

# 光纤激光相干合成中两种相位控制方法的比较

马阎星 司 磊 许晓军

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 主振荡功率放大器(MOPA)相干合成是实现大数量光纤激光器相干合成的一条有效途径,而相位控制是其中的关键。对 MOPA 方案的两种相位控制方法——外差探测法和多抖动法进行了比较分析。并在此基础上,提出了一种新的相位控制方法。新方法增加了相干合成的光束数目,降低了实验操作难度。通过 Matlab 软件仿真表明,采用新方法进行 64 路光束相干合成时,相位均方根误差小于  $0.08\lambda$ ,而使用多抖动法进行 30 路光束相干合成时,相位均方根误差为  $0.15\lambda$ 。

**关键词** 光纤光学;相干合成;锁相;外差探测法;多抖动法

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200828s1.0110

## Comparison of Two Phase-Locking Methods in Fiber Laser Coherent Combination

Ma Yanxing Si Lei Xu Xiaojun

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

**Abstract** Coherent combining technology is an effect method to achieve huge amounts of fiber laser coherent combination, and phase-locking is the key. Two phase-locking methods, heterodyne detection and multi-dithering technique, for master oscillator power amplifier (MOPA) are compared, and a new phase-locking method is proposed based on multi-dithering phase-locked method. This method enlarges the number of optical beams and makes the experiment easier. Through simulation by Matlab software, we find that the root-mean-square (RMS) phase error of 64 beams combination is less than  $0.08\lambda$  with the new method, while the RMS phase error of 30 beams combination is  $0.15\lambda$  with the multi-dithering technique.

**Key words** fiber optics; coherent combining; phase-locked; heterodyne detection; multi-dithering technique

## 1 引 言

光纤激光器阵列的相干合成技术是当今光电子技术领域中一个炙手可热的研究课题,先后提出了多种相干合成方案,主要包括主振荡功率放大器(MOPA)技术<sup>[1]</sup>、多芯双包层光纤技术<sup>[2,3]</sup>、全光纤自组织技术、外腔耦合技术<sup>[4]</sup>等,但当参与相干合成的光束数目增加到一定程度时,最佳合成方案当属主振荡功率放大器方案。2003年,美国 Northrop Grumman 公司的研究人员采用主振荡功率放大器方案实现了四路光纤放大器的相干合成输出<sup>[5,6]</sup>,该次实验中使用了外差探测法对各路光束的相位进行调节。2004年,美国空军研究实验室对 MOPA

方案的相位控制系统进行了改进<sup>[7]</sup>,提出了使用多抖动法实现 MOPA 方案的新技术,与外差探测法相比,该方法只需要一个光电探测器(PD),而且不需要参考光束。这些实验都是在参与相干合成的光束数目较少的情况下进行的,随着光束数目的增加,这些方案都会暴露出一些问题。

