x (或 y) 方向施加电场, 两压电片一片伸长一片缩短, 驱动器在 x (或 y) 方向弯曲, 驱动十字梁, 带动光纤端面在准直透镜的焦平面内平移 Δx , 出射光的倾斜量大小为 $\Delta x/f$, 其中 f 为准直镜头焦距.

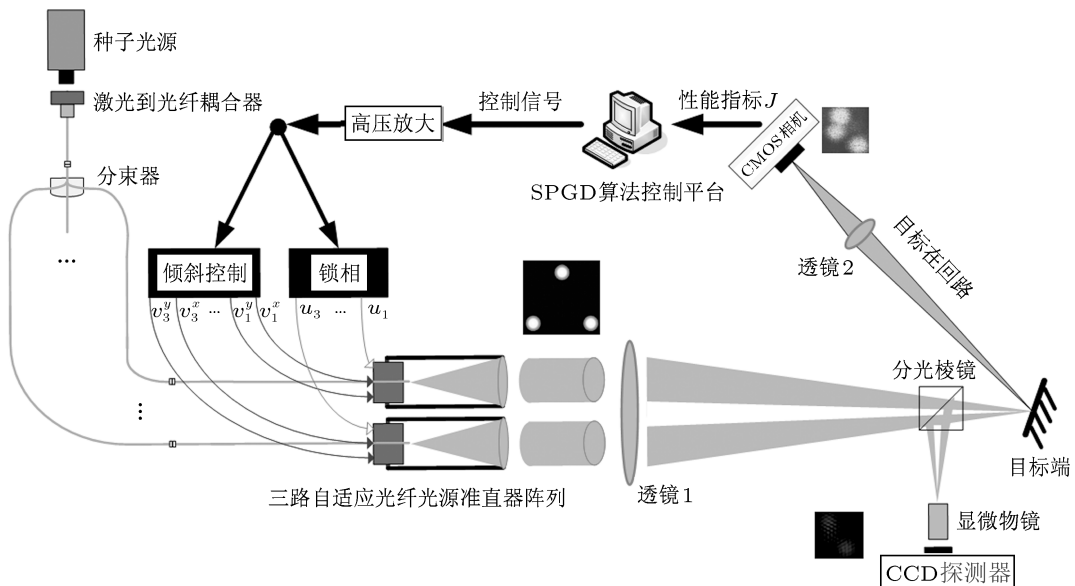


图 2 基于目标在回路的三路光纤传输激光相干合成示意图

经测试, 该器件的光程调节范围在 $\pm 1 \mu\text{m}$ 之间, 光束倾斜量调节范围约 $\pm 75 \mu\text{m}/f = \pm 1 \text{ mrad}$ (准直镜头焦距 $f = 75 \text{ mm}$), 锁相模块的第一阶谐振频率约 1.8 kHz , 倾斜校正模块的第一阶谐振频率约 800 Hz .

3.3 控制策略

系统控制策略采用 SPGD 优化算法, 沿梯度方向搜索性能指标的最大值. CMOS 相机位于发射端附近, 接收目标的回光, 以作为算法的性能指标, 圆心为算法执行时第一帧图像的质心. 根据倾斜控制和锁相的不同特性, 需要有针对性地选取环围的直径. 下面探讨在倾斜控制和锁相过程中, 如何合理地选取环围直径.

假设有倾斜相差时, CMOS 相机上的光斑如图 4(左) 所示. 选择 3 种环围作比较, 圆心都为算法执行时第一帧图像的质心. 环围 1 的直径很小, 不包含三个光斑的任一部分, SPGD 算法施加随机扰动时环围内的总能量不变, 算法不能估计梯度的方

向; 环围 2 的直径等于单个光斑的直径, 覆盖了三个光斑的一部分, 这时 SPGD 算法施加的随机扰动会改变环围内的总能量, 从而获得梯度的方向信息; 环围 3 的直径很大, 将三个光斑完全圈在其中, 这时 SPGD 算法也是无法搜索到梯度变化的. 所以, 用 SPGD 算法校正倾斜时, 环围内必须包含每个光斑的信息. 而在校正了倾斜相差后, 如图 4(右) 所示, 环围 1 对倾斜相差的变化很敏感, 可以保证算法能有效执行, 但是当倾斜相差变化较大时, 算法容易失稳; 环围 2 对倾斜的改变较为敏感, 算法可以有效地工作, 当倾斜相差变化剧烈时, 其环围一般仍能覆盖光斑的一部分, 算法稳健性较好; 环围 3 对倾斜的变化不敏感, 算法不稳定. 因此, 倾斜校正时让环围的直径等于单光斑直径较为合适. 图 5(a) 为倾斜相差校正前 CMOS 相机采集到的单帧散斑图像, 单个光斑的直径约 40 个像素. 经测试, 实验中选择直径 40 个像素的环围作为倾斜控制性能指标 (J_{tilt}) 时, 算法能较好地收敛, 此时环围直径等于单光斑的直径.

