

受激布里渊散射波前畸变校正仿真实验

张 颖,柯熙政,陈明莎

(西安理工大学 自动化与信息工程学院,陕西 西安 710048)

摘 要: 采用受激布里渊散射(SBS)现象的自泵浦相位共轭镜(PCM)特性在改善激光相位分布进而提高光斑能量集中度方面具有重大应用价值。基于后向 SBS 散射光的相位共轭特性,数值模拟了不同畸变程度和不同取样孔径对 SBS-PCM 校正效果的影响,并搭建 SBS-PCM 波前畸变补偿实验系统,对不同影响因素的补偿效果进行验证。仿真及实验研究结果表明:在弱畸变情况下光斑经系统补偿后相对强畸变情况分布更均匀规整,光斑能量集中度更高;在强畸变情况下大取样孔径显示出优势,校正效果更佳。仿真和实验结果均表明,SBS-PCM 有较强波前畸变校正能力。

关键词: 激光通信; 波前校正; 受激布里渊散射; 相位共轭镜

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1122001

Simulation experiment of wavefront distortion correction in stimulated Brillouin scattering

Zhang Ying, Ke Xizheng, Chen Mingsha

(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The self-pumped phase conjugate mirror (PCM) feature using the stimulated Brillouin scattering(SBS) phenomenon has great application value in improving the laser phase distribution and the energy concentration of the spot. Based on the phase conjugation characteristics of back scattered SBS light, the influence of different degree of distortion and different sampling aperture on SBS-PCM correction was numerically simulated. The SBS-PCM wavefront distortion compensation system was established to verify the compensation effect of different influencing factors. The simulation and experimental results show that under the condition of weak distortion, the spot distortion is more uniform and regular than the strong distortion after compensation, and meanwhile spot energy concentration is higher. In the case of strong distortion, large sampling aperture shows the advantage of better correction. Simulation and experimental results show that SBS-PCM has strong wavefront distortion correction capability.

Key words: laser communication; wavefront correction; stimulated Brillouin scattering; phase conjugate mirror

收稿日期:2018-06-10; 修订日期:2018-07-20

基金项目:国家自然科学基金(61377080,60977054);陕西省重点产业创新项目(2017ZDCXL-GY-06-01)

作者简介:张颖(1982-),女,讲师,博士,主要从事无线光通信理论方面的研究。Email: zhangying@xaut.edu.cn

通讯作者:柯熙政(1962-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事自由空间光通信方面的研究。Email: xzke@263.net

0 引言

激光在实际传输中由于受到大气湍流、热晕和散射等效应的影响,会造成激光能量损耗,传输方向发生扭曲,激光波前发生畸变,严重制约了激光在通信领域中的应用^[1]。因此,修正传输介质不均匀引起的波前像差畸变,在激光应用中是十分有意义的。由于受激布里渊散射相位共轭技术能实时地产生相位共轭波,光束波前畸变可通过波前反演过程有效地消除。这个特点使得受激布里渊散射技术在逆向调制自由空间激光通信系统中具有广阔的应用前景,近年来成为激光领域的研究热点之一^[2]。

SBS 过程产生相位共轭波只需要一束入射泵浦光,结构简单,是目前最为成功的产生相位共轭波的方法^[3]。自 1972 年 B.Ya.Zeldovich 等^[4]首次发现受激布里渊散射相位共轭技术以来,相位共轭技术得到了广泛而深入的研究。2007 年,王雨雷等^[5]提出一种大能量高功率受激布里渊散射相位共轭镜的独立双池结构,补偿双程放大光路中的动态和静态相位畸变,相位共轭镜能量反射率大于 65%,相位共轭保真度大于 95%。2010 年, Y.L.Wang 等^[6]设计了旋转楔形板引入 SBS-PCM 系统中为防止热效应的积累,大幅度提高 SBS-PCM 系统在高重复频率下的反射率稳定性和波前畸变补偿能力。2010 年,赵智刚等^[7]采用大口径锥度融石英光纤作为相位共轭镜,在重复频率 400 Hz 时获得大于 50% 的反射率,补偿了激光晶体中的相位畸变。文中在此基础上为进一步地探究了 SBS 相位共轭技术补偿波前畸变的效果,通过仿真分析和实验验证了 SBS 相位共轭镜补偿波前畸变的效果随不同畸变程度和不同取样孔径的变化情况,结果说明采用受激布里渊散射相位共轭技术补偿激光传输过程中波前畸变的优越性。

