

文章编号: 1001-4322(2006)11-1779-04

两种方法实现对掺镜光纤放大器的相位校正*

侯 静, 肖 瑞, 刘泽金, 姜宗福

(国防科技大学 光电科学与工程学院, 长沙 410073)

摘 要: 在光纤激光器阵列的相干合成技术中,主振荡并联放大器(MOPA)方案最关键的技术是对光纤放大器进行相位控制与校正。本文用两种方法分别对掺镜光纤放大器进行了相位控制与校正。一种是爬山法,通过自动寻优的方式不断改变相位调制器控制电压,使系统输出保持在干涉最强处;另一种是外差法,通过实时探测和校正光路中相位的变化,确保输出光束的相位一致。实验系统中主振荡激光器的波长为 1 083 nm,输出功率 0~100 mW 连续可调。光纤相位调制器是铍酸锂相位调制器。光纤放大器输出功率 0~1 W 连续可调,整个光路为全保偏光路。爬山法系统的工作频率为 100 kHz,控制精度为 $\lambda/10$;外差法系统的移频量为 40 MHz,精度优于 $\lambda/20$ 。在两类闭环控制过程中,铍酸锂相位控制器都很好地实现了光纤放大器的相位校正。该工作为实现光纤激光器阵列的相干合成打下实验基础。

关键词: 光纤激光器阵列; 相干合成; 相位探测与校正; 光纤放大器; 主振荡并联放大器方案

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A

光纤激光器是当今光电子技术研究领域中最前沿的研究课题。作为一种新型固体激光器件,它具有转换效率高、激光阈值低、可调谐范围宽、光束质量好等优点,并且散热面积大、体积小、寿命长,同常规的气体激光器和固体激光器相比,有显著优势,已成为激光在民用和军事应用中的重要候选者。现在单根的输出功率可以达到 kW 量级,更大幅度地提高单根光纤激光器的输出功率相当困难。为达到高的激光输出功率和近衍射极限的光束质量,可能采用的技术途径是利用光纤激光器阵列,对输出激光束进行相干合成。研究光纤激光的相干合成技术,以获得高功率的相干激光输出,是今后发展的一个重要方向。光纤激光器的相干合成作为一个非常活跃的研究领域,正日益引起国内外研究人员的关注和重视,并开展了大量的理论和实验研究工作^[1-4],如多芯双包层光纤、光栅外腔式耦合、输出端直接耦合、外腔式耦合以及主振荡并联放大器(MOPA)方案都成为了研究热点。

主振荡并联放大器方案的基本原理如图 1 所示。作为种子激光器,它输出的光束为多路光纤放大器提供信号源,同时还分出一路参考光。由于参考光和多路光纤放大器的输出光都是由种子激光器的光束放大而来的,因此它们的频率一致。参考光光路上设置移频器,每路光纤放大器的光路上有相位校正器件。多路光纤放大器的光束通过准直器阵列输出。参考光和准直器阵列输出的光束发生干涉,通过探测干涉信号,可以实时检