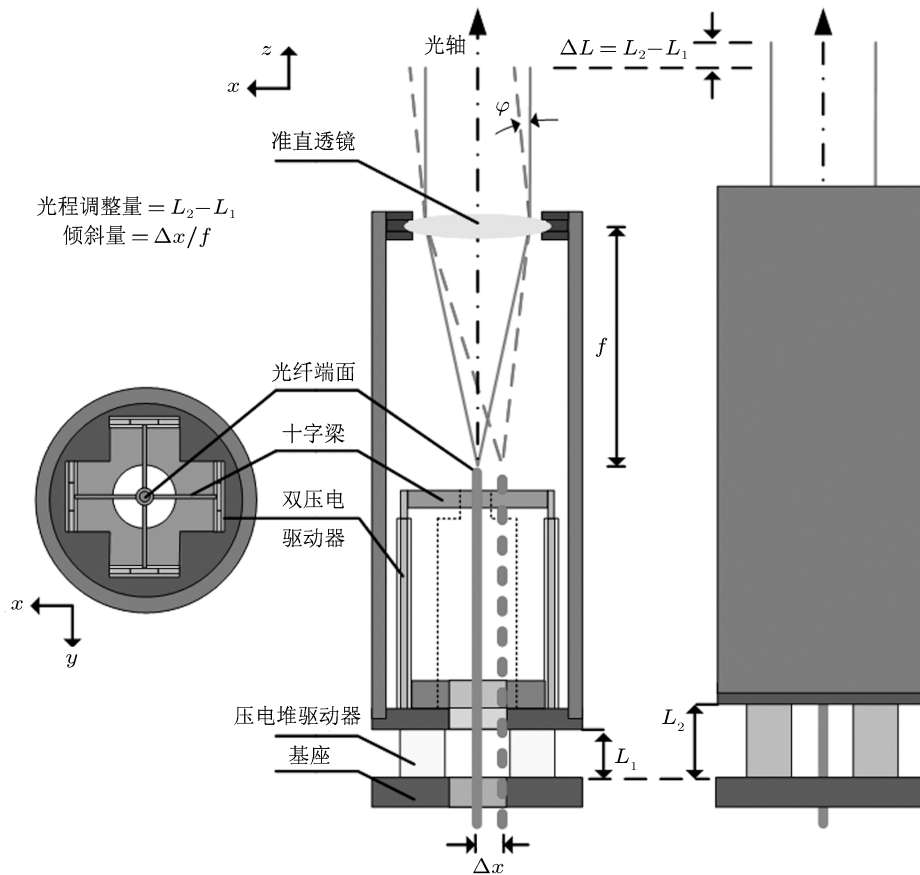


图 3 可同时调整光程和光束倾斜的自适应光纤光源准直器

图 5(b) 为校正倾斜相差后, CMOS 相机采集到的单帧图像. 由图可知, 光斑从中心向外的梯度变化不是特别显著, 因此需要合理选择锁相的环围直径.

校正倾斜相差之后, 测试了不同环围直径的性能指标的变化曲线, 每条曲线包含 2000 个数据, 从

中得到了最大值和最小值, 如表 1 所示. 由表 1 可知, 当环围直径大于 10 个像素时, 归一化性能指标的最小值都在 0.9 以上, 这时用 SPGD 算法实现锁相是十分困难的. 本实验中, 选取环围圆心处能量 (即峰值能量) 为锁相性能指标 J_{pis} .