## 2 两种相位控制方法的比较

### 2.1 外差探测法

该方法原理如图 1 所示,主振荡器(MO)输出的激光被分为五路,其中四路参与相干合成,经光纤放大器进行放大,另外一路经过频移和扩束后作为

**作者简介:** 马阎星(1985—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光相干合成方面的研究。E-mail: xm\_wisdom@163.com

**导师简介:** 司 磊(1971—),男,副教授,硕士生导师,主要从事薄膜光学、激光光学和高能激光光束控制技术等方面的研究。E-mail: leis@nudt.edu.cn

参考光。然后利用外差探测法检测各光纤放大器的输出光与参考光的相位差,将之作为相位补偿信号反馈给相位控制器——钕酸锂晶体,形成闭环控制,

达到锁相的目的。使用该方法,已获得了 470 W 的相干合成输出功率,其中每一路光纤放大器的输出功率为 161 W<sup>[5,6]</sup>。

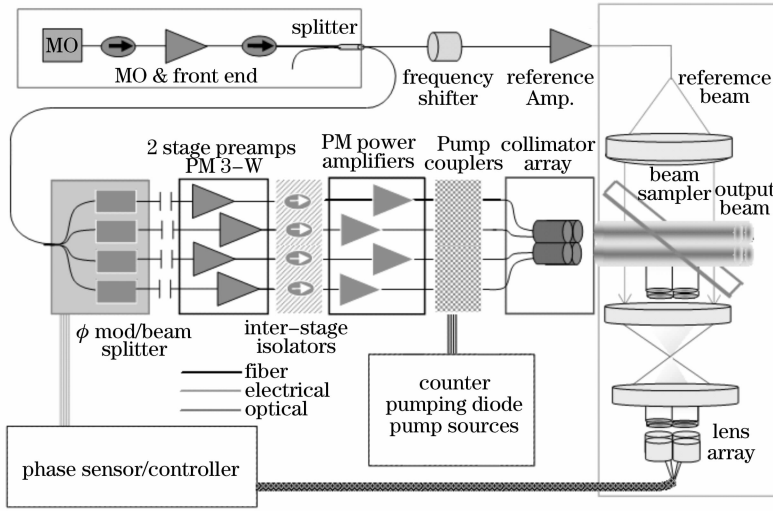


图 1 外差探测法相位控制原理图

Fig.1 Schematic for phase control with heterodyne detection technique

从理论上讲,只要参考光束的功率和光束直径足够大,该方法对参与相干合成的光束数目没有限制。系统中每一路光束的相位控制部分完全相同,而且实现该部分功能的电路主要是滤波电路和放大电路,制作比较容易。但是由于外差探测法要求每一路参与合成的光束都要与参考光束进行合成,并用一个单独的探测器对合成结果进行检测,因此随着参与相干合成光束数目的增加,参考光束的功率和光束直径需要不断增加,并且对光纤放大器阵列准直输出系统和探测器的排列精度的要求也越来越高。可见,随着参与相干合成光束数目的增加,外差探测法的实用性越来越小。

2.2、多抖动法

该方法原理如图 2 所示,种子光源 (Master Oscillator) 输出激光被分为 8 路分别进行不同频率的射频调相 (PM), 然后进行放大。在每路光束中分出一部分进行合成,并用一个光电探测器检测合成结果。通过电学相关检测的方法从探测器输出的电流中分离出每路光的相位误差,作为相位控制信号反馈给相位控制器,形成闭环控制,实现相位锁定。使用该方法, M. Shay 等<sup>[7-9]</sup> 实现了 9 路光束的相干合成,其合成后光束的相位均方根误差小于  $\lambda/20$ 。

与外差探测法相比,该方法只需要一个光电探测器,从而大大降低了光纤放大器阵列准直输出系统的排列要求,且不需要参考光束,因此也就不存在参考光束功率与光束直径的限制。

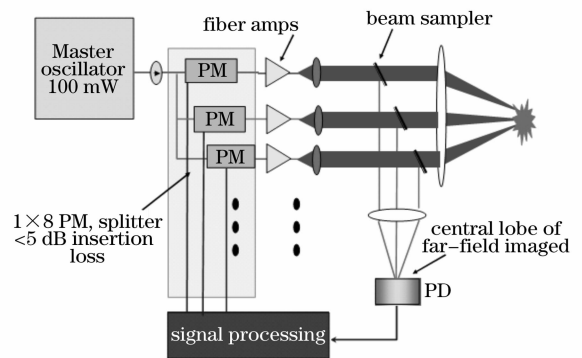


图 2 多抖动法相位控制原理图

Fig.2 Schematic for phase control with multi-dithering technique

但该方法又引入了新的问题:

1) 由于各光束的相位扰动都是随即的,于是对于一个有  $n$  路光束参与合成的系统而言,为了有效地实现相位锁定,必须使射频调制信号的频率高于单路光束相位噪声的  $n$  倍,以便相位控制部分可以及时纠正各路光束的相位误差。这样当参与合成光束的数目增加时,相位调制部分的载波频率也必须随之增加,这将给电路制作带来很大困难,甚至无法实现。

2) 光电探测器能够探测的上限光功率将成为另一个限制因素。由于光电探测器存在上限光功率,所以随着参与合成的光束数目的增加,探测器得到的每一束光的光功率必须相应减小,而通过射频调相体现在光强上的相位差信号很微弱,于是当这个信号比探测器或者信号处理电路的灵敏度小时,

