

文章编号: 1001-4322(2002)06-0837-04

在激光大气传输中利用 SBS 阈值效应 实现小面积信标的研究*

鞠有伦, 于欣, 王月珠, 陈德应, 王 骐, 杜晓军, 马祖光

(哈尔滨工业大学 光电子技术研究所 可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 在理论上建立起将受激布里渊散射(SBS)与激光大气传输过程相结合的激光补偿传输的数学模型,并进行了数值模拟,提出并证明了利用 SBS 阈值效应可以将相位共轭光会聚到目标上一个面积上,从而在目标上主动获得小面积信标光斑。利用 SBS 实现激光大气补偿传输(传输距离 250m)的实验研究,证实了上述理论预期。

关键词: 受激布里渊散射(SBS); 阈值; 信标

中图分类号: O433.5 **文献标识码:** A

激光大气传输是研究激光在通过大气传播的过程中,大气与激光相互作用产生的一系列线性和非线性效应,以及这些效应对激光大气传输的影响,了解与掌握激光大气传输规律,从而设法回避和尽可能减小大气对激光传输的影响。激光在大气中传输时,由于存在着大气折射、大气气体分子和气溶胶粒子的吸收和散射、湍流效应、热晕效应等因素,导致了激光束能量的衰减、光斑漂移、扩展、畸变以及对目标识别能力和跟踪瞄准精度的下降等问题,严重影响着许多激光的工程应用。在对激光大气传输的研究中,校正光束波前相位畸变和解决信标问题是两项关键技术^[1-4]。研究发现,用以 SBS 为代表的非线性相位共轭不仅可以校正激光大气传输畸变,而且利用相位共轭的阈值特征可以实现较小的局部照明,这不仅提高了目标上激光能量集中度,还有利于提高对目标的跟瞄精度。SBS 相位共轭系统结构简单,可对信标光进行全视场的相位共轭,能实时校正光束波前畸变。因此 SBS 效应在激光大气传输中得到了深入研究。

我们采用 SBS 相位共轭效应实现了激光大气补偿传输,传输距离为 250m。建立了将 SBS 与激光大气传输过程相结合的数学模型并进行了数值模拟,证明了利用 SBS 阈值特性可以在非配合和扩展目标上主动获得小面积信标。

1 理论分析

1.1 主动信标光过程

对于非配合目标,一般采用主动信标光的方法来实现激光在大气中的补偿传输。主动信标光过程可以用七个步骤描述:(1)由系统的探测激光器向目标发射一束探测光,探测激光穿过大气到达目标;(2)探测激光被目标反射;(3)目标的反射光穿过大气又返回系统的接收孔径,由于这束光在由目标到达系统的传输过程中,大气湍流等因素使它的波前发生了畸变。由于它带有由目标到系统间大气畸变的信息,这束光被称为信标光,目标上的反射区域称为信标;(4)系统对接收到的信标光进行放大和相位共轭,这一过程是由系统的放大器(功率放大器、小信号放大器和非线性相位共轭器)完成的,最后产生的相位共轭光再由系统发射出去;(5)由系统的发射孔径发出的相位共轭光沿信标光在大气中的传输路径又返回目标上的信标处。在此过程中,信标光由目标到系统间的传输过程中的波前畸变得到了补偿,到达目标上的相位共轭光是消除了这一波前畸变的光,它在目标上的强度、相位分布与目标处的信标光完全相同;(6)相位共轭光被目标反射;(7)被目标反射出的相位共轭光经大气又传输回到探测激光器。其中前五个步骤是实际中真正有用的。利用 SBS 实现激光在大气中的补偿传输过程可以用图 1 来表示。

在激光大气补偿传输的过程中,返回目标的相位共轭光的光强分布与由目标反射出的信标光的光强分布

* 收稿日期:2001-10-30; 修订日期:2002-05-13

基金项目:国家 863 激光技术领域资助课题(863-410-6)

作者简介:鞠有伦(1967-),男,副教授,从事非线性光学及大气传输研究工作;哈尔滨工业大学 309 信箱;E-mail:jyul@hope.hit.edu.cn.