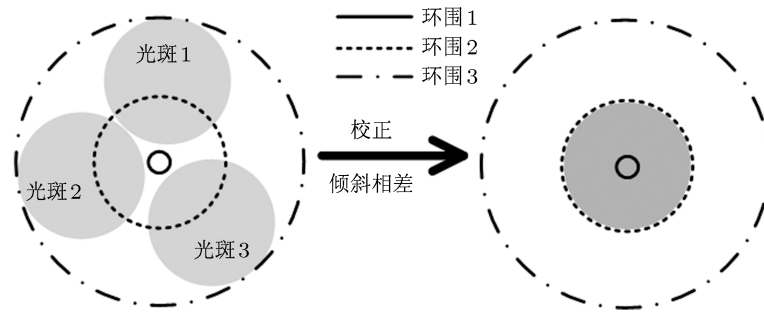


图 4 倾斜控制时, 选取环围直径的示意图

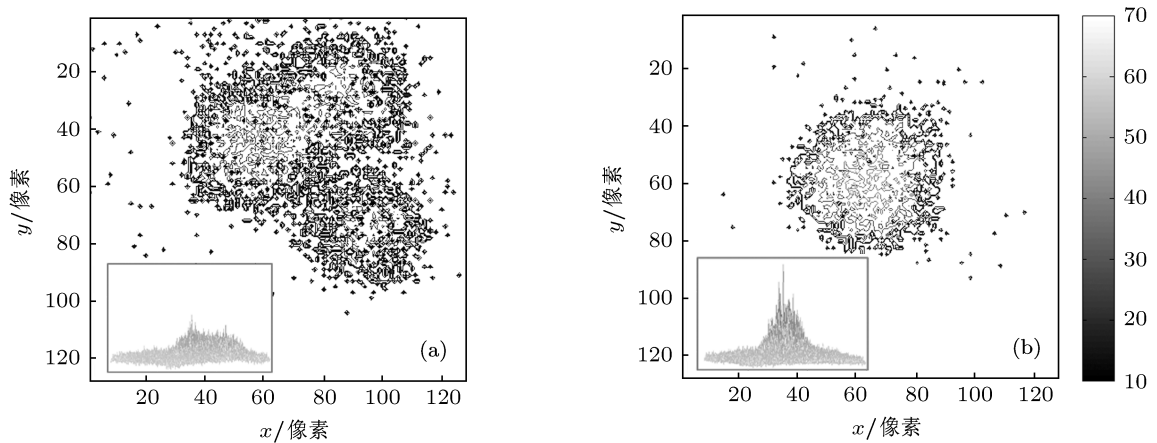


图 5 校正倾斜相差前后, CMOS 相机采集到的单帧散斑图像 (a) 校正前; (b) 校正后

表 1 校正倾斜相差后, 不同环围直径的性能指标的变化

性能指标	环围直径	1 像素	2 像素	5 像素	10 像素	20 像素	40 像素
最大值		70	246	1366	4495	17325	53686
最小值		32	144	1040	4054	15910	49793
归一化最大值		1	1	1	1	1	1
归一化最小值		0.46	0.59	0.76	0.9	0.92	0.93

锁相与倾斜校正的算法流程相同. 以锁相为例, SPGD 算法的迭代过程为:

(1) 将 $\mathbf{U} = \{u_1, u_2, u_3\}$ 作用于锁相模块, 得到性能指标 $J_{\text{pis}}(\mathbf{U})$;

(2) 随机生成一组伯努利分布的微小电压扰动 $\Delta \mathbf{U} = \{\Delta u_1, \Delta u_2, \Delta u_3\}$;

(3) 将 $\mathbf{U}_+ = \mathbf{U} + \Delta \mathbf{U}$ 作用于锁相模块, 得到性能指标 $J_{\text{pis}+}(\mathbf{U}_+)$, 再用 $\mathbf{U}_- = \mathbf{U} - \Delta \mathbf{U}$ 得到性

能指标 $J_{\text{pis}}(U_-)$;

(4) 将锁相信号更新为 $U = U + \gamma_p \Delta U (J_{\text{pis}+} - J_{\text{pis}-})$, 进入下一次迭代.

其中 $\gamma_p = \{\gamma_p, \gamma_p, \gamma_p\}$ 为算法增益.

4 实验结果

实验中 CMOS 相机的帧速为 75 帧/s, SPGD 算法的迭代速率约 25 Hz. 在安静的实验室环境中分别进行了基于目标在回路的光束间倾斜相差校正、光束间平移相差校正, 以及平移和倾斜相差的同时控制等实验.

