

基于随机并行梯度下降算法的多波长激光相干合成*

王小林[†] 周 朴 马阎星 马浩统 许晓军 刘泽金 赵伊君

(国防科学技术大学光电科学与工程学院,长沙 410073)

(2009 年 10 月 23 日收到;2009 年 11 月 12 日收到修改稿)

由于受到受激布里渊散射(SBS)等非线性效应的限制,单频激光放大器的功率在百瓦量级,以非单频激光多波长激光作为种子源能够有效地抑制 SBS 并提高放大器功率.与单频激光相干合成相比,非单频率、多波长激光的相干合成有望将输出激光功率成量级地提高.基于随机并行梯度下降(stochastic parallel gradient descent, SPGD)算法,实现了四波长激光的相干合成.在系统闭环时,四路多波长激光合成后的主瓣能量能够提高 3 倍,达到理想值的 75%.验证了多波长、非单频激光相干合成的可行性,为高功率相干合成的发展提供了新的途径.

关键词: 光纤激光, 相干合成, 多波长, 非单频激光

PACC: 4225K, 4255N, 4290

1. 引 言

随着双包层光纤的制作工艺和包层泵浦技术的发展,目前单根连续波单模光纤激光器输出功率已经突破 10 kW 量级^[1].由于受到热效应、非线性效应等因素的限制,单根光纤的输出功率受限于其损伤阈值,同时随着输出功率的增加,输出激光的光束质量也随之变差^[2].相干合成作为提高输出功率的有效手段,能够同时保证光束质量^[3],受到人们的广泛关注.近年来,光纤激光相干合成技术在国内外都得到了广泛的研究^[4-17].在主动相位控制光纤激光相干合成中,普遍认为单频窄线宽激光器/放大器是必须的^[18],当前报道的主动相位控制光纤激光相干合成都是基于单频窄线宽光纤激光器/放大器的^[8-12].由于受到非线性效应,尤其是受激布里渊散射(stimulated brillouin scattering, SBS)的严重制约,目前单频光纤放大器输出功率限制在百瓦量级;而多个波长、非单频激光能够抑制光纤放大器的 SBS 等非线性效应^[19-21],从而提高光纤放大器的输出功率.考虑到目前单根连续波单模非单频光纤激光器输出功率已达到 10 kW 量级.如果能够非单频、多波长激光实现相干合成,那么相干合成的输出功率将有望成量级地提高.本文利用

SPGD 算法,对 4 波长(两个单频激光,两个非单频宽激光)光纤激光进行了主动相位控制的相干合成.实验结果表明,在 4 路 4 波长激光相干合成中,闭环时主瓣能量比开环时能量提高了 3 倍,达到理想值的 75%.实验结果有效地验证了基于主动相位控制的非单频、多波长光纤激光相干合成的可行性,为获得高功率相干合成输出提供了有效的技术途径.

2. 实验装置与原理

实验装置如图 1 所示,将四台不同波长的光纤激光器(L1, L2, L3, L4)输出激光利用四合一宽带光纤耦合器(C1)耦合到宽带放大器(AMP)中,放大器输出激光通过一分四宽带分束器(C2)分为 4 束,各束光分别经过 LiNbO₃ 相位调制后准直输出,准直输出激光通过透镜 L 后被分光镜(BS)分为两束,一束利用红外相机(electronphysics microviewer 7290 A)观察远场光斑,另一束经过小孔后进入光电探测器(PDA36A-EC, thorlabs),光电探测器获取合成主瓣能量作为性能评价函数.基于 DSP 处理器的算法控制器利用 SPGD 算法进行相干合成的锁相控制^[12].实验中,激光器 L1, L2 为实验室自己搭建的非单频激光器, L1 的中心波长 1063.8 nm, L2 中心波长

* 国防科技大学优秀研究生创新项目(批准号: B080702)资助的课题.

[†] E-mail: wxllin@nudt.edu.cn.