相同。若目标上的信标光斑是大面积的一片,这样投射到目标上的相位共轭光也分布在这个大面积上。利用 SBS 实现相位共轭时,由于 SBS 的阈值特性,使得返回目标的相位共轭光将只出现在目标上原信标光强足够强的地方,而目标上原信标光强较弱的地方没有相位共轭光返回,这样相位共轭光将集中到一个小区域上。

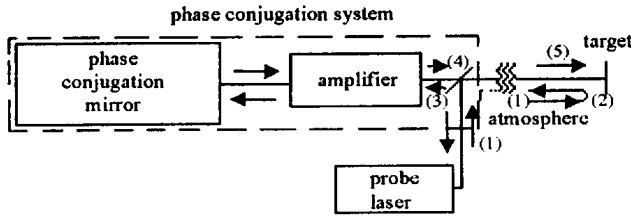


Fig. 1 Process of laser propagation in the atmosphere with phase conjugation

图 1 利用相位共轭技术实现激光大气补偿传输的过程

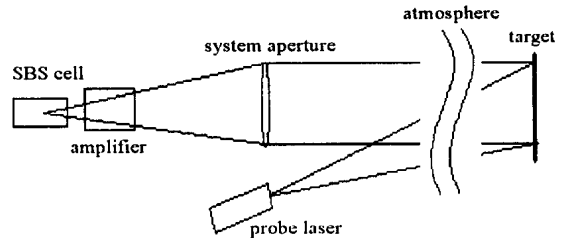


Fig. 2 Structure model used in simulation

图 2 数值模拟的结构模型

1.2 数值模拟计算

对于利用 SBS 实现激光大气传输过程的数值模拟基于图 2 的结构模型。从描述 SBS 方程组出发,用差分代替微分,以辛普森数值积分代替积分项,考虑大气扰动使入射到 SBS 池中的泵浦光和斯托克斯光波前发生畸变,此时耦合波方程变为稳态情况^[5]

$$\frac{\partial}{\partial z} E_{pk}(z) = \frac{g}{2} \left[\int_{j=0}^{N-1} |E_{sj}(z)|^2 E_{pk}(z) |G_j|^2 |G_k|^2 dx + \int_{j=0}^{N-1} E_{pj}(z) E_{sj}(z) E_{sk}^*(z) |G_j|^2 |G_k|^2 dx \right] W + E_{pk}(z) \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial z} E_{sk}(z) = \frac{g}{2} \left[\int_{j=0}^{N-1} |E_{pj}(z)|^2 E_{sk}(z) |G_j|^2 |G_k|^2 dx + \int_{j=0}^{N-1} E_{sj}(z) E_{pj}(z) E_{pk}^*(z) |G_j|^2 |G_k|^2 dx \right] W + E_{sk}(z) \tag{2}$$

$$W = \frac{t}{2} \left\{ \sum_{n=1}^{m+1} \exp[-(m+1-n)t] + \sum_{n=0}^m \exp[-(m+1-n)t] \right\} \tag{3}$$

式中: E_p, E_s 为 SBS 池中的泵浦光和斯托克斯光; $\Delta\omega_p = 1/2 \nu_p$ 为自发布里渊散射的带宽, ν_p 为声子寿命; $g = 2g_1 g_2 / \nu_p$, g_1 和 g_2 为 SBS 过程中光场与介质间的耦合系数; α 为吸收系数。通过求解方程(1),(2),得到由 SBS 过程产生的斯托克斯光,将其乘以一个放大系数,即可得到目标上相位共轭光的分布。

在数值计算过程中,假设相位共轭系统的接收孔径为 1m,焦距为 2m,SBS 池长为 0.1m,入射到 SBS 池内的信标光的焦点在池中心,光波长为 694.3nm,目标距离系统 10km,系统的放大系数与各种损耗相抵消。

