

文章编号: 1001-3806(2002)05-0382-03

SBS 相位共轭技术在激光大气传输中的应用

于 欣 鞠有伦 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, 哈尔滨, 150001)

摘要: 评述了受激布里渊散射相位共轭技术在激光大气传输中的应用, 重点分析了在激光大气传输过程中利用受激布里渊散射阈值效应可以在目标上主动获得小面积信标光斑的方法及利用 SBS 相位共轭实现激光大气传输的闭环过程, 指出其发展前景。

关键词: 受激布里渊散射(SBS); 相位共轭; 阈值; 信标

中图分类号: O433.5 文献标识码: A

Application of SBS phase conjugation technology of laser propagation in the atmosphere

Yu Xin, Ju Youlun, Wang Yuezhu, Chen Deying, Wang Qi, Du Xiaojun, Ma Zuguang

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

Abstract: The applications of SBS phase conjugation technology of laser propagation in the atmosphere are reviewed in this paper. The method of realizing the beacon of small area on the target actively with SBS threshold effect in the process of laser propagation in the atmosphere, as well as the close loop process of realizing laser propagation in the atmosphere with SBS phase conjugation are analyzed and its development prospect is introduced.

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

引 言

随着光电子技术的迅速发展, 激光技术已成为现代高技术领域的重要组成部分, 在国防和民用各方面得到了广泛应用。对于激光在远距离通讯、信息处理、遥感和遥测等领域的应用, 均要涉及激光在大气中的传输。在实际的激光大气传输过程中由于存在着大气湍流、热晕及各种线性、非线性效应对激光传输的影响, 使得激光能量损耗、相干性下降、传输方向扭曲, 从而严重地影响了激光的传输效果。因此, 在激光大气传输中需要解决的关键问题之一就是在掌握激光大气传输规律的基础上, 研究实用而有效地减少或回避大气对激光传输影响的方法。研究证明, 利用光学相位共轭技术可以补偿大气湍流、热晕等因素给激光传输造成的波前畸变, 使得激光大气传输更具有实用价值。目前, 利用光学相位共轭技术实现激光大气传输主要有两种方法: 自适

应光学技术和非线性光学技术^[1-8]。在非线性光学技术中 SBS 相位共轭技术由于其具有的诸多有益特性而被广泛研究和运用。作者评述了受激布里渊散射相位共轭技术在激光大气传输中的应用状况, 着重分析了在激光大气传输过程中利用 SBS 阈值效应可以在目标上主动获得小面积信标光斑的方法及利用 SBS 相位共轭实现激光大气传输的闭环过程。并与自适应光学相位共轭技术进行了比较, 指出期待解决的问题和发展前景。

1 利用 SBS 相位共轭实现激光在大气传输中的补偿闭环过程

Wang 在 1977 年首先提出了采用非线性光学相位共轭技术补偿激光在大气传输过程中波前畸变的方案(见图 1)^[9]。激光传输的过程分为如下几个步骤: (1) 由系统的探测激光器经大气向目标发射一束探测光; (2) 探测激光被目标反射; (3) 目标的反射光穿过大气返回系统的接收/发射孔径, 这束光由于携带了目标与系统间的大气信息而被称为信标光, 目标上的反射区域称为信标; (4) 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)

作者简介: 于 欣, 女, 1968 年出生。博士研究生。现从事非线性光学技术及其应用研究。

收稿日期: 2001-10-29; 收到修改稿日期: 2002-01-30

对接收到的信标光进行放大和相位共轭, 相位共轭光再由系统发射出去; (5) 由系统的接收/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。在这一过程中, 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。在激光大气传输的实际应用中, 相位共轭光返回到目标上, 就达到了目的。而对于一个完整的相位共轭闭环过程, 还应该包括以下两个步骤: (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探测激光器。