1 理论分析

1.1 SBS 相位共轭镜校正波前畸变系统

SBS 相位共轭镜校正波前畸变的原理如图 1 所示,具体过程为:从源面 X_s 出发的平面波通过湍流大气传输后将引起光束波前畸变,畸变光波进入取样孔径为 D 的 SBS-PCM,利用受激布里渊后向相

位共轭技术,实时地产生畸变光波的后向相位共轭波。当后向相位共轭光波沿原路返回再次经过引起畸变的非均匀介质后,由于非均匀介质对光波波前的二次作用,使得回到源面 X_s 处带有波前信息的相位共轭波畸变相消。

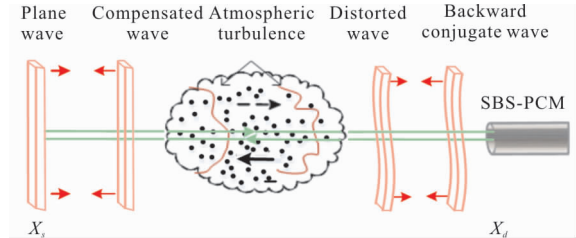


图 1 相位共轭镜修正波前畸变过程

Fig.1 Process of correcting wavefront distortion by phase conjugate mirror

假设源面 X_s 处平面波光场为 U_1 ,经湍流大气传输至 SBS-PCM 端面 X_d 处的畸变光场 U_2 为:

$$U_2(x, y, z) = U_1(x, y, z=0) e^{ikz} \cdot e^{i\varphi(x, y)} \quad (1)$$

式中: $U_1(x, y, z=0) = \exp[-(r^2/w_0^2)]$; z 为光束传输距离; w_0 为基模高斯光束的束腰半径; $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, $k = 2\pi/\lambda$ 。假定忽略散射和吸收的影响,只考虑湍流效应对波前造成的影响, $\varphi(x, y)$ 为相位畸变。根据 FFT 谱反演法模拟得到相位屏 $\varphi(x, y)$ ^[8],其中大气折射率起伏谱采用 Von Karman 谱,根据多层相位屏法模拟出湍流大气中高斯光束传播到相位共轭镜的过程^[9]。Von Karman 谱模型为:

$$\Phi_n(\kappa) = 0.033 C_n^2 (\kappa^2 + \kappa_0^2)^{-11/6} \quad 0 \leq \kappa \ll 1/l_0 \quad (2)$$

式中: κ 为空间波数; $\kappa_0 = 2\pi/L_0$, l_0 和 L_0 分别为湍流内外尺度; C_n^2 为大气折射率结构常数。

畸变光场 U_2 进入取样孔径为 D 的 SBS-PCM,产生的受激布里渊后向散射光为孔径内畸变光波 U_2 的相位共轭波。沿原路返回再次经过湍流大气,相位共轭波的 $-\varphi(x, y)$ 与新的相位畸变 $\varphi(x, y)$ 相互抵消, SBS-PCM 的相位共轭反射率为 \bar{R} ,则经相位共轭镜补偿后的光场为:

$$U'(x, y, z) = \bar{R} \cdot \left\{ U_2^*(x, y, z) \right\} \cdot e^{i\varphi(x, y)} = \bar{R} \cdot U_1(x, y, z=0) e^{-ikz} \quad r < D \quad (3)$$

经相位共轭镜补偿后光场 U' 与在 X_s 处的发射光场波前完全相同,即重新得到一反向传播的、无畸变的理想波前,畸变波前得到有效补偿。

1.2 受激布里渊后向散射光的相位共轭特性物理解释

SBS 过程的物理模型如图 2 所示,由 SBS 池和会聚透镜组成。泵浦光束为畸变光束,被会聚透镜聚焦到 SBS 相互作用区中与介质发生相互作用产生强的弹性感应声波场,入射激光与声波场相互耦合从而产生一与入射泵浦光反向传输的强后向散射光^[10]。