在计算过程中,探测光由探测光源传输到目标上的过程由中科院力学所编制的 3-D 程序算出。图 3(a),(b),(c)的左图是在不同大气扰动条件下,传输到目标上的探测光分布。如果假设目标各处的反射率均匀分布,这个探测光的分布也就是目标上信标光斑的分布。可以看出,大气扰动的加强使目标上的信标光斑逐渐由高斯分布变为较乱的由许多小光斑(即激光散斑)组成的情况。在方程(1),(2)中考虑目标上信标光场分布,算出的返回目标的相位共轭光分布如图 3(a),(b),(c)的右图所示。可以看出,在不同大气扰动条件下,由于 SBS 阈值效应,返回目标的相位共轭光的光强分布都比原信标光的分布尖锐,在原信标光较弱的地方相位共轭光受到了抑制,这使更多部分的能量集中到了原信标光较强的地方。如果进一步对目标反射光进行相位共轭,将使相位共轭光中的绝大部分能量都集中到一个或几个原信标光最强的光点上,这样就达到了将相位共轭光会聚到一个小区域上的目的。

2 实验研究

我们利用 SBS 实现了激光大气补偿传输 250m 的室外实验,实验光路如图 4 所示。将激光由实验室发射到 250m 外的一幢八层楼上,因此激光为向上的斜程传输,角度近似为 0.1rad,大气湍流强度大约为 $C_n^2 = 10^{-15} \sim 10^{-13}$ 。