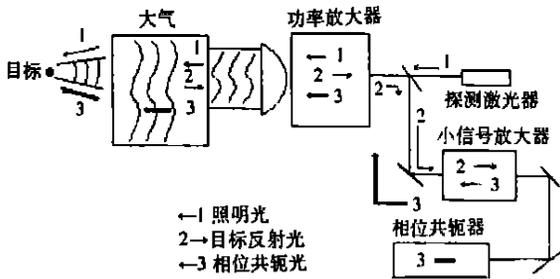


图 1 用主动信标光方法实现相位共轭补偿激光传输的原理图

目前, 能用于激光大气传输的非线性光学相位共轭技术主要有受激布里渊散射、四波混频(FWM)和布里渊增强四波混频(BEFWM)等。对于后两种方法, 由于在泵浦光与探测光之间存在严格由目标距离决定的延时及复杂的光学系统, 对于实际应用则带来不便。利用 SBS 实现相位共轭相对于其它的非线性光学技术具有结构简单和自泵浦的优点。实现 SBS 只需要透镜和盛装散射介质的池子, 相对于四波混频等较复杂的光路设置, 既简单, 又提高了系统的稳定性。

在第 1 个报道完全用 SBS 实现激光在大气中补偿传输的实验中(见图 2), 用倍频 YAG 激光器向 6km 远的目标(3cm 孔径的“猫眼”反射器)发射一束有喇曼频移的探测光, 再由目标反射回的弱信标光入射到系统中(接收孔径为 10cm)被成像到两级喇曼放大池内, 喇曼散射的泵浦光是由与探测光源共用的种子激光器注入的一台 YAG 倍频激光器提供的(两台 YAG 倍频激光器均采用了 SBS 提高光束质量), 信标光在两级喇曼池中的增益达到 $10^{8.5}$ (85dB), 到达 SBS 池(装有 $TiCl_4$ 的波导池)前的信标光能量为 10mJ, 由 SBS 产生的相位共轭光经信标光传输的路径原路返回目标。在大气折射率结构常数 C_n^2 为 10^{-16} 到 10^{-13} 的范围内, 均实现了激光在大气中的补偿传输^[3]。目前, 利用非线性光学效应

(尤其是 SBS) 补偿激光大气传输中的波前畸变的研究已从实验室的原理性实验逐渐走向工程化实验阶段, 这证明了这一方法的有效性和实用价值。

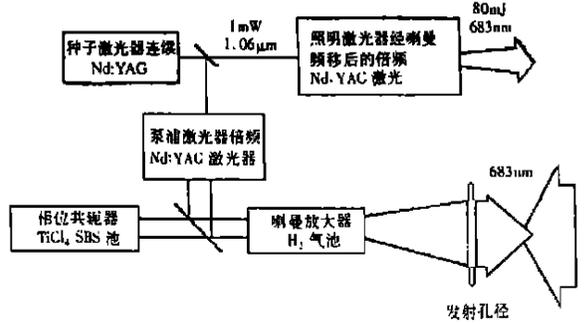


图 2 用 SBS 实现激光在大气中补偿传输的实验装置图

2 利用 SBS 阈值效应实现小面积信标

在利用光学相位共轭技术实现激光在大气中的补偿传输的过程中, 需要一束来自目标的信标光, 对于配合目标, 可以在目标上设置一个信标以向相位共轭系统发射信标光, 对无配合目标, 一般采用主动信标光的方法, 即由探测光源向目标发射一束探测光, 目标反射回相位共轭系统的光作为信标光, 由系统向目标发射的探测光在经大气传输到目标的过程中, 大气扰动使光束发散, 到达目标的探测光必然扩散为一片, 如果扩展目标的反射率均匀分布, 由目标反射的信标光斑也是这样大面积的一片, 对于一般的相位共轭过程, 相位共轭光严格地沿信标光返回目标, 这样, 返回到目标上的相位共轭光也是大面积的一片, 从而使得相位共轭过程变得毫无意义。利用 SBS 实现激光大气传输补偿中, 由于 SBS 具有阈值效应, 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并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。