1064.2 nm, 二者的 3 dB 谱宽都小于 0.1 nm; L3 为商用的单纵模光纤耦合固体 (Nd:YAG) 激光器, 其中心波长 1064.5 nm; L4 为 Keospsys 公司的 DFB 单频光纤激光器 (KPS-BT2-SLM-YFL-1083-001-PM), 中心波长 1083.2 nm, 线宽小于 25 kHz. 放大器利用

Keospsys 公司的宽谱 (增益线宽 1060—1085 nm) 放大器, 其最大输出功率 200 mW; 实验中通过调节各个激光器和放大器抽运电流, 保证各波长激光输出光强相等; 通过光纤熔接、跳线连接等方式对各路激光的光程进行较为精确地控制.

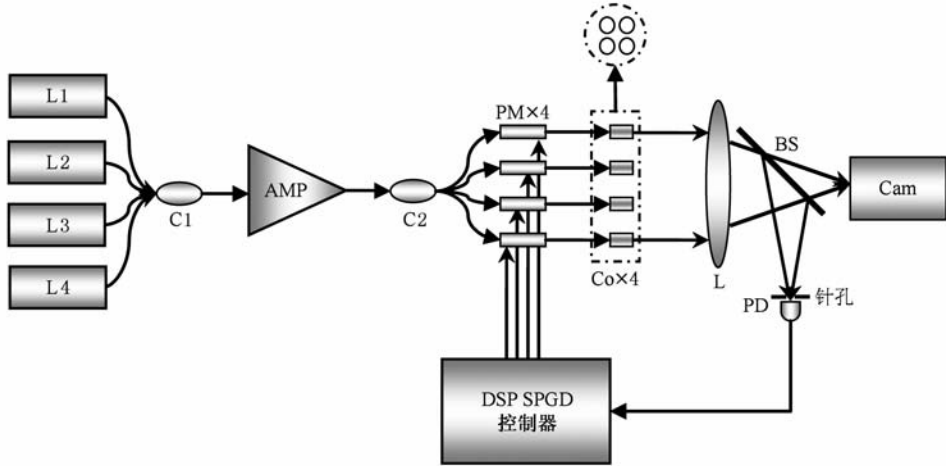


图 1 4 波长激光相干合成实验原理图

实验中测试了准直器输出的激光光谱, 如图 1 所示为与激光器 L1, L2, L3 对应的的光谱, 及四台激

光器对应的的光谱. 测试结果表明, 在各路激光中, 各个波长激光功率大致相等.

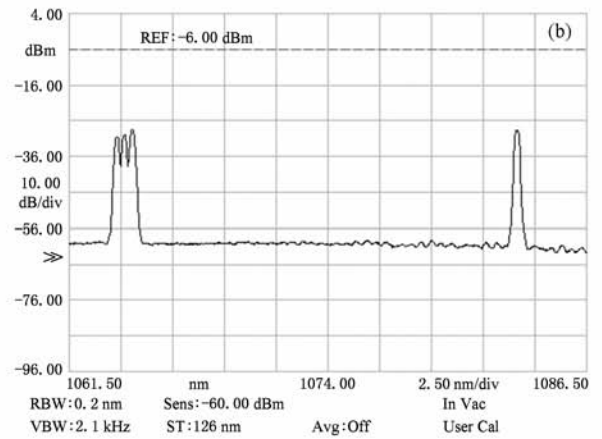
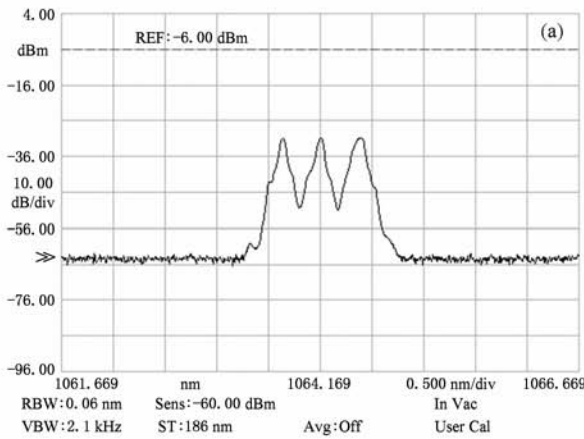


图 2 光纤放大器输出激光光谱 (a) 激光器 L1, L2, L3 对应的放大光谱; (b) 激光器 L1-L4 对应的放大光谱

实验中, 利用 SPGD 算法进行相干合成的锁相控制^[10-12], 算法的具体实现过程如下:

