

文章编号 : 0253-2239(2001)12-1493-05

利用受激布里渊散射效应补偿激光大气 传输过程中的畸变*

王月珠 鞠有伦 姚宝权 于欣 柳强 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 哈尔滨 150001)

摘要: 提出了利用受激布里渊散射的阈值效应主动在非配合、扩展目标上实现小面积信标的方法,在不同的大气扰动条件($C_n^2 = 10^{-16} \sim 10^{-12}$)下,对激光的远距离(10 km)补偿传输过程进行了模拟计算,获得了到达目标上的相位共轭光的光强分布。分别在不同的实验环境进行了激光补偿传输实验,其中激光补偿传输距离最远达到 250 m。实验结果证实了利用受激布里渊散射实现激光大气传输补偿的有效性,证明利用阈值效应在目标上主动获得小面积信标的方法是可行的。

关键词: 光学相位共轭;受激布里渊散射;激光大气传输

中图分类号: TN012 文献标识码: A

1 引 言

激光在大气传输过程中,大气不均匀的折射率分布使激光的波阵面发生畸变,激光经过一段距离传输后,激光束将产生发散、漂移和闪烁等现象,其中激光束的发散使到达目标的激光功率密度下降几个数量级,因此大气对激光传输造成的影响是激光远程传输的重大障碍。早在 1977 年,Victor Wang 首先提出了利用非线性光学效应补偿激光在大气传输过程中的波前畸变^[1],到目前为止,人们已经尝试了利用各种非线性光学效应补偿激光大气传输补偿的研究^[2~4]。其中利用受激布里渊散射效应相对于其它的非线性光学效应具有结构简单和自抽运的优点,实现受激布里渊散射只需要一个透镜和一个盛

装散射介质的池子,这相对四波混频等非线性光学效应较复杂的光路设置,既简单,又提高了系统的稳定性。同时受激布里渊散射是由信标光自抽运的,对入射光没有严格的频率要求,甚至可以实现宽带或几个频率同时的散射过程。本文通过对受激布里渊散射补偿激光大气传输过程的模拟计算和实验研究,证实了利用受激布里渊散射实现激光大气补偿传输的有效性,证明利用阈值效应在目标上主动获得小面积信标的方法是可行的。

2 传输过程的数值模拟计算

对于利用受激布里渊散射实现激光大气传输过程的数值模拟结构如图 1 所示。

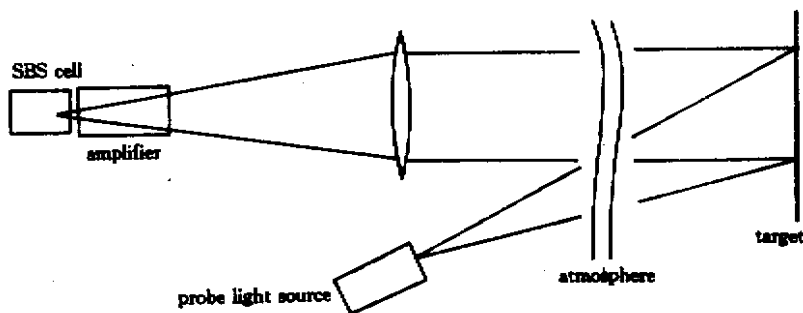


Fig.1 The structure model used in simulation

* 国家自然科学基金(69988002)和国家科委 863 高科技项目资助课题。

收稿日期 2000-09-20;收到修改稿日期 2000-11-20

为了能详细地讨论在各种大气扰动条件下,利用受激布里渊散射实现激光远距离传输的效果,通过解由文献[5]给出的抽运光和斯托克斯光不同分量的耦合波方程组成的方程组,可以求得由受激布

里渊散射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。

探测光源传输到目标的距离为 10 km,探测光由探测光源传输到目标的波前的演化由中科院力学所编制的 3-D 程序算出,图 2(a)、图 2(b)和图 2(c)中的左图是在不同大气扰动条件下,传输到目标上的探测光的光场分布,如果假设目标各处的反射率分布均匀,这个探测光的分布也就是目标上信标光斑的分布。