实验中用一个加有放大级(15)的红宝石激光器作为探测光源 1(IJ),在激光器(1)前加有一个发射望远镜

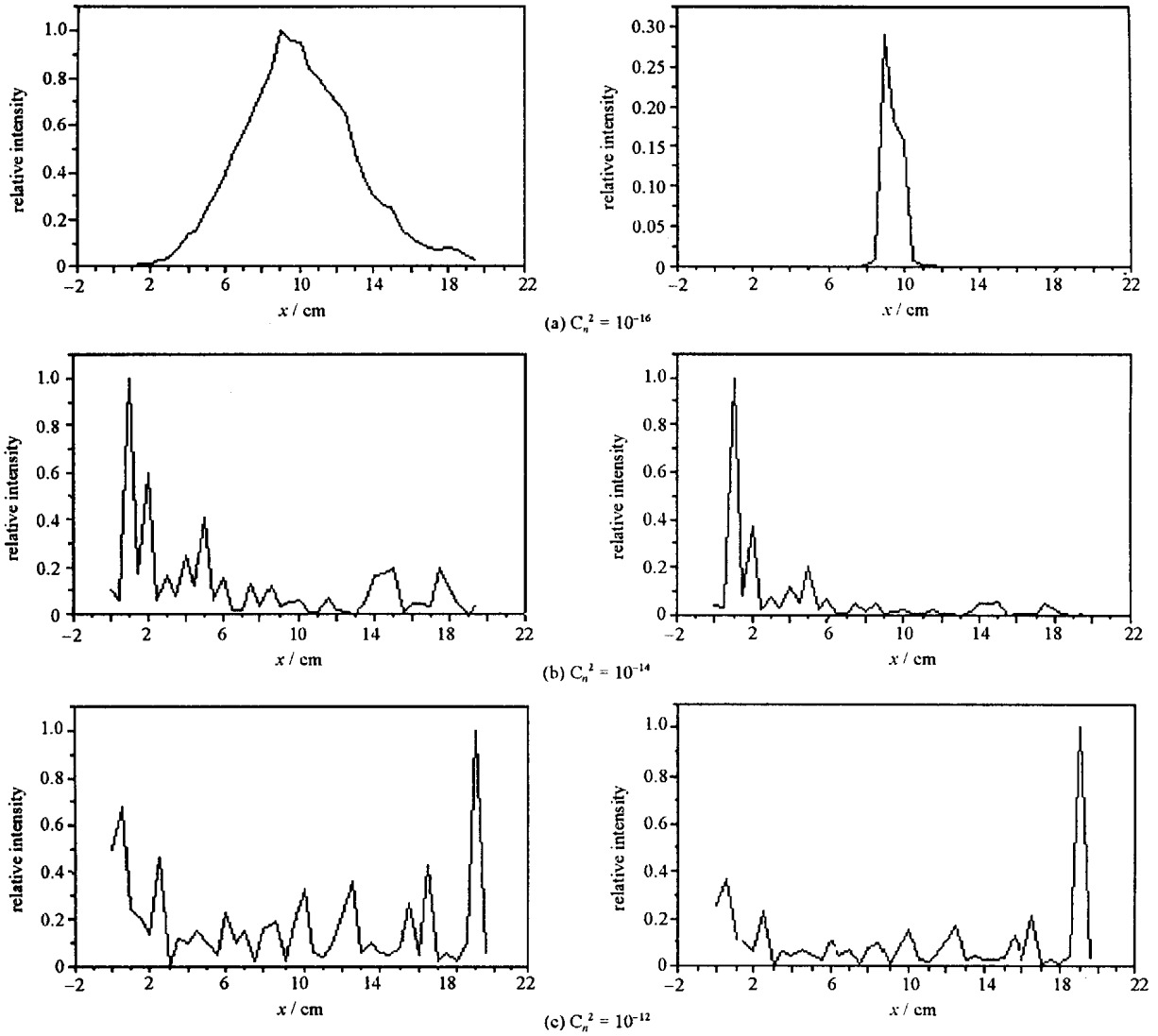


Fig. 3 Beacon light (left) and phase conjugated light on the target (right)

图 3 在不同大气扰动条件下,形成的目标上的信标光(左)和由计算得到对应的相位共轭光(右)的分布

(口径 10cm)系统(2),探测光由反射镜(图中未画出)引到室外,向距实验室 250m 结构近似屋脊镜的两个反射镜组成的目标(4)发射,由于望远镜准直性能很低,以及大气(3)扰动,使到达目标的探测光发散为一大片(口径约 1m)。而目标反射镜和接收望远镜口径都仅为 10cm,因此激光的损耗非常大,必须使探测光很强且信标光的放大器的放大率很大。目标将激光反射回实验室,作为信标光被反射镜(图中未画出)反射到室内,由一个接收望远镜系统(5)准直到放大器(6)内,被放大的信标光再经一个小透镜(7)聚焦到 SBS 池(8)内,产生的相位共轭光又经信标光的原路被二次放大后返回目标。其中(9)(10)为部分反射镜,(11)(12)为接收屏,(13)(14)为 CCD 镜头。

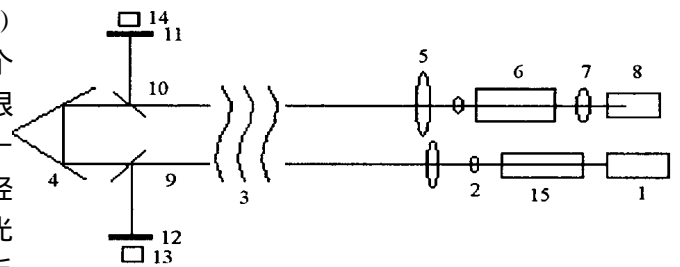


Fig. 4 Experiment of laser propagation through 250m with SBS

图 4 利用 SBS 实现激光大气补偿传输 250m 实验的光路图

从图 5 可以看到,相位共轭光的绝大部分能量都集中在几个强的尖峰上,且光强分布也较信标光更为尖锐,这是由于在 SBS 过程中,相位共轭镜对弱信标光的相位共轭反射率小于对强信标光的反射率,这不仅使每一个相位共轭光的尖峰更为尖锐,也使弱峰与强峰的差距更大。这样,如果经过多次相位共轭过程,在相位共轭光中,弱峰将逐渐被抑制掉,而使能量主要集中到最强的峰上。在几个强峰的强度都相近的情况下,最后的相位共轭光有可能会聚到这几个强峰上,而不是一个小光点上。在这种情况下,相位共轭光斑的面积仍较原信