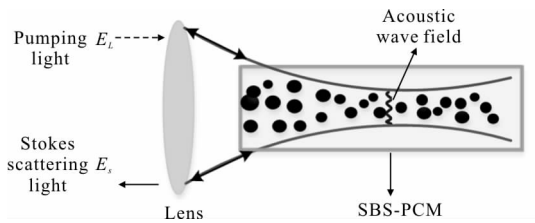


图 2 SBS 系统物理场景

Fig.2 SBS system physics scene

假设泵浦光为沿 z 轴反向传播频率为 ω_L 的线偏振光 $E_L(\vec{r},t)=1/2E_L(r_\perp,z)e^{i(-k_Lz-\omega_Lt)}$,后向散射光为沿 z 轴正向传播频率为 ω_s 的线偏振光 $E_s(\vec{r},t)=1/2E_s(r_\perp,z)e^{i(k_s z-\omega_s t)}$ 。从麦克斯韦方程出发,稳态条件下泵浦光和散射光满足方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial E_L}{\partial z} + 2ik_L \nabla_\perp^2 E_L = 0 \\ \frac{\partial E_s}{\partial z} - 2ik_s \nabla_\perp^2 E_s = \frac{1}{2} \xi E_s = |E_L|^2 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\xi = \omega_s \gamma^2 k / 16 \pi n c \rho_0 \Gamma$, γ 为电致伸缩系数, $\Gamma = 1/2\tau_a$, τ_a 为声子寿命, n 为 SBS 介质折射率, ρ_0 为介质平均密度,在 SBS 过程中 $k_s \approx k_L = k$,选一组正交归一化函数集 $f_k(r_\perp, z)$ 满足方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial f_k}{\partial z} - 2ik_s \nabla_\perp^2 f_k = 0 \\ \int f_k^*(r_\perp, z) f_k(r_\perp, z) dr_\perp = \delta_{ik} \end{cases} \quad (5)$$

选取函数 f_k^* ,使它与泵浦光满足如下关系:

$$E_L(r_\perp, t) = B f_0^*(r_\perp, z) \quad (6)$$

式中: B 为常数; 散射光振幅 E_s 按正交函数集 f_k 展开:

$$E_s(r_\perp, z) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k(z) f_k(r_\perp, z) \quad (7)$$

将公式(7)代入到公式(5),并利用公式(4),可得:

$$\partial E_s(z) / \partial z = \frac{1}{2} \xi \sum_l \sum_k G_{lk00}(z) c_k(z) \quad (8)$$

公式(8)中 $G_{lk00}(z)$ 为:

$$G_{lk00}(z) = \int f_l \cdot f_k^* |f_0|^2 dr_\perp \quad (9)$$

当泵浦光和散射光相位分布都较复杂时,公式(9)相乘的结果中若含有剩余相位项, G_{lk00} 的积分结果很小,只有无剩余相位项的 G_{lk00} 才会较大,此时 $k=l$,称为相位匹配项,则:

$$G_{kl00} = G_{lk00} = \int |f_k(r_\perp, z)|^2 |f_0(r_\perp, z)|^2 dr_\perp \quad (10)$$

若泵浦光强或散射光强沿横向 r_\perp 剧烈起伏,此时 $|f_0(r_\perp, z)|^2$ 和 $|f_k(r_\perp, z)|^2$ 都随 r_\perp 急剧变化,由于 $|f_0(r_\perp, z)|^2$ 和 $|f_k(r_\perp, z)|^2$ 的最大值和最小值部分重叠,以及这些函数的复杂特性,因此积分 G_{lk00} 除 G_{0000} 外都很小,而

$$G_{0000} = \int |f_0(r_\perp, z)|^4 dr_\perp \quad (11)$$

经过长距离后,受激布里渊散射光为:

$$E_s(r_\perp, z) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k(z) f_k(r_\perp, z) = \frac{c_0(z)}{B} E_L^*(r_\perp, z) \quad (12)$$

即受激布里渊散射光为泵浦光的相位共轭波。

2 数值仿真

文中主要对 SBS 相位共轭镜补偿波前畸变的效果进行了分析。校正时采用能量集中度作为系统性能评价指标,能量集中度的定义式为 $K = \frac{\int |U'|^2 dx dy}{\int |U_1|^2 dx dy}$, U' 为补偿后共轭光束的光场, U_1 为入射初始高斯光束的光场^[10]。

图 3 表示不同湍流强度下 SBS 相位共轭镜校

正前后的光斑分布。仿真参量选取如下：波长 $\lambda=532\text{ nm}$ ，束腰半径 $w_0=80\text{ mm}$ ，传输距离 $z=1\ 000\text{ m}$ ，相位共轭镜的相位共轭反射率 $\bar{R}=100\%$ ，相位共轭镜孔径取值 $D=0.1\text{ m}$ 。大气折射率结构常数分别取 $c_n^2=0$ ， $c_n^2=2\times 10^{-17}\text{ m}^{-2/3}$ ， $c_n^2=2\times 10^{-15}\text{ m}^{-2/3}$ ， $c_n^2=2\times 10^{-12}\text{ m}^{-2/3}$ 。