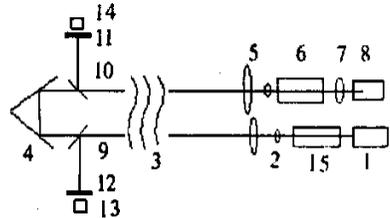


图 3 利用 SBS 实现激光大气补偿传输 250m 实验的光路图

- 1- 探测激光器 2- 探测激光发射望远镜 3- 大气 4- 目标
- 5- 相位共轭系统接收/发射望远镜 6, 15- 放大器
- 7- 透镜 8- SBS 池 9, 10- 部分反射镜 11, 12- 屏
- 13, 14- CCD 镜头

实验中采用如图 3 所示的系统结构, 完成了利用 SBS 实现激光大气补偿传输距离 250m 的实验,

大气湍流强度大约为 $C_n^2 = 10^{-15} \sim 10^{-13}$ 。

实验中,用带有发射望远镜的红宝石激光器作为探测光源,探测光向距实验室 250m 的目标(结构近似屋脊镜的两个反射镜组成)发射,目标将激光反射回实验室,作为信标光,由一个接收望远镜系统准直到红宝石激光放大器内放大,再经透镜聚焦到 SBS 池内,产生的相位共轭光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、目标和信标光接收望远镜的口径均为 10cm)。图 4 为实验中测得的信标光(左)和相位共轭光(右)的光强分布,其中相位共轭光的光强分布较信标光更为尖锐,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相位共轭光更弱,这不仅使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,而使能量主要集中在到最强的峰上^[10~11]。

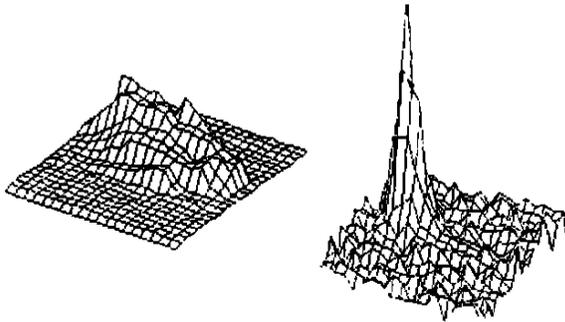


图 4 250m 实验的信标光(左)和相位共轭光(右)的光强分布

3 SBS 和自适应光学相位共轭技术在激光大气传输中的比较

实现激光大气补偿传输所采用的相位共轭技术主要有两种方法:自适应光学技术和非线性光学效应。

一个典型的自适应光学系统包括波前传感器、变形镜及其控制系统和主激光器。它的原理是先由波前传感器探测来自目标信标光的波前分布,再由控制系统将变形镜的反射面调整到与信标光波前相位共轭的样子,这样由变形镜反射出去的主激光就成为与信标光相位共轭的光,当相位共轭光沿信标光传输来的路途原路返回到达目标上时,大气湍流给激光传输带来的相位畸变得到了补偿^[12]。

利用以 SBS 为代表的非线性相位共轭效应,也可以产生信标光的相位共轭光。它相对于传统的自

适应光学技术具有诸多的优点:(1)不需要自适应光学系统中所必需的变形控制系统,而只需要几个极简单的光学元件(对于 SBS,只需一个透镜和一个盛布里渊散射介质的池子),系统大为简化,降低了成本,提高了可靠性;(2)不需要自适应光学系统所需要的波前探测装置,不仅使系统简化,还完全消除了由波前探测及各种算法和控制带来的误差,使相位共轭精度得到很大的提高;(3)可以对信标光进行全视场的相位共轭,而不象自适应光学过程那样,将信标光的波前分为若干单元,分别进行部分相位共轭,不仅补偿了波前畸变的低频部分,也可补偿高频畸变;(4)实现相位共轭的非线性光学效应是自动完成的,反应时间为纳秒量级,而自适应光学系统中由于有非常复杂的计算和控制过程,其反应速度较慢(毫秒量级),因为由相位共轭光补偿信标光波前畸变的时间必须小于由大气中湍流等引起波前畸变的效应的弛豫时间(约为毫秒量级),这样,在相位共轭光的补偿波前畸变的过程中,大气才能被视为稳态,畸变才能被补偿;(5)可以对目标进行自动寻的和自动跟踪。基于上述特点可知,非线性光学相位共轭相互作用的“全光学”性质可省去传统采用的笨重、昂贵和有时是慢响应的电机部件,因此,是一种理想的补偿激光传输中波前畸变的方法。