在大气结构常数 C_n^2 为 10^{-16} 时[图 2(a)],大气扰动强度较弱,传输到目标上的探测光的分布(信标光斑)虽然受到一定的影响,但还基本与高斯分布相似。由于受激布里渊散射的阈值效应,返回目标的相位共轭光只集中在原来信标光最强的中心,其它地方则完全没有相位共轭光,在这种大气扰动条件下,阈值效应的影响非常明显。因此在这种情况下,相位共轭光经这样一次相位共轭过程就会被会聚起来,且会聚的光斑是原信标光斑中心的一个小光斑。

在大气结构常数为 10^{-14} 时,大气扰动强度中等,图 2(b)显示出传输到目标上的探测光(信标光斑)已经分裂成多个小光斑,成为一片不规则分布的激光散斑。受激布里渊散射的阈值效应使返回目标的绝大部分相位共轭光集中在原来信标光最强的两个峰上,其它地方虽然也有相位共轭光,但其强度都受到了很大的抑制,即使在最强的两个峰里,相位共轭光两个峰的强弱差也较信标光更大,这时相位共轭光第二强的峰的光强也受到了一定的抑制,这使较多相位共轭光集中到最强的峰上。在这种情况下,相位共轭光不一定就会聚到一个光点上,而有可能是几个强光点上。

在大气结构常数为 10^{-12} 时,大气扰动强度极强,传输到目标上的探测光(信标光斑)也是一片不规则分布的激光散斑。图 2(c)表明,受激布里渊散射的阈值效应仍使绝大部分相位共轭光集中到原信标光斑最强的一个或两个峰上,与图 2(b)的情况相比,阈值效应对弱信标光处的相位共轭光的抑制作