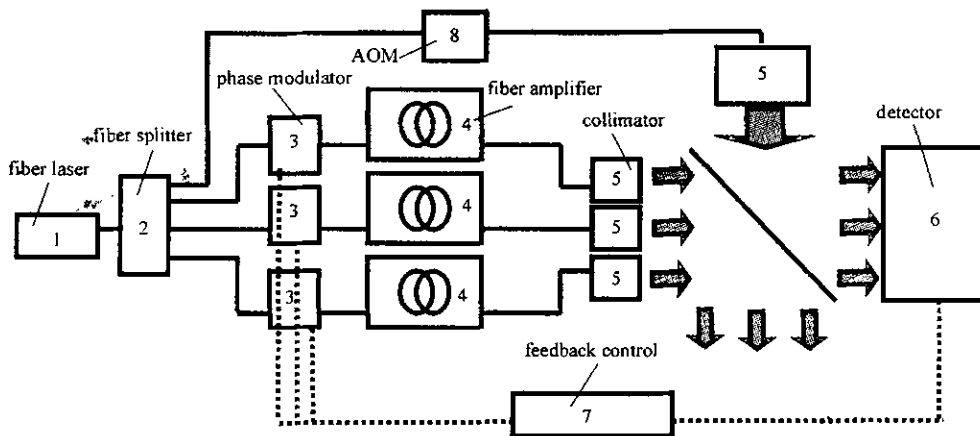


Fig. 1 Basic principle of MOPA

图 1 并联主振荡-功率放大(MOPA)方案基本原理

* 收稿日期:2005-12-16; 修订日期:2006-09-12

基金项目:国家 863 计划项目资助课题

作者简介:侯 静(1975—),女,博士,副教授,现从事光纤激光器、自适应光学等方向的研究;houjing25@sina.com.cn.

测到多路光纤放大器的相位变化情况,并为每一路上的相位校正器件提供控制电压,实现对光纤放大器相位变化的实时补偿,确保准直器阵列输出的光束相位保持一致。在光路中可以增加偏振控制器件,确保准直器阵列输出的光束偏振方向一致,也可以采用全保偏光路实现。因此,在 MOPA 方案中,多路光纤放大器的输出光束的频率、相位和偏振方向都是一致的,即光纤激光器阵列实现了相干输出。

为实现多个光纤放大器输出光束的相干合成,必须实时探测与控制每一路光纤放大器的相位变化^[5]。用爬山法和外差法分别对掺镱光纤放大器开展了相位校正实验研究,用铌酸锂相位调制器实现了闭环控制。

1 基本原理

由于研究对象不同,常用的探测相位变化的方法,如哈特曼法、曲率法等都不能用于对光纤放大器的相位探测与校正。爬山法是一种自动寻优的控制方法,外差法通过探测信号光和受调制的参考光的干涉信号的变化实现对信号光相位变化的测量,测量结果可以用于对铌酸锂相位调制器的控制,最终实现闭环校正。

下面简要介绍一下这两种方法的基本原理。

1.1 爬山法

爬山法对光纤放大器的相位校正基本原理如图 2 所示。相位控制器位于光纤放大器光臂上,通过实时探测参考臂和光纤放大器光臂的干涉信号,用寻优方法输出控制电压到相位调制器,补偿光纤放大器的相位变化,最终使干涉信号保持在最大值。光纤两臂相位差主要来源于以下几个方面:光纤放大器工作时的相位噪声 φ_F ; 光纤两臂固有长度差以及外界的干扰噪声引起的相差 φ_N ; 系统闭环工作时,相位调制器加电压引起的两臂的相差 φ_M 。 φ_F, φ_N 均为随机相差,令 $\varphi_P = \varphi_F + \varphi_N$, 则系统输出的干涉信号为

$$V = A + B\cos(\varphi_P + \varphi_M) \tag{1}$$

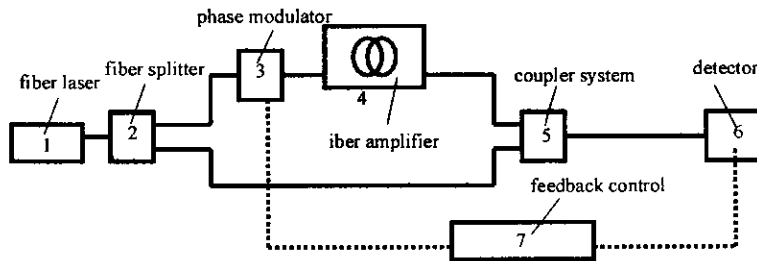


Fig. 2 Basic principle of "climbing hill"