图 3(a)~(d)为高斯光束经不同强度湍流大气传输后的光斑分布，图 3 (e)~(h) 为不同畸变光束经 SBS 相位共轭镜校正后的光斑分布图。由图 3(a)~(d)可以看出，湍流强度越强，相位畸变越严重，光斑

分裂成几块。由图 3(e)~(h)可以看出，不同畸变光束经校正后光斑中心能量均变强，SBS 相位共轭镜可有效校正光束波前畸变。对仿真结果定量分析，不同湍流强度下校正后系统的能量集中度 K 依次为 0.983 4, 0.818 0, 0.690 3, 0.301 6。从数据可看出，湍流强度越强，能量集中度越小。由于在 SBS 过程中，只有光束进入 SBS 相位共轭镜的孔径内，才能实现完全的相位共轭波前反转，但强湍流下其损失光束的振幅和相位信息较多，部分光束未进入相位共轭镜孔径内，因此强湍流下补偿效果相对较差。

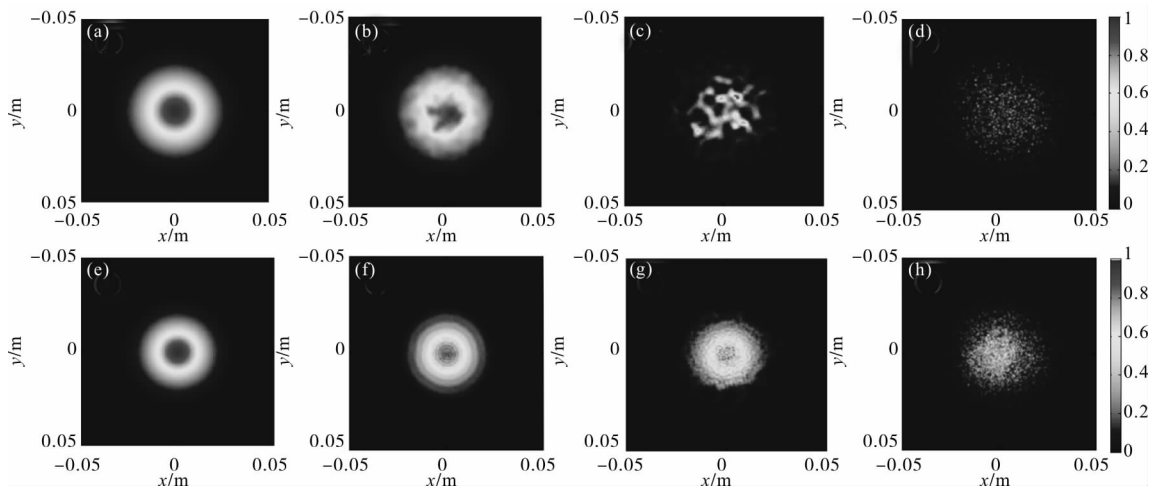


图 3 不同湍流强度下校正前后光斑分布图

Fig.3 Light spot distribution before and after correction under different turbulent intensity

图 4 为不同取样孔径下 SBS 相位共轭镜校正前后的光斑分布。仿真参量选取如下：波长 $\lambda=532\text{ nm}$ ，束腰半径 $w_0=80\text{ mm}$ ，传输距离 $z=1\ 000\text{ m}$ ，相位共轭镜

的相位共轭反射率 $\bar{R}=100\%$ ，大气折射率结构常数分别取 $c_n^2=2\times 10^{-15}\text{ m}^{-2/3}$ ， $c_n^2=2\times 10^{-12}\text{ m}^{-2/3}$ 。相位共轭镜孔径分别为 $D=0.15\text{ mm}$ 、 $D=0.1\text{ m}$ 、 $D=0.05\text{ m}$ 。