- 1) SPGD 控制器对相位调制器施加初始扰动电压, 取得当前系统评价函数 J .
- 2) SPGD 控制器生成随机扰动向量 $\delta u = \{\delta u_1, \delta u_2, \dots, \delta u_n\}$, 各个 δu_i 相互独立且同为伯努利分布, 各分量幅值相等, 取正负值的概率均为 50%.
- 3) 将生成的随机扰动向量转换为电压信号 δu 施加到各个相位调制器上, 取得评价函数的值 $J^+ =$

$J(u + \delta u)$, 然后施加反相的扰动电压 $-\delta u$, 取得负向扰动的的评价函数 $J^- = J(u - \delta u)$.

- 4) 计算评价函数的变化量 $\delta J = (J^+ - J^-)/2$,
- 5) 根据式 $u^{(k+1)} = u^{(k)} + \gamma \delta u^{(k)} \delta J^{(k)}$ (其中 k 为迭代次数), 更新控制参数.

重复步骤 2 到 5, 直至评价函数 J 取全局极大值, 相干合成效果达到最优. 在步骤 3 中进行了正负两次扰动, 即为双边扰动 SPGD 算法.

根据 SPGD 算法原理, 对相位调制器施加相应

的控制信号,使得各路激光相位相互锁定,就能实现稳定相干合成.

3. 实验结果分析

实验中,利用课题组开发的基于 DSP 处理器的算法控制器执行 SPGD 算法,进行相干合成的锁相控制,实现了四路激光的相干合成.相干合成的效

果分别利用性能评价函数(探测器探测到的干涉图样主瓣能量)和远场干涉图样来表征.开环的结果如图 3 所示,其中图 3(a)为性能评价函数随着时间的演化,图 3(b)为开环时远场干涉光斑的长曝光图样.开环时,由于各路激光的相位随机变化,性能评价函数随着时间起伏较大,其均值在 0.98 V;对应的长曝光干涉图样为非相干合成的效果.

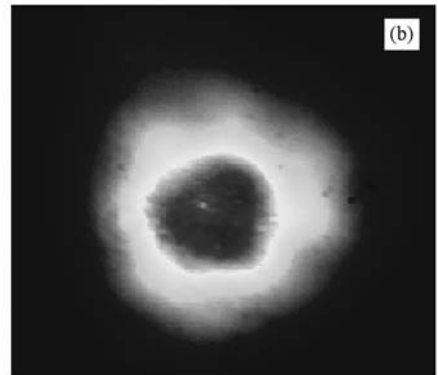
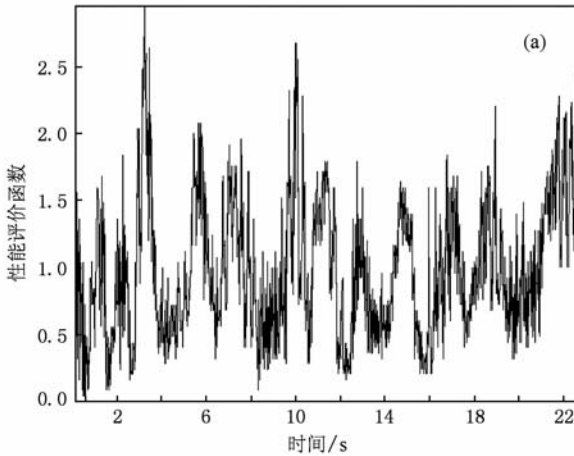


图 3 开环时实验结果 (a)性能评价函数随时间变化曲线;(b)远场长曝光图样

系统闭环时的实验结果如图 4 所示,其中图 4(a)为性能评价函数随着时间的演化,图 4(b)为闭环时远场干涉光斑的长曝光图样.闭环时,由于各路激光的相位锁定,合成主瓣位置不变,性能评价函数能够稳定在最大值附近,其均值为 2.97 V,主瓣能量提到闭环时的 3 倍,达到理想值的 75% (开

环时长曝光的结果为完全非相干叠加,主瓣能量为 $4I_0$;理想闭环锁相时为完全相干叠加,主瓣能量为 $4^2 I_0$ 倍,即闭环时主瓣能量为开环时主瓣能量的 4 倍.而实验中闭环为开环数据的 3 倍,即达到了理想值的 75%).对应的长曝光干涉图样的条纹对比度从开环时的 0 提高到了 0.7.