图 2 爬山法对光纤放大器的相位校正基本原理

从(1)式可以看出,系统的干涉光强随着 $\varphi_P + \varphi_M$ 的变化时强时弱地变化。如果控制 φ_M ,使 $\varphi_P + \varphi_M = 2n\pi$, $n=0,1,2,\dots$,那么整个系统的输出干涉信号将始终保持在最大值 $V_{\max} = A + B$ 处。其中

$$A = (V_{\max} + V_{\min})/2, \quad B = (V_{\max} - V_{\min})/2 \tag{2}$$

具体控制过程是:输出任意的控制电压加到相位调制器上,进行逐点采样,并计算 A, B 的值;采样得到系统输出电压 V 并与 V_{\max} 相比较,当 $|V - V_{\max}|$ 大于某一阈值时,则通过改变加在相位调制器上的电压 ΔV ,改变输出控制电压;重复操作直到 $|V - V_{\max}|$ 小于阈值,停止改变控制电压,控制工作完成。上述过程不断循环,就可以使系统相干合成的输出始终保持在干涉最强处。

1.2 外差法

外差法对光纤放大器的相位校正基本原理如图 3 所示。相位控制器位于光纤放大器光臂上,声光移频器

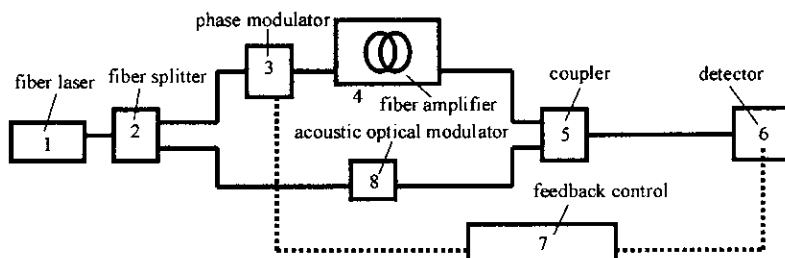


Fig. 3 Basic principle of heterodyne method

图 3 外差法对光纤放大器的相位校正基本原理

位于参考臂上, 两束光经光纤耦合器后在光电探测器上实现外差探测, 光电探测器上两光波的电矢量分别为

$$E_i(t) = A_i \exp[j(\omega_i t + \varphi_i)] \quad (3)$$

式中: A_i , ω_i , φ_i 分别为两束光的振幅、频率和初相位, 其中 $i=1, 2$ 。声光移频器的移频量是 $\Delta\omega$, 因此 $\omega_2 = \omega_1 + \Delta\omega$ 。入射到光电探测器上的总光场为

$$E(t) = A_1 \exp[j(\omega_1 t + \varphi_1)] + A_2 \exp[j(\omega_2 t + \varphi_2)] \quad (4)$$

总光强

$$I = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos\{[(\omega + \Delta\omega) - \omega]t + (\varphi_2 - \varphi_1)\} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[\Delta\omega t + (\varphi_2 - \varphi_1)] \quad (5)$$

式中: I_1 和 I_2 为常数项, 经光电探测器输出的信号实际上是由第三项形成的外差信号电流, 它是频率为 $\Delta\omega$ 的正弦信号, $\varphi_2 - \varphi_1$ 反映了两束光的相位差。因此通过外差法可以检测到光纤放大器的相位变化情况。将检测结果作相应的处理后, 就可以为铌酸锂相位调制器提供控制信号, 实现闭环控制。开环情况下, 光电探测器输出的信号如(5)式所示, 是一个随 $\varphi_2 - \varphi_1$ 的变化而变化的、频率为 $\Delta\omega$ 的正弦信号。闭环结果使得 $\varphi_2 - \varphi_1 = 0$, 光纤放大器的相位得到有效补偿, 输出的信号是频率为 $\Delta\omega$ 的正弦信号。

2 实验结果

首先, 按照图 2 完成了爬山法实验。实验中主振荡激光器是分布反馈式掺镜光纤激光器, 波长为 1 083 nm, 输出功率 0~100 mW 连续可调; 光纤相位调制器是铌酸锂相位调制器; 光纤放大器中心工作波长为 1 083 nm, 输出功率为 0~1 W 连续可调, 分束和合束均采用保偏光纤耦合器, 光路中采用全保偏光纤。