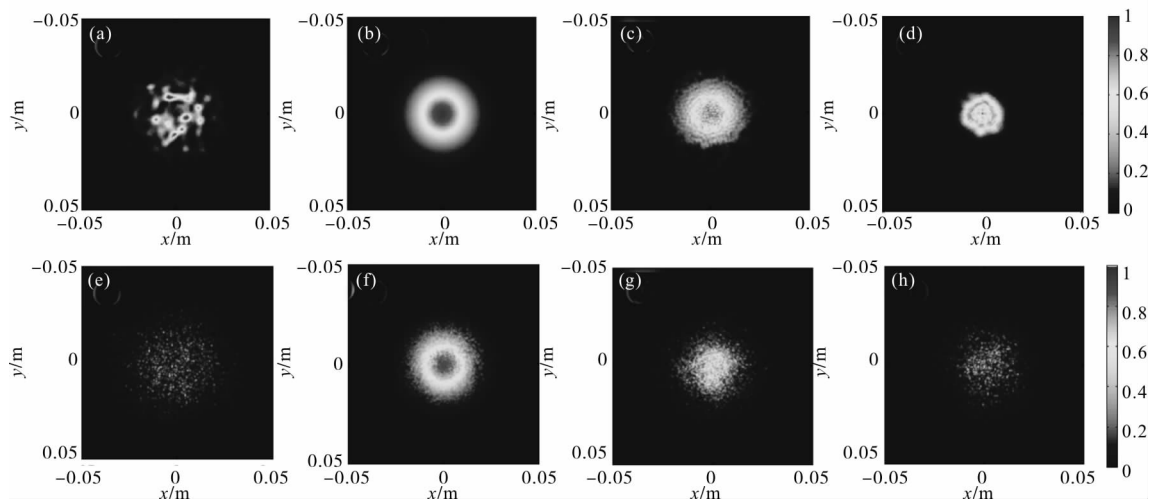


图 4 不同取样孔径下校正前后光斑分布图

Fig.4 Light spot distribution before and after correction under different sampling aperture

图 4(a)、(e)分别为高斯光束经不同强度湍流大气传输后的光斑分布,图 4(b)~(d)为当 $c_n^2=2\times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 时的弱畸变光斑经不同孔径相位共轭镜校正后的光斑分布,图 4(f)~(h)为当 $c_n^2=2\times 10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$ 时的强畸变光斑经不同孔径相位共轭镜校正后的光斑分布。由图 4(b)~(d)及图 4(f)~(h)均可看出,取样孔径越大,校正后光斑中心能量越强,校正效果更佳。对仿真结果定量分析,当取样孔径分别为 $D=0.15 \text{ mm}$ 、 $D=0.1 \text{ m}$ 、 $D=0.05 \text{ m}$ 时,弱畸变光斑经校正后系统的能量集中度 K 依次为 0.980 3、0.690 3、0.245 8,强畸变光斑经校正后系统的能量集中度 K 依次为 0.846 7、0.308 2、0.029 4。从数据均可看出,取样孔径越大,能量集中度取值越大。弱畸变情况下系统能量集中度在 10^{-1} 量级,强畸变时下降到量级 10^{-2} ,强畸变情况下系统的能量集中度明显小于弱畸变时。在强畸变情况下,大取样孔径系统的能量集中度较高,在大孔径下由于大部分能量及相位信息进入 SBS 相位共轭镜被共轭,故强畸变时大取样孔径显示出优势。

3 实验验证

依据相位共轭镜补偿畸变理论,设计图 5 的实验系统进行补偿效果验证。调 Q Nd:YAG 激光器波长 532 nm,脉冲宽度约为 8 ns,重复频率为 1 Hz,能量 30 mJ。通过 $\lambda/2$ 波片将激光器的输出偏振方向调成 P 偏振,P 偏振光经 $\lambda/4$ 波片后变成圆偏振光传输至随机相位板 RPP 使得波前发生畸变,通过分光棱镜 BS,由焦距为 10 cm 的透镜对畸变光束进行聚焦,并由一可调光阑在 SBS 池前取样,取样信