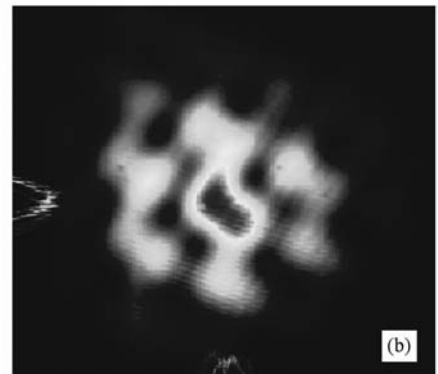
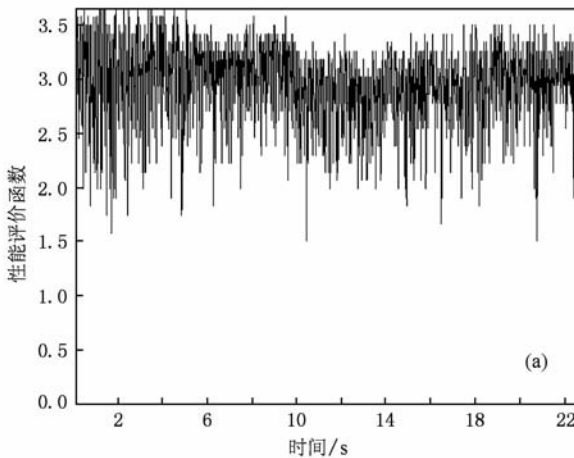


图 4 闭环时实验结果 (a)性能评价函数随时间变化曲线;(b)远场长曝光图样

图 5 为开环和闭环情形下长时间观察范围内 J 值的概率分布,由图可知,闭环时主瓣能量接近理

想相干合成主瓣能量的概率显著提高,与开环相比,SPGD 算法的执行使得主瓣能量大于理想值 70% (2.8 V) 的概率从 0 提升到了 80%.

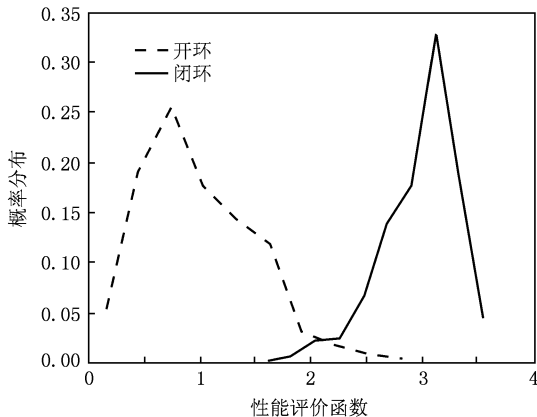


图5 性能评价函数的概率分布

需要指出的是,合成效率是按照各路光强严格相等计算的,考虑到实验中各路合成光强强度不相

等,干涉图样存在较大的基底,实际上的效率要高于计算值(75%).如果保证各路光强严格相等,将能够得到接近理想的合成效果.

4. 结 论

利用 SPGD 算法,实现了 4 波长 4 路光纤激光的相干合成,验证了基于主动相位控制的多波长、非单频光纤激光相干合成的可行性.实验结果表明,系统闭环后能够将主瓣能量提高 3 倍,达到理想值的 75%.由于实验中各路合成光强强度不相等,干涉图样存在一定的基底,合成效率较低;如果保证各路光强严格相等,将能够得到接近理想的合成效果.考虑到多波长、非单频光纤激光器/放大器较单频光纤激光器/放大器有更高的输出功率,利用多波长、非单频率激光相干合成,有望将合成输出功率成量级地提高,为获得高功率输出提供了有效的技术途径.

[1] Photonics I. IPG Photonics Successfully Tests World's First 10 Kilowatt Single-Mode Production Laser.