图 6 是仅校正光束间倾斜相差时性能指标 J_{tilt} 的迭代曲线. 图 6(a) 为某一次迭代的结果. 图 6(b) 为九次迭代的平均, 经过约 200 次迭代后初始倾斜相差被校正, 倾斜控制性能指标由开环时的 0.79 (平均值) 提升至闭环时的 0.98 (平均值).

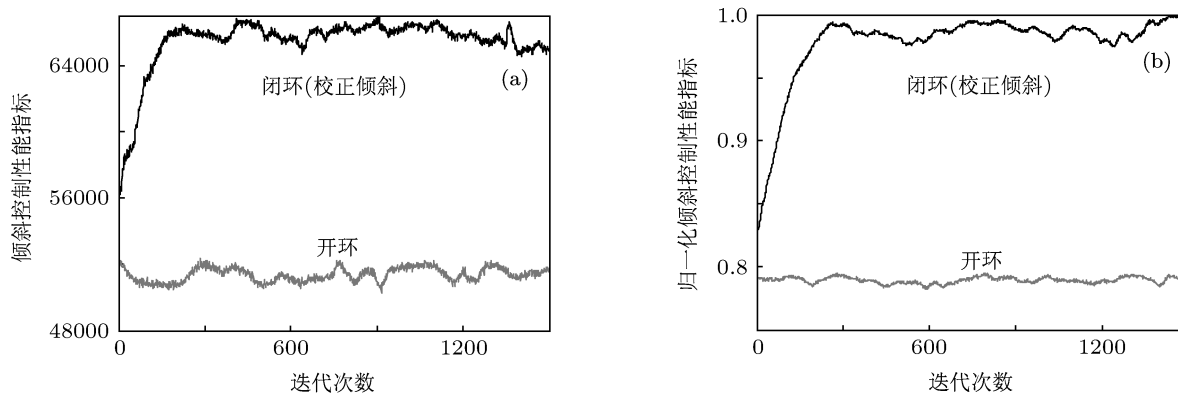


图 6 仅校正倾斜相差时 J_{tilt} 的迭代曲线 (a) 某一次迭代; (b) 九次迭代的平均

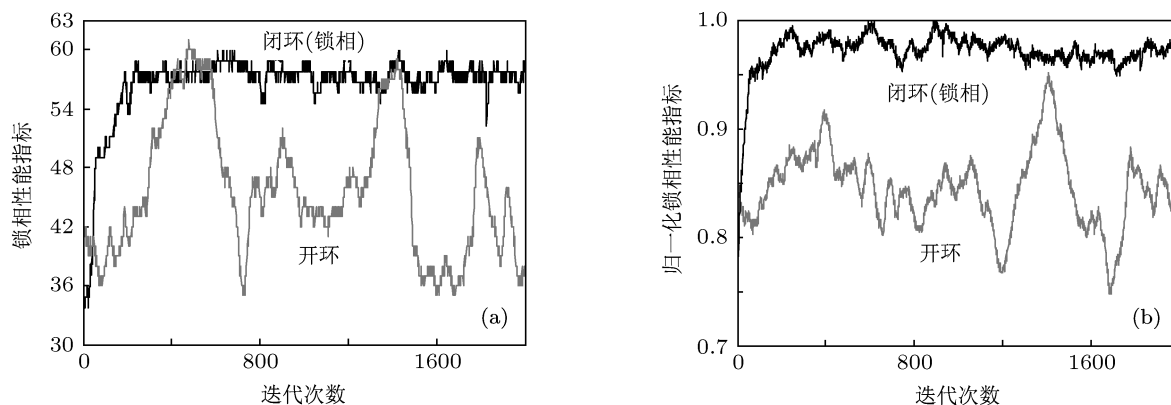


图 7 校正初始倾斜相差后, 仅锁相时 J_{pis} 的迭代曲线 (a) 某一次迭代; (b) 九次迭代的平均

图 7 为校正初始倾斜相差后, 仅校正平移相差时, 锁相性能指标 J_{pis} 的迭代曲线. 图 7(a) 为某一次迭代的结果. 图 7(b) 为九次迭代的平均, 约 50 次迭代即可实现锁相, 锁相性能指标由开环时的 0.84 (平均值) 提升至闭环时的 0.97 (平均值).