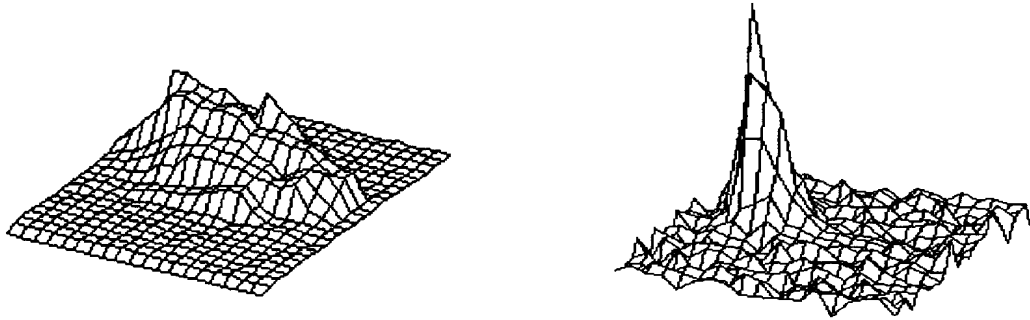


Fig. 5 Beacon light (left) and phase conjugated light (right) distribution in the propagation experiment of 250m

图 5 250m 传输实验的信标光斑(左)和相位共轭光斑(右)的光强分布

标光斑有很大的缩小。

实验中在目标处测得信标光和相位共轭光的能量均为 20mJ,这说明相位共轭系统中的放大器补偿了由大气传输和 SBS 过程给激光带来的损耗。由图 5 可以看到,尽管信标光和相位共轭光的总能量是一样的,但由于前者的能量分布在一个较大的面积上,在最强点上的能量密度后者要比前者大很多,这证明了利用 SBS 阈值效应提高目标上的光斑能量密度的效果。

3 结 论

利用 SBS 阈值效应将相位共轭光会聚到目标上的一个小面积内,从而在目标上主动获得小面积信标光斑,从理论和实验上进行了验证。在激光大气传输中利用 SBS 进行大气补偿的方法具有实效性且能达到远距离效果。

参考文献:

- [1] Stewart McKechnie T. Light propagation through the atmosphere and the properties of image formed by large ground-based telescopes[J]. *J Opt Soc Am A*, 1991, **8**(2): 346—363.
- [2] Andrews L C, Young C Y, Miller W B. Coherence properties of a reflected optical wave in atmospheric turbulence[J]. *J Opt Soc Am A*, 1996, **13**(4): 851—862.
- [3] 谢树茂, 雷广玉, 郑绍唐. 聚焦强激光束大气传输的数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 1996, **8**(3): 407—412. (Xie S M, Lei G Y, Zheng S T. Numerical calculation of focused high power laser beams propagation in the atmosphere. *High Power Laser and Particle Beams*, 1996, **8**(3): 407—412)
- [4] Wang X C, Zhou D W, Zhang Y M. Real-time compensation of atmospheric turbulence by nonlinear optical phase conjugation[J]. *Chin J Phys*, 1989, **38**: 466—470.
- [5] Cha R, Kamefsky M, Falk J. Transient phase conjugation by stimulated Brillouin scattering: numerical analysis of zero-order solutions[J]. *J Opt Soc Am B*, 1994, **11**(2): 331—338.

Realization of small area beacon using SBS threshold for laser propagation in the atmosphere

JU You-lun, YU Xin, WANG Yue-zhu, CHEN De-ying,
WANG Qi, DU Xiao-jun, MA Zr-guang

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Institute of Optoelectronics,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: A mathematical model of laser compensation propagation process by combining the stimulated Brillouin scattering (SBS) and laser propagation in the atmosphere is constructed and the numerical simulation is also conducted. On the basis of realizing a beacon of a small area on an uncooperative and extensive target with SBS threshold, we presented and demonstrated the feasibility of the method to actively obtain the phase-conjugate light on the target. The experiments of laser propagation with SBS are conducted in case of a 250m distance, which shows that by utilizing the SBS threshold effect the small area beacon could be obtained on the target actively.

Key words: stimulated Brillouin scattering (SBS); threshold; beacon