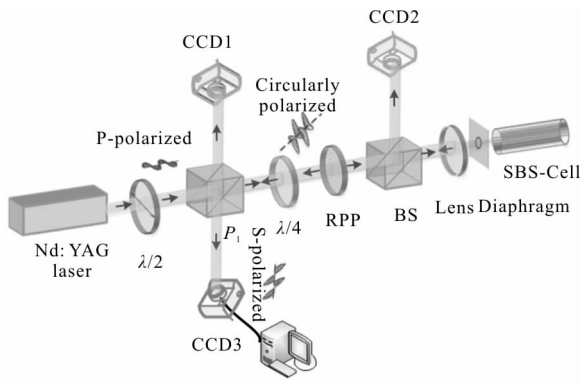


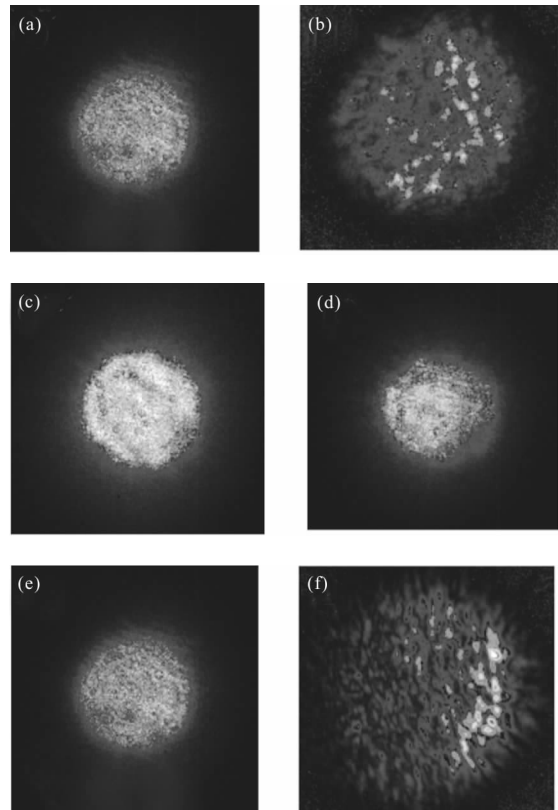
图 5 实验装置图

Fig.5 Experimental setup

号入射到 SBS 池中。 CCl_4 为 SBS 介质,池长 40 cm。SBS 池产生的 Stokes 光沿原路返回经过 $\lambda/4$ 波片后变成 S 偏振光,在 P_1 处反射。采用光束分析仪 (Ophir-Spiricon 公司生产,型号为 SP620) 实时地获取光斑图像并记录数据,其中 CCD1、CCD2 分别测量入射泵浦光斑和畸变光斑,CCD3 测量返回的 SBS 光斑。随机相位板 RPP 为采用氢氟酸对普通光学玻璃进行不同程度的腐蚀得到的,由于随机相位板各处薄厚不均,导致激光通过时光程不一致,从而使得激光相位产生畸变。随机相位板腐蚀较为严重时称为强畸变情况,腐蚀较弱时称为弱畸变情况。

文中选择光斑环围能量直径 $D_{4\sigma}$ 作为性能指标用于评价系统的校正效果,环围能量直径定义为该直径内包含的光束能量占总能量的比值为 η , $\eta=84\%$ 。改变图 5 中光阑孔径的大小,得到不同取样孔径下 SBS 相位共轭镜校正前后的近场光斑分布,如图 6(a)~(h)所示。

图 6(a)、(e)为激光器出射泵浦光斑,完整且无散斑。图 6(b)、(f)分别为泵浦光通过腐蚀程度较弱、较强的随机相位板后的光斑分布,可看出腐蚀程度较严重的相位板会使得光斑分布更为破裂并且扩散,



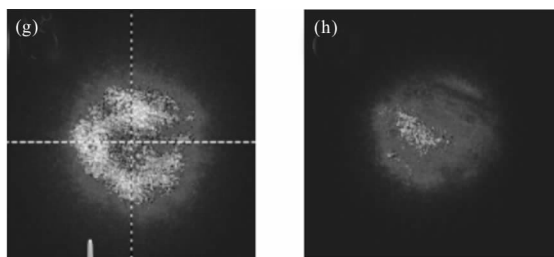


图 6 不同取样孔径下系统校正前后近场光斑分布
Fig.6 Near field spot distribution before and after correction under different sampling apertures

相位畸变更严重。图 6(c)、(d)为弱畸变情况下取样孔径分别为 $D=10\text{ mm}$ 、 $D=6\text{ mm}$ 时经 SBS-PCM 补偿后的光斑,图 6(g)、(h)为强畸变情况下取样孔径为 $D=10\text{ mm}$ 、 $D=6\text{ mm}$ 时经 SBS-PCM 补偿后的光斑。可看出,返回的 SBS 光斑相对畸变光斑分布均变得均匀而规整,SBS-PCM 有较强波前畸变校正能力。此外,弱畸变情况下经补偿后的光斑相对强畸变情况分布要较为完好,且取样孔径较大时补偿后的光斑分布更规整;在强畸变情况下,取样孔径较小时补偿后光斑较弱且发散,取样孔径较大时,校正后的光斑明显形状较规整,补偿效果更佳,大取样孔径在光斑畸变较严重的情况下显示出优势。