4 结束语

激光在大气中的传输需要解决两个关键技术:研制出具有足够能量和光束质量优异的高能激光器;研制出光束定向器。SBS 由于具有相位共轭等特性,因此在改善激光器的光束质量方面,还是补偿大气对激光束造成的波前畸变以实现远程传输方面,都具有重要的应用价值。

要使 SBS 有效地应用于实际的激光大气传输这一激光应用工程中,SBS 还需要满足以下要求:(1)具有高的击穿阈值;(2)具有高的反射率和高的放大率;(3)具有低的相位共轭阈值和高的相位共轭效率。因此,无论是对 SBS 特性的进一步研究和对高效 SBS 介质的寻求以及解决激光大气传输中波前畸变补偿的非点光源回波问题等环节上还需要深入的研究和认识。

参 考 文 献

- [1] Digumarthi R V. 强激光技术进展, 1996, 6(6): 28~ 35.
- [2] Lebow S, Ackerman J R. Opt Lett, 1989, 14: 236~ 238.

(下转第 387 页)

Bragg 光栅的应变响应, 数据拟合后的应变灵敏系数和相关系数如表 1 所示, 其中 1 号光纤光栅加载和卸载过程中 Bragg 中心反射波长与应变的关系曲线如图 3 所示。从表 1 和图 3 知, 封装后的光纤光栅传感器应变响应呈良好的线性, 应变灵敏系数平均为 $1.19\text{pm}/\mu\text{E}$, 性能稳定, 可以粘贴于结构的表面, 进行应变的测量。

Table 1 Sensitivity and correlation coefficient of FBG strain sensor with jacket

coefficient	FBG				
	1	2	3	4	5
sensitivity/ $(\text{pm}\cdot\mu\text{E}^{-1})$	1.18	1.2	1.2	1.19	1.18
correlation coefficient	0.9996	0.9998	0.9998	0.9999	0.9991

3 光纤光栅应变传感器的温度补偿

由于光纤 Bragg 光栅对应变与温度交叉敏感, 即温度和应变的变化都可以导致 Bragg 中心波长的漂移, 为了准确测量应变, 必须从总的波长漂移量中解耦温度项, 即采取温度补偿措施。采取水浴加热的方法, 测量封装 1 号和 3 号光纤光栅应变传感器的温度响应, 实验曲线如图 4 所示, 拟合后得温度灵敏系数分别为 $0.02846\text{nm}/^\circ\text{C}$ 和 $0.02921\text{nm}/^\circ\text{C}$, 相对于裸光纤光栅的温度灵敏系数 $0.01\text{nm}/^\circ\text{C}$, 热膨胀系数较大的不锈钢管使传感器对温度的响应更敏感。