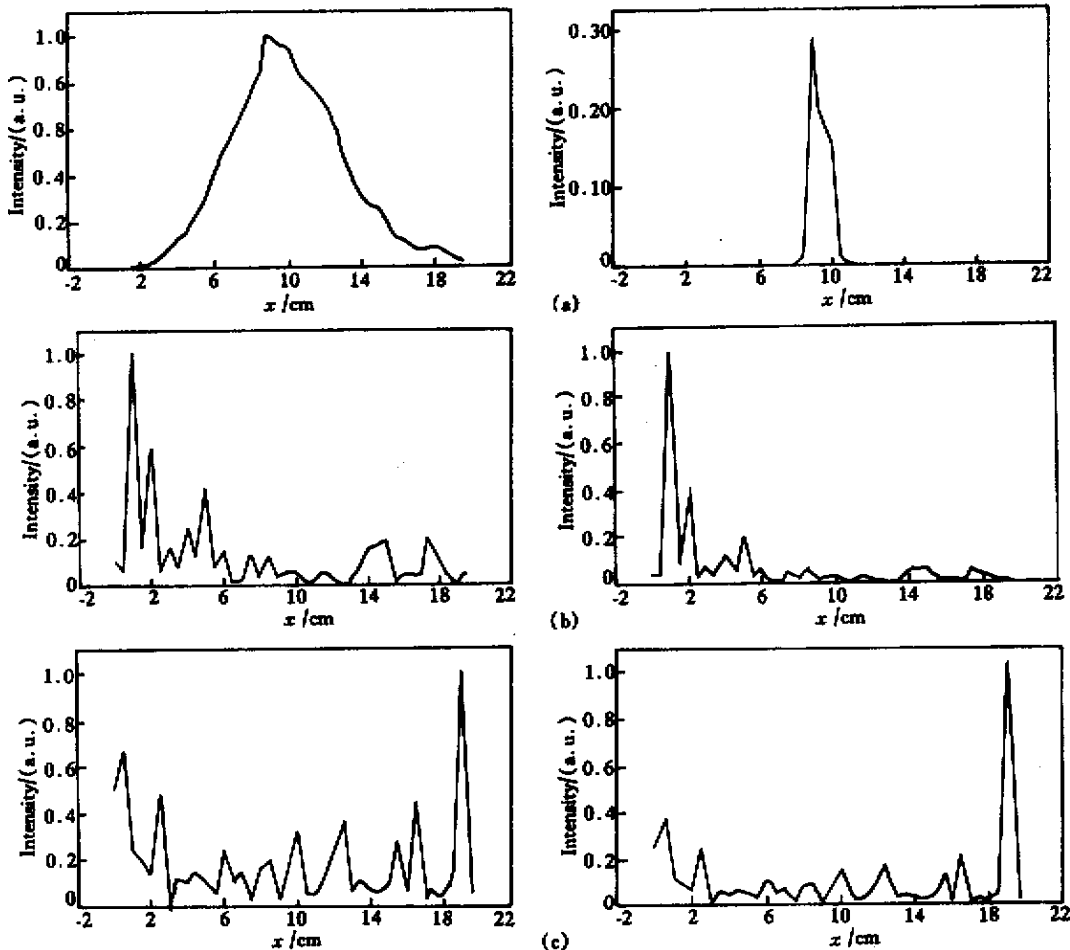


Fig. 2 The beacon light (left) and phase conjugated light on the target (right)

(a) $C_n^2 = 10^{-16}$; (b) $C_n^2 = 10^{-14}$; (c) $C_n^2 = 10^{-12}$

用稍有下降,但这种抑制作用仍然是很明显的。这说明,即使在最强的大气扰动条件下,受激布里渊散射的阈值效应仍能使相位共轭光斑缩小,使相位共轭光会聚到一个小面积上。

3 利用受激布里渊散射实现激光大气补偿传输的实验

将激光由实验室发射到 250 m 外的一幢八层楼上,激光为向上的斜程传输,角度近似为 0.1 rad。实验过程中经历了无风、大风和小雨的各种气候,大气湍流强度大约为 $C_n^2 = 10^{-15} \sim 10^{-13}$ 。实验光路如图 3 所示。

实验中用一个加有一级放大的红宝石激光器做为探测光源,在激光器前加有一个发射望远镜系统,

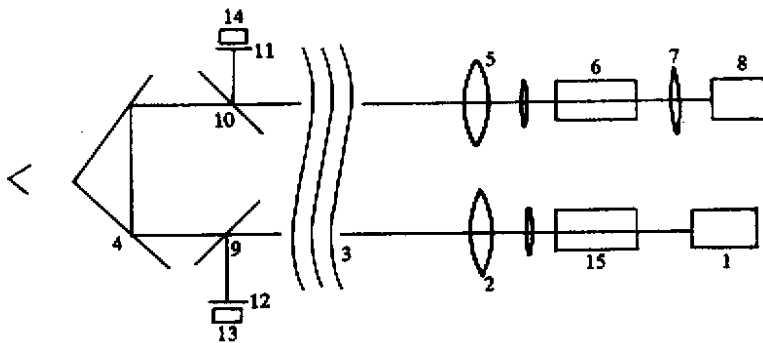


Fig. 3 Experiment of laser propagation through 250 m with SBS. 1 :ruby laser ; 2 :telescope ; 3 :atmosphere ; 4 :target ; 6 :15 :amplifier ; 7 :lens ; 8 :SBS cell ; 9 :10 :10% reflector ; 11 :12 :screen ; 13 :14 :CCD camera

由探测激光器发射出的激光能量最大达到 1J 以上,但由于光束质量很差,发射望远镜的准直性能也很低,以及大气的扰动,使到达目标的探测光发散为一大片,其口径大约为 1 m,而作为目标的两个反射镜仅将其中口径为 10 cm 的一部分光反射回相位共轭系统,返回接收孔径的光再次发散为一大片,而接收望远镜只将其中口径为 10 cm 的一部分光准直到放大器内,并最后入射到受激布里渊散射池中,因此在整个系统中,激光的损耗是非常大的,在实验中就必须使探测光很强且信标光的放大器的放大率很大。