图 8 是 CCD 探测的远场光斑 400 s 长曝光图. 图 8(a) 为开环, 由图可知, 光束间能量不相同, 且存在着初始倾斜相差 (约 200 μrad 以内), 光斑的灰度峰值为 61; 图 8(b) 是仅校正倾斜相差的情形, 光斑集中, 但图样模糊, 灰度峰值提升至 120; 图 8(c) 为同时锁相并校正倾斜的情形, 光斑集中, 条纹对比度接近 1, 灰度峰值达到了 241, 为开环时的 4 倍, 图中的虚线标示了第二圈旁瓣的位置, 与图 8(d) 相比没有外圈旁瓣是由于 CCD 的设置原因造成的; 图 8(d) 为理想情况, 图中的虚线与图 8(c) 相同. 经锁相并校正倾斜后, 实验获得了接近理想情况的相干合成效果.

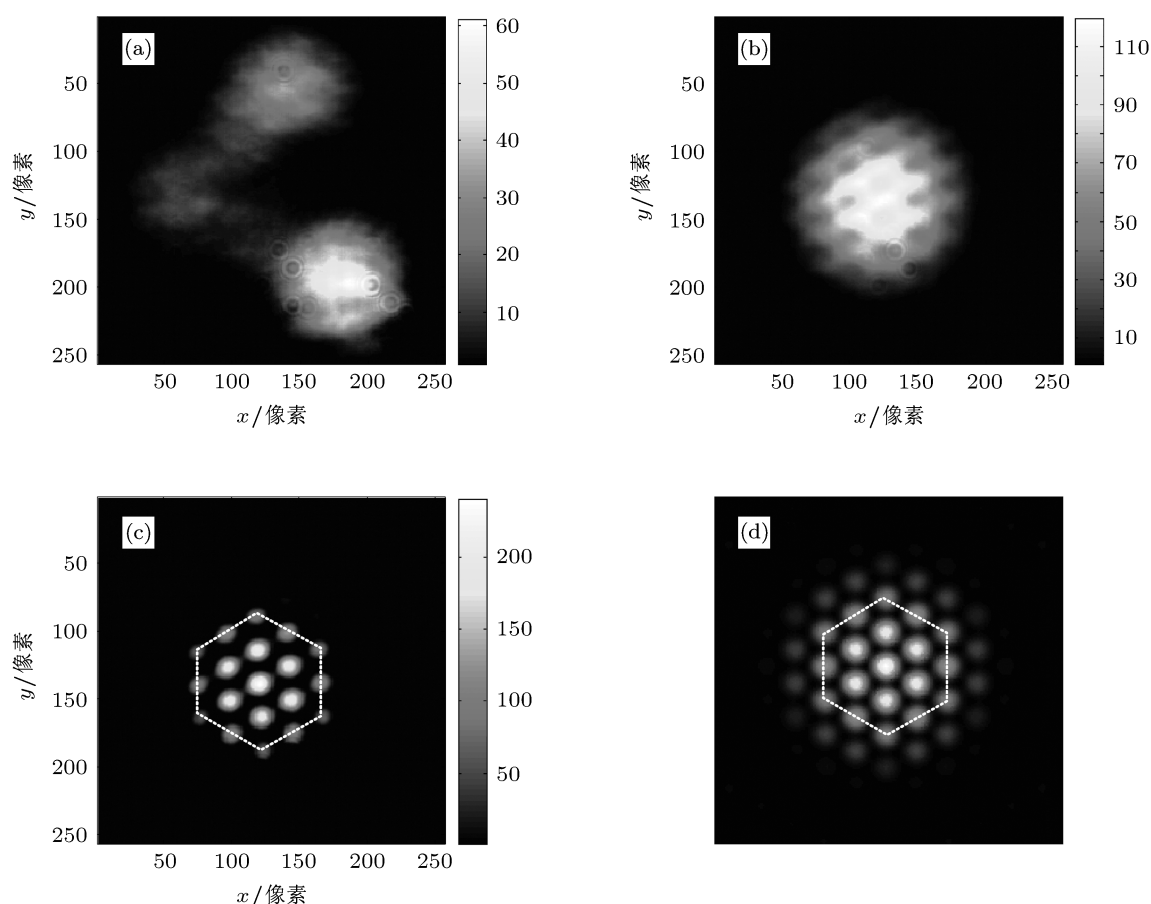


图 8 远场光斑的 400 s 长曝光图 (a) 开环; (b) 仅校正倾斜; (c) 同时锁相并校正倾斜; (d) 理想情况

5 结论

目标在回路技术是实现相干组束长距离传输的有效方法, 但是将该技术应用于相干合成的理论研究和实验都不多. 本工作首次实现了基于 TIL 的光纤传输激光相干合成中平移与倾斜相差的同时补偿, 峰值功率密度较开环时提升了 4 倍. 实验表明, 利用目标的回光可以在远场实现光束合成, 从而摆脱了在远场放置探测器的限制. 但是, 该技术离实用还有一段路要走. 首先, 为了保证在目标上实现合成, 散射光回程时, 成像透镜的口径受到大