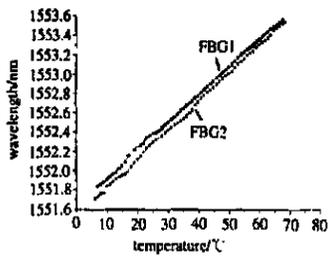


Fig. 4 Temperature sensitivity of FBG with jacket

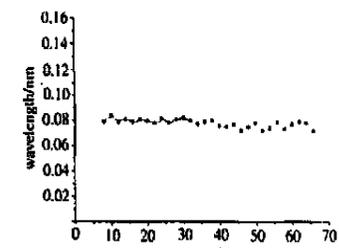


Fig. 5 Relative wavelength shift of two FBG sensors

为了解决光纤 Bragg 光栅传感器的温度与应变交叉敏感问题, 人们提出了双光栅叠加、设置参考光栅、采用啁啾光栅等多种温度补偿方法。所述的测量系

统中, 波长探测系统 FBG-IS 能够同时解调 32 路光信号, 所以, 设置参考光栅是最为简便的温度补偿措施。参考光栅法是在测量光栅上串联另一个作为参考的光纤光栅, 测量光栅粘贴在结构的表面或埋于材料的内部, 参考光栅则处于自由状态, 测量光栅和参考光栅对环境温度的变化具有相同的响应, 所以, 两者之间的波长相对移动(二者差值)只与测量光栅所受应变有关, 与环境温度变化无关, 由此实现温度补偿。采取水浴加热的方法, 使两只串联的封装光纤 Bragg 光栅应变传感器处于相同的温度场中, 在 $8^\circ\text{C}\sim 66^\circ\text{C}$ 范围内, 两个传感器之间的 Bragg 波长相对移动如图 5 所示, 温度变化时, 两个光纤光栅的 Bragg 波长相对移动只有微小波动, 进行应变测量时, 可以忽略。

4 结论

写于单模通讯光纤上的 Bragg 光栅质地脆弱, 易折断, 欲作为传感器在工程中得到实际应用, 必须采取有效的封装方法。采用不锈钢管对光纤 Bragg 光栅进行封装, 封装后的光纤 Bragg 光栅应变传感器的应变灵敏系数为 $1.19\text{pm}/\mu\text{E}$, 能够快速响应应变的变化, 线性度高, 迟滞误差小, 粘贴于构件表面进行应变测量时, 可以设置另一封装的参考光纤光栅作为温度补偿措施。封装后的光纤 Bragg 光栅传感器便于操作和安装, 适于实际工程中的应用, 封装过程中应注意保持工艺的稳定性, 以保证传感器性能的稳定。

参 考 文 献

- [1] Grattan K T V, Sun T. *Sensors & Actuators*, 2000, 82 (1): 40~61.
- [2] Udd E, Nekon D, Lawrence C *et al.* *Proc SPIE*, 1996, 2718: 104~109.
- [3] Hill K O, Malo B, Bilodeau F *et al.* *A P L*, 1993, 62 (10): 1035~1037.
- [4] Lemaire P J, Atkins R M, Mizrahi V *et al.* *Electron Lett*, 1993, 29 (13): 1191~1194.
- [5] 刘云启, 郭运转, 刘志国 *et al.* *中国激光*, 2000, A27(3): 211~214.
- [6] Wang Y, Tjin S C, Hao J Z *et al.* *Proc SPIE*, 2000, 4073: 297~304.
- [7] Fried D L. *J O S A*, 1982, 72: 52~61.
- [8] Lind R C, Dunning G J. *Laser Focus*, 1983, 19(9): 14.
- [9] 宋正方, 魏合理. *强激光技术进展*, 1996, 6(6): 23~28.
- [10] 王月珠, 杜晓军, 马祖光. *中国激光*, 1998, A25(4): 328.
- [11] 鞠有伦, 杜晓军, 王月珠. *自然科学进展*, 1999(5): 443~447.
- [12] 王乃彦. *新兴的强激光*. 北京: 原子能出版社, 1992. ~470.

(上接第 384 页)

- [3] Bruesselbach H, Jones D C, Rockwell D A *et al.* *J O S A*, 1995, B12(8): 1434~1447.
- [4] Troxel S E, Welsh B M. *J O S A*, 1995, A12(3): 570~577.
- [5] 王世杰译. *强激光技术进展*, 1996, 6(6): 38~41.
- [6] Wang X Ch, Zhou D W, Zhang Y M. *Chin J Phys*, 1989, 38: 466