图 4 是拍摄的信标光斑和相位共轭光斑。由于大气的扰动,信标光斑内部分布很不均匀(信标光斑规则的外形是作为目标的反射镜的口径)相对于信标光斑,相位共轭光斑只剩下原信标光斑中的一个或几个强点最强,其它部分则没有或有很弱的相位共轭光,这是由于只有信标光斑中的一个或几个强光点达到了相位共轭阈值。在这种情况下,相位共轭光斑压缩比最大,相位共轭光经过一次这样的

探测光由反射镜(图中未画出)引到室外,向距实验室 250 m 的目标发射,目标是由结构近似屋脊镜的两个反射镜组成,目标将激光反射回实验室,作为信标光,信标光被反射镜(图中未画出)反射到室内的实验台上,然后由一个接收望远镜系统准直到一个红宝石激光放大器内,被放大的信标光再经一个小透镜聚焦到受激布里渊散射池内,由受激布里渊散射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。探测光发射望远镜口径、目标口径和信标光接收望远镜的口径均为 10 cm。在实验中,发现作为指示光的 He-Ne 激光传输到目标上时,大气扰动使光斑如火焰般地晃动、旋转,晃动的速度与大气扰动强度有关。

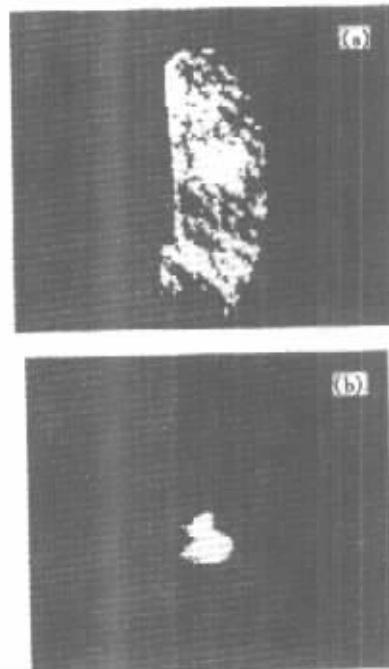


Fig. 4 Beacon light (a) and phase conjugated light (b) distribution in the experiment

相位共轭过程就会聚到了一个小面积上。但这时的相位共轭光的强度较小,要把大能量的激光会聚到这个面积上,还必须以这个小面积的相位共轭光斑为信标光斑,进行进一步的相位共轭,最终将大能量会聚到这个面积上,以达到提高激光能量密度的目的。

在图 5 中可以看到,相位共轭光的绝大部分能量都集中在几个强的尖峰上,除此之外,相位共轭光的光强分布还较信标光更为尖锐,这是由于在受激布里渊散射过程中,相位共轭反射镜(PCM)对弱信标光的相位共轭反射率小于对强信标光的反射率,这就使得返回原信标光强的地方的相位共轭光更强,到达弱信标光的地方的光更弱,这不仅使每一个相位共轭光的尖峰更为尖锐,也使相位共轭光中的弱峰与强峰的差距更大,这样,如果经过多次的相位共轭过程,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标光斑有很大的缩小。当然,从原理上讲,如果目标上的信标光斑的光强分布是完全均匀的,上述的相位共轭光斑面积缩小的现象是不会出现的。实际上,由于发射孔径对探测光的衍射,即使在无大气扰动或弱大气扰动的情况下,到达目标的探测光分布也将是高斯分布的,这时,相位共轭光将被会聚到中心最强的一个小光斑上,在有大气扰动的情况下(尤其是在较强扰动和远距离传输的情况下),到达目标的探测光将变成许多个小的激光散斑,每个散斑的面积都近似为发射孔径的衍射极限,各个散斑的强度都不同,其中具有很强光强的散斑是很少的,因此相位共轭光最后将返回到这几个强散斑上。