光电探测器将采得的干涉信号送入计算机, 经过相关数据处理后, 实时输出控制信号, 控制相位调制器, 使掺镜光纤放大器的相位得到补偿。系统的采样频率为 100 kHz, 控制精度为 $\lambda/10$ 。实验结果如图 4 所示, 光电探测器上的信号在闭环前后有明显变化。在开环的情况下, 光电探测器的输出电压随着时间的变化而不断起伏变化, 这说明两路光的干涉光强有明显变化, 掺镜光纤放大器的相位变化是一个随机变化过程。在闭环情况下, 光电探测器的输出电压非常好地稳定在最高点, 这说明掺镜光纤放大器的相位得到了有效的补偿校正, 两路光的干涉光强保持在最大值。

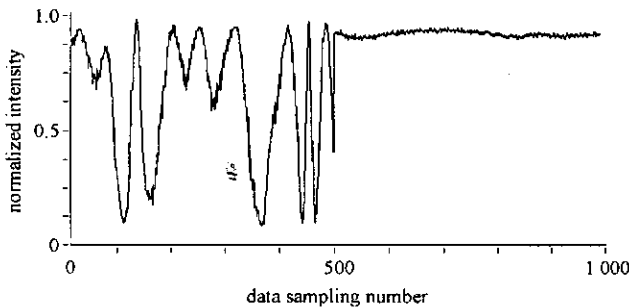


Fig. 4 Result of phase controlling by using “climbing hill” method

图 4 爬山法实现光纤放大器相位校正的实验结果

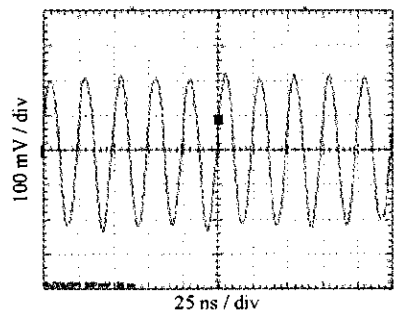


Fig. 5 40MHz heterodyne signals

图 5 40MHz 的外差信号

按照图 3 完成了外差法实验。光电探测器将采得的干涉信号送入自行研制的电路系统中, 经过相关数据处理后, 实时输出控制信号, 控制相位调制器, 使掺镜光纤放大器的相位得到补偿。该系统的移频量为 40 MHz, 精度优于 $\lambda/20$ 。实验测得的外差信号结果如图 5 所示, 光电探测器上的外差信号是一个 40 MHz 的正弦信号。开环时光电探测器上的信号是一个随 $\varphi_2 - \varphi_1$ 的变化而变化的、频率为 40 MHz 的正弦信号, 如(5)式所示, 从中提取出相位变化的实验结果如图 6(a)。闭环结果使得 $\varphi_2 - \varphi_1 \approx 0$, 光纤放大器的相位得到有效补偿, 输出的信号是比较理想的 40 MHz 正弦信号, 从中提取出相位变化的实验结果如图 6(b)。可见, 相位变化的实验结果在闭环前后有明显的变化, 开环时是一个 ms 量级的随机变化信号, 闭环时相位得到校正, 变化曲线是一条稳定的直线。

比较两种方案, 爬山法的控制方法简单, 但由于每实现一次相位校正都需要花费时间进行自动寻优, 系统工作频率因此受限, 控制速度相对较低。外差法系统的工作频率由声光调制器的移频量决定, 变化频率远低于移频量的相位变化, 都可以被探测和校正。在控制精度方面, 爬山法的控制精度决定于 $|V - V_{\max}|$ 的阈值大小, 阈值越小, 精度越高。但阈值设定越小, 自动寻优过程耗时越长, 系统的工作频率大大降低。外差法系统的