气相干长度的限制, 从而影响了探测器接收的光强度和分辨率; 其次, 由于 SPGD 算法的迭代特性, 要克服动态噪声就需要大幅度地提高系统控制带宽, 而目标在回路技术能实现的最长传输距离会受到系统控制带宽的制约, 关于这个问题需要详细地研究和探讨.

需要特别指出的是, 本实验中采用的是传输光纤而非功率放大光纤, 二者在相位噪声等特性上有着很大不同, 但并不影响对目标在回路技术的方案验证. 今后, 将完善 TIL 模型, 进行相关理论研究, 并在大气环境下进行长距离传输的相干合成实验.

- [1] Shay T M, Benham V, Baker J T, Sanchez A D, Pilkington D, Lu A 2007 *IEEE J. Sel. Topics in QE* **13** 480
- [2] 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]
- [3] 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]

- [4] Zhou P, Ma Y X, Wang X L, Ma H T, Xu X J, Liu Z J 2010 *Chin. Phys. B* **19** 014202
- [5] 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
- [6] Ma Y X, Wang X L, Leng J Y, Xiao H, Dong X L, Zhu J J, Du W B, Zhou P, Xu X J, Si L, Liu Z J, Zhao Y J 2011 *Opt. Lett.* **36** 951

- [7] Vorontsov M, Weyrauch T, Beresnev L, Carhart G, Liu L, Aschenbach K 2009 *IEEE J. Sel. Topics in QE* **15** 269
- [8] Geng C, Zhang X J, Li X Y, Rao C H 2011 *Infrared and Laser Engineering* **40** 1682 (in Chinese) [耿超, 张小军, 李新阳, 饶长辉 2011 红外与激光工程 **40** 1682]
- [9] Geng C, Zhang X J, Li X Y, Rao C H 2011 *Opt. Comm.* **284** 5531
- [10] Vorontsov M, Carhart G, Gowens J 2002 *Proc. SPIE* **4825** 67
- [11] Basu S, Voelz D, Chandler S, Lukesh G 2005 *Proc. SPIE* **5895** 58950M-1
- [12] Vorontsov M, Kolosov V 2005 *J. Opt. Soc. Am. A* **22** 126
- [13] Vorontsov M, Kolosov V, Kohnle A 2007 *J. Opt. Soc. Am. A* **24** 1975
- [14] Piatrou P, Roggemann M 2007 *Appl. Opt.* **46** 6831
- [15] Bourdon P, Jolivet V, Bennai B, Lombard L, Canat G, Pourtal E, Jaouen Y, Vasseur O 2008 *Proc. SPIE* **6873** 687316-1
- [16] Bourdon P, Jolivet V, Bennai B, Lombard L, Goulard D, Canat G, Vasseur O 2009 *Proc. SPIE* **7195** 719527-1
- [17] Wang Y J, Wu Y 1998 *Acta Opt. Sin.* **18** 1470 (in Chinese) [王英俭, 吴毅 1998 光学学报 **18** 1470]

Experimental investigation on coherent beam combination of a three-element fiber array based on target-in-the-loop technique*

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 3 March 2011; revised manuscript received 22 April 2011)

Abstract

A kind of target-in-the-loop (TIL) technique which promises the coherent combination of multi-element laser beams in far field is experimentally demonstrated. The physical model of coherent beam combination (CBC) based on TIL is established. A kind of adaptive fiber optics collimator correcting piston and tip/tilt errors simultaneously is employed to compensate phase errors between beamlets. The CBC of a 3-element fiber array based on TIL is successfully achieved and a perfect effect of CBC is captured. In this paper, we present a reference for long-distance transmission of multi-element coherent beams in real atmospheric environment.

Keywords: fiber array, coherent beam combination, target-in-the-loop, adaptive fiber optics collimator

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