实验中在目标处测得信标光和相位共轭光的能量均为 20mJ,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,这证明了利用受激布里渊散射的阈值效应提高目标上的能量密度的效果。

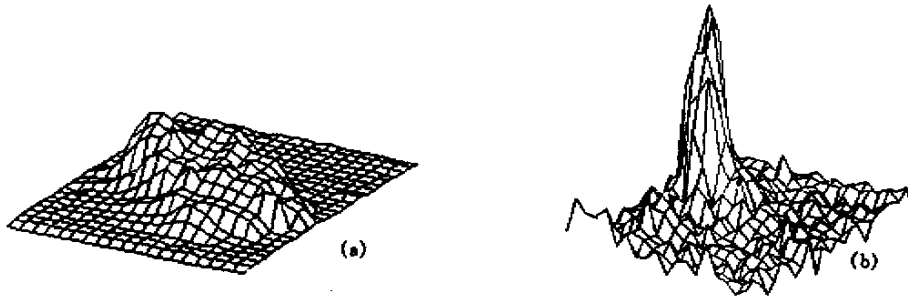


Fig. 5 Beacon light (a) and phase conjugated light (b) distribution in the experiment

参 考 文 献

结论 本文通过对受激布里渊散射补偿激光大气传输过程的模拟计算和实验研究,得到了受激布里渊散射的阈值效应使返回目标的相位共轭光斑的面积相对于原信标光斑缩小的结论,利用这一现象可以使相位共轭光经过几次相位共轭过程逐渐会聚到目标上。其中激光补偿传输距离最远达到 250 m。实验结果证实了利用受激布里渊散射实现激光大气补偿传输的有效性和利用阈值效应在目标上主动获得小面积信标的方法。在实际的应用中,可以在相位共轭系统中加入多级放大器,使强大的相位共轭光集中到目标上的一个小区域上,使目标上的激光能量密度达到极大。

- [1] Wang V, Giuliano C R. Correction of phase aberration via stimulated brillouin scattering. *Opt. Lett.*, 1978, **2**(1): 4 ~ 6
- [2] Lind R C, Dunning G J. Real-time compensation of atmospheric turbulence by nonlinear phase conjugation demonstrated. *Laser Focus*, 1983, **19**(9): 14 ~ 15
- [3] Lebow S, Ackerman J R. Phase conjugation through brillouin-enhanced four-wave mixing over an extended atmospheric path. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(4): 236 ~ 238
- [4] Bruesselbach H, Jones D C, Rockwell D A *et al.*. Real-time atmospheric compensation by stimulated brillouin-scattering phase conjugation. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1995, **12**(8): 1434 ~ 1447
- [5] Cha R, Kamefsky M, Falk J. Transient phase conjugation by stimulated brillouin scattering: Numerical analysis of zero-order solutions. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1994, **11**(2): 331 ~ 338

Laser Propagation in Atmosphere with Stimulated Brillouin Scattering

Wang Yuezhu Ju Youlun Yao Baoquan Yu Xin Liu Qiang Ma Zuguang

(*National Key Laboratory of Tunable laser Technology , Harbin Institute of Technology , Harbin 150001*)

(Received 20 September 2000 ; revised 20 November 2000)

Abstract : The method to realize a beacon of small area on an uncooperative and extended target by using stimulated Brillouin scattering (SBS) threshold effect is presented. The process of laser propagation through 10km atmospheric path with SBS is simulated in cases of different atmospheric turbulence($C_n^2 = 10^{-16} \sim 10^{-12}$). The distribution of the phase-conjugate-light on the target was obtained from the simulation. The experiments of laser propagation with SBS are made in cases of different environments. The maximum distance is 250 m. The results indicate the laser propagation with SBS effect and the method to realize the beacon of small area on the target are feasible.

Key words : optical phase conjugation ; stimulated Brillouin-scattering ; laser propagation in the atmosphere