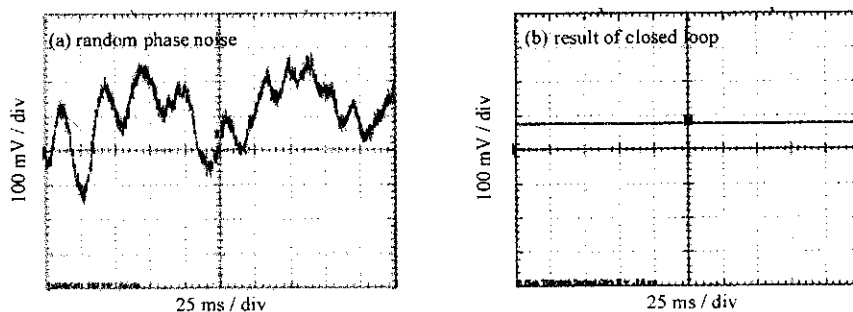


Fig. 6 Results of phase controlling by heterodyne method

图 6 外差法实现光纤放大器相位校正的实验结果

控制精度决定于电路系统对外差信号的处理过程与算法,可以达到一个相对较高的水平。在实验中,爬山法系统的工作频率为 100 kHz,精度为 $\lambda/10$ 。外差法系统的移频量为 40 MHz,精度可以优于 $\lambda/20$ 。因此,对于高精度高频率的相位变化,应该首选外差法。

3 结 论

我们分别用爬山法和外差法实现了对掺镜光纤放大器的相位控制与校正,实验中通过铌酸锂相位控制器实现了两种方法的闭环控制。研究表明掺镜光纤放大器的相位变化是可以得到很好的控制与补偿的。在光纤激光器阵列的相干合成技术,即主振荡并联放大器(MOPA)方案中,补偿掺镜光纤放大器的相位是最关键的,该工作为实现光纤激光器阵列的相干合成方案打下了实验基础,具有重要的参考价值和应用实践意义。今后我们将进一步深入研究光纤放大器的相位变化特性。

参考文献:

- [1] Hou J, Xiao R. Coherent beam combination of two polarization maintaining ytterbium fibre amplifiers [J]. *Chinese Physics Letter*, 2005, **22** (9): 2273-2275.
- [2] Morel J. Coherent coupling of an array of Nd³⁺ doped single-mode fiber lasers using an intracavity phase grating [C]//Proc of SPIE. 1992, **1789**: 13-17.
- [3] Fan T Y. Laser beam combining for power and brightness scaling[C]//IEEE Aerospace Conference Proceedings. 2000, **3**: 49-54.
- [4] Agust S J, Fan T Y, Sanchez A. Coherent beam combining and phase noise measurements of ytterbium fiber amplifiers [J]. *Optics Letters*, 2004, **29**: 474-476.
- [5] 肖瑞, 侯静, 姜宗福. 光纤激光器阵列相干合成中的相位探测与校正方法研究[J]. *物理学报*, 2006, **55**(1):184-187. (Xiao R, Hou J, Jiang Z F. Experimental investigation of phase detecting and compensating in coherent combining of fiber lasers array. *Acta Phys Sin*, 2006, **55**(1):184-187)

Two methods to realize phase controlling of ytterbium fiber amplifiers

HOU Jing, XIAO Rui, LIU Ze-jin, JIANG Zong-Fu

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

Abstract: In the field of fiber laser coherent combining, phase controlling of ytterbium fiber amplifiers is the most difficult technology in the Master Oscillator-Power Amplifier scheme. Two methods to realize phase controlling of ytterbium fiber amplifiers are studied. One is “climbing hill”, which can optimize the control voltage automatically and the other is “heterodyne detection”, which can realize real-time detection and correction of the phase change. In the experiments, the wavelength of the master oscillator is 1 083 nm and the output power is between 0~100 mW. Phase noises are controlled by LiNO₃ phase modulator. The output power of ytterbium fiber amplifiers is between 0~1 W. The fibers are polarizedly maintained. The “climbing hill” control system works at 100 kHz and the control precision is $\lambda/10$. In the heterodyne detection control system, the frequency is shifted 40 MHz and the control precision is better than $\lambda/20$. In both of the two feed back control loops, the phase noise of fiber amplifier is properly controlled by a LiNO₃ phase modulator. The results lay a foundation to achieve coherent combining of fiber laser array.

Key words: Fiber laser array; Coherent combining; Phase detection and correction; Fiber amplifier; MOPA