[2] Galvanauskas A 2004 *Optics and Photonics News* **15** 42

[3] Fan T Y 2005 *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **11** 567

[4] Cheung E, Weber M, Mordaunt D 2004 *Proc. of SPIE* **98**

[5] Steven J A, Jinendra K R, Fan Y T, Sanchez A 2007 *J. Opt. Soc. Am. B* **24** 1707

[6] Li L, Schülzgen A, Li H, Temyanko V L, Moloney J V, Peyghambarian N 2007 *J. Opt. Soc. Am. B* **24** 1721

[7] He B, Lou Q, Zhou J, Zheng Y, Xue D, Dong J, Wei Y, Zhang F, Qi Y, Zhu J, Li J, Li S, Wang Z 2007 *Chin. Opt. Lett.* **5** 412

[8] Li X, Ma Y, Zhou P, Wang X, Xu X, Liu Z 2009 *Opt. Express* **17** 385

[9] Ma Y X, Liu Z J, Zhou P, Wang X L, Ma H T, Li X, Si L, Xu X J 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 44204

[10] Zhou P, Liu Z J, Wang X L, Ma Y X, Li X, Xu X J, Guo S F 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 44202

[11] Zhou P, Liu Z, Wang X, Ma Y, Ma H, Xu X 2009 *Optics and Laser Technology* **41** 853

[12] Wang X L, Ma Y X, Zhou P, Ma H T, Li X, Xu X J, Liu Z J 2009 *Laser Physics* **19** 984

[13] Xiao R, Zhou P, Hou J, Jiang Z F, L M 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 819 (in Chinese) [肖 瑞、周 朴、侯 静、姜宗福、刘明 2007 物理学报 **56** 819]

[14] Xiao R, Hou J, Jiang Z F, Liu M 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6464 (in Chinese) [肖 瑞、侯 静、姜宗福、刘 明 2006 物理学报 **55** 6464]

[15] Wang J M, Duan K L, Wang Y S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5627 (in Chinese) [王 建明、段开棕、王屹山 2008 物理学报 **57** 5627]

[16] Yang R F, Yan P, Shen F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8297 [杨若夫、杨 平、沈 峰 2009 物理学报 **58** 8297]

[17] Zhou P, Liu Z J, Ma H T, Wang X L, Xu X J, Liu Z J 2010 *Chin. Phys. B* **19** 024207

[18] Limpert J, Röser F, Klingebiel S, Schreiber T, Wirth C, Peschel T, Eberhardt R, Tünnermann A 2007 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron* **13** 537

[19] WeBels P, Ade P, Auerbach M, Wandt D, Fallnich C 2004 *Opt. Express* **12** 4443

[20] Dajani I, C Zeringue, Shay T 2009 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **15** 406

[21] Dajani I, Zeringue C, Bronder T J, Shay T, Gavrielides A, Robin C 2008 *Opt. Express* **16** 14233

Coherent beam combining of multi-wavelength lasers based on stochastic parallel gradient descent algorithm^{*}

Wang Xiao-Lin[†] Zhou Pu Ma Yan-Xing Ma Hao-Tong Xu Xiao-Jun Liu Ze-Jin Zhao Yi-Jun

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(Received 23 October 2009; revised manuscript received 12 November 2009)

Abstract

Owing to the restriction of the stimulated Brillouin scattering (SBS) and other nonlinear effects, the output power of the single frequency amplifier is at a level of about hundred watts. Multi-wavelength and non-single frequency seed laser will mitigate the SBS and improve the output power of the fiber laser amplifier. The coherent beam combining of the non-single frequency and/or multi-wavelength laser will greatly increase the total output power of the coherent beam combining as compared with the coherent beam combining of a single frequency laser. Based on the stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm, coherent combining of four channel four-wavelength lasers is realized. In the close loop state, the mean power of the main-lobe is four times higher than that of the open-loop, approaching 75% of its ideal value. The coherent combining of the multi-wavelength and non-single frequency laser is demonstrated and an approach to the high power coherent beam combining is provided.

Keywords: fiber laser, coherent beam combining, multi-wavelength, non-single frequency laser

PACC: 4225K, 4255N, 4290

^{*} Project supported by the Innovation Foundation for Graduates in National University of Defense Technology, China (Grant No. B080702).

[†] E-mail: wxllin@nudt.edu.cn.