对不同取样孔径下的校正结果进行定量分析,得到校正前后环围能量直径的数值如表 1 所示。

表 1 SBS 相位共轭镜校正前后环围能量直径值
Tab.1 Value of ring energy diameter before and after correction by SBS phase conjugate mirror

D_{in}/mm	Weak distortion			Strong distortion		
Before correction	2.48	2.56	2.52	3.67	3.69	3.74
After correction $D=10\text{ mm}$	2.02	2.04	2.01	2.32	2.29	2.35
After correction $D=6\text{ mm}$	2.17	2.18	2.25	2.64	2.68	2.63

从表 1 的实验数据可看出,在光斑畸变较弱和畸变较强的情况下,校正后光斑的环围能量直径值均相对畸变光斑要明显减小;在相同畸变情况下取样孔径越大,校正后光斑的环围能量直径越小,能量集中度越高。可从物理上解释:受激布里渊散射过程具有明显的阈值特性,即:光斑中的强区部分进

入孔径被共轭,弱的地方被孔径截止从而阻止了受激布里渊后向散射光产生,影响了相位共轭镜的补偿效果。

4 结 论

文中依据受激布里渊后向散射相位共轭的方法,从仿真和实验上研究了 SBS 相位共轭镜补偿波前畸变的效果,并分析了 SBS-PCM 系统在不同畸变情况和不同取样孔径下的校正效果,可得出以下结论:(1)畸变严重程度不同的光斑经校正后中心能量均变强,光束质量显著提高,SBS 相位共轭镜能有效地校正正光束波前畸变。(2)弱畸变情况下经系统补偿后光斑分布较完整,SBS-PCM 系统校正效果更佳;且取样孔径越大,经系统校正后光斑中心能量越强,校正效果更佳,强畸变情况下大孔径显示出明显优势。综上所述,文中解决了引言中提出的问题,并对仿真及实验结果从物理上进行解释。文中所得到的结论使得受激布里渊散射相位共轭技术应用于逆向调制激光通信中具有参考意义。

参考文献:

- [1] Liu Xudong, Liu Xinyue, Wang Shuai, et al. Performance testing of a desk-top 97-element adaptive optical system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(6): 1272-1280. (in Chinese)
- [2] Chen Xudong, Chang Chengcheng, Pu Jixiong, et al. Stimulated Brillouin scattering phase conjugation of light beams carrying orbit angular momentum [J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(3): 21-23. (in Chinese)
- [3] Liu Diwei, Liu Honglin, Qiao Mu, et al. Scattering effect suppressing and optical field recovering by phase conjugation technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(7): 0711002. (in Chinese)
- [4] Zeldovich B Ya, Popovichev V I, Ragulskii V V, et al. Connect between the wave fronts of the reflected and exciting light in stimulated Mandelshtam-Brillouin scattering[J]. *JETP*, 1972, 15(3): 109-112.
- [5] Wang Yulei, Wei Zhiwei, He Weiming, et al. Investigation on a high energy stimulated Brillouin scattering phase-conjugate mirror [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(2): 883-888. (in Chinese)
- [6] Wang Y L, Lu Z W, Li Y, et al. Investigation on high

- power phase compensation of strong aberrations via stimulated Brillouin scattering[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 99(1-2): 257-261. (in Chinese)
- [7] Zhao Zhigang, Cui Lingling, Tong Lixin, et al. All-solid-state high pulse repetition rate high pulse energy single-longitudinal-mode MOPA laser system with solid-state phase conjugating mirror [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(12): 2949-2953. (in Chinese)
- [8] Li Yujie, Zhu Wenyue, Rao Ruizhong, et al. Simulation of random phase screen of non-Kolmogorov atmospheric turbulence [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 1211001. (in Chinese)
- [9] Li Dun, Ning Yu, Wu Wuming, et al. Numerical simulation and validation method of atmospheric turbulence of phase screen in rotation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(12): 1211003. (in Chinese)
- [10] Yuan Hang, Wang Yulei, Lu Zhiwei, et al. Theoretical investigation on 200 ps laser pulses amplification based on Stimulated Brillouin Scattering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(9): 0914003. (in Chinese)