系统将无法正常工作。

总之,以上两个问题最终限制了参与相干合成的光束数目的进一步增加。

### 3 改进方案

#### 3.1 方案简介

为了进一步增加参与相干合成光束的数目和降低实验难度,在多抖动法的基础上提出了改进方法。如图 3 所示,A 组光束或 B 组光束是一个利用多抖动法进行相位控制的光纤激光器阵列,可以认为阵列中各光束的相位是相同的。然后由多个这样的小

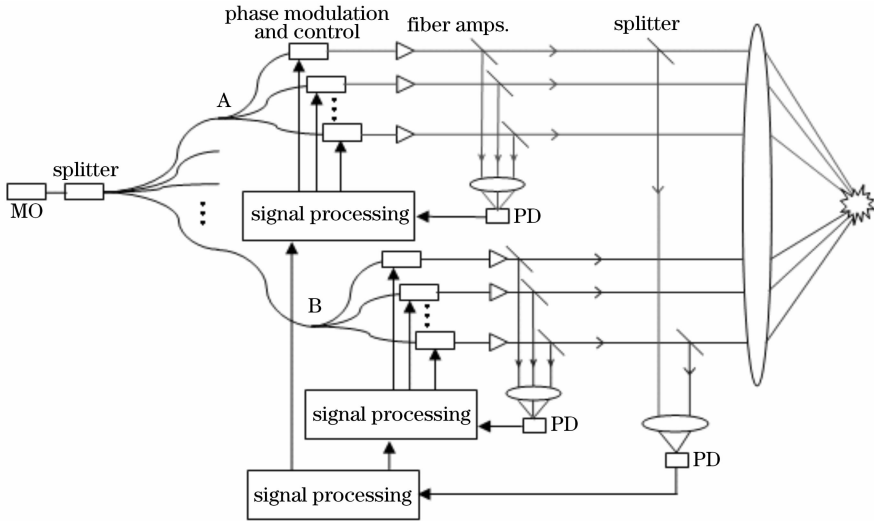


图 3 改进后的锁相方法原理图

Fig. 3 Schematic of developed phase-locking method principle

#### 3.2 仿真验证

为了验证新方案的优越性,进行了 Matlab 软件仿真。

在仿真中选取了 8 个小阵列,每个小阵列包含 8 束光,总计 64 束光。由光纤放大器引起的相位噪声通常在 1 kHz 以下<sup>[1]</sup>,在每路光束中加入 1 kHz 的随机相位噪声。仿真时间选为 5 ms,各小阵列相位射频调制载波频率设置为 20~50 MHz,每两光束间的载波频率间隔为 3 MHz,每束光的光强取为 1,相干合成后的光强按 1 的倍数表示。仿真结果如图 4 所示,纵坐标为远场光强,横坐标为时间,横线指斯特列尔比 (Strehl ratio, SR) 等于 0.9 的位置,并且计算出在仿真时间内,斯特列尔比大于 0.9 的时间占总时间的 70%,相位均方根误差小于  $0.08\lambda$ 。

为了进行对比,图 5 是采用多抖动法进行的 30 路光束的相干合成结果,其各光束相位射频调制载波频率设置为 20~120 MHz,每两光束间的频率间隔亦为 3 MHz。可见,此时的相干合成效果已经很

阵列组成一个大阵列。对于大阵列,每个小阵列可作为一个一束光处理,然后在各小阵列中分别选取一束调制频率不同的光,再按照多抖动法对它们进行相位误差检测,将测得的相位误差信号作为各小阵列光束共同的相位修正信号。这里要求组成大阵列的小阵列数目小于各小阵列内光束的数目。

这样,小阵列内的光束数目不必很多,而且所有小阵列可以采用相同的射频频带进行调制,从而缓解了单探测器方案中因光束数目增加而带来的两个问题,同时改进后的锁相方法又继承了多抖动方法实验操作容易的特点。

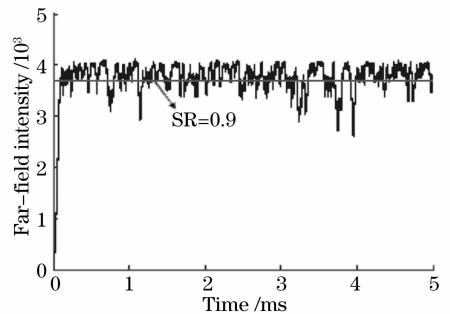


图 4 使用改进方法实现的 64 路光束相干合成的远场峰值光强随时间变化的关系

Fig. 4 Temporal evolution of far-field peak intensity of 64 beams combination with developed phase-locking method. The Strehl ratio is greater than 0.9 for only 20% of the total time, and the root mean square phase error is greater than  $0.15\lambda$ . Here, only the influence of the radio frequency modulation bandwidth is considered. If the maximum detection power of the photodetector is also considered, the synthesis effect will be even worse. It can be seen that with the increase of the number of beams participating in the coherent synthesis, the advantage of the improved method over the previous two methods becomes increasingly obvious.

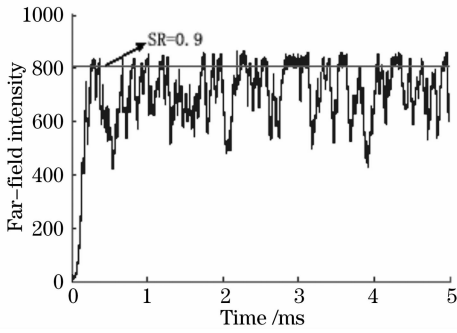


图5 使用多抖动法实现的30路光束相干合成的远场峰值光强随时间变化的关系

Fig.5 Temporal evolution of far-field peak intensity of 30 beams combination with multi-dithering method

## 4 结 论

比较了两种相位控制方法——外差探测法和多抖动法,分析了各自存在的优缺点,并提出了一种新的锁相方法。新方法增加了参与相干合成的光束数目,降低了实验操作难度,随着研究工作的进一步深入很有可能成为一种光纤激光器相干合成的实用锁相方案。

## 参 考 文 献

1 Xiao Rui . Coherent combining technology of master oscillator

- power amplifier fiber arrays[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007. 1~24, 86~89
- 肖 瑞. 主振荡功率放大器方案光纤激光相干合成技术[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007. 1~24, 86~89
- 2 Li Lijun, Fan Wande, Fu Shenggui *et al.*. Yb<sup>3+</sup>-doped double-clad fiber laser with frequency selecting by double-clad fiber Bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1): 55~58
- 李丽君, 范万德, 付圣贵 等. 双包层光纤光栅选频双包层光纤激光器[J]. *光学学报*, 2005, **25**(1): 55~58
- 3 Lou Qihong, Zhou Jun, Zhu Jianqiang *et al.*. A 440 W CW high power output with homemade Yb-doped double-clad fiber[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(2): 20
- 楼祺洪, 周 军, 朱健强 等. 国产双包层掺镱光纤实现 440 W 的连续高功率激光输出[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2): 20
- 4 He Bin, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Phase-locking and high coherent power output of two fiber lasers[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(9): 1153~1158
- 何 兵, 楼祺洪, 周 军 等. 两个光纤激光器的相位锁定及高相干功率输出[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9): 1153~1158
- 5 J. Anderegg, S. Brosnan, M. Weber *et al.*. 8-watt coherently phased 4-element fiber array[C]. *Proc. SPIE*, 2003, **4974**: 1~5
- 6 J. Anderegg, S. Brosnan, E. Cheung *et al.*. Coherently coupled high power fiber arrays[C]. *Proc. SPIE*, 2006, **6102**: 61020U-1~5
- 7 T. M. Shay, V. Benham, Lt. Justin *et al.*. Self-referenced locking of optical coherence by single-detector electronic-frequency tagging[C]. *Proc. SPIE*, 2006, **6102**: 61020V-1~5
- 8 T. M. Shay, V. Benham, J. T. Baker *et al.*. First experimental demonstration of self-synchronous phase locking of an optical array[J]. *Opt. Exp.*, 2006, **14**(11): 12015~12021
- 9 Thomas M. Shay. Theory of electronically phased coherent beam combination without a reference beam[J]. *Opt. Exp.*, 2006, **14**(11): 12188~12195