

基于能动分块反射镜的两路光纤放大器 相位探测及其相干合成实验研究^{*}

杨若夫^{1,2)†} 杨 平¹⁾ 沈 锋¹⁾

1) 中国科学院光电技术研究所自适应光学重点实验室, 成都 610209)

2) 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2009 年 2 月 22 日收到 2009 年 4 月 8 日收到修改稿)

在光纤激光相干合成中, 需要探测各路光束之间的平移误差。提出了一种条纹提取算法, 利用此算法能得到准确的相位平移扰动。基于此算法, 针对两路光纤放大器测量了毫瓦量级的光纤放大器的相位噪声特性, 然后采用高速数字处理电路以及能动分块反射镜完成了平移相位扰动的实时校正。实验结果表明, 闭环前后条纹对比度从 0.09 提高到 0.25, 平移误相位噪声强度的幅值从 1053.4 nm 降低到 116.7 nm, 系统校正精度达到 $1/10\lambda$, 控制带宽约为 50 Hz。

关键词: 能动分块反射镜, 条纹提取算法, 相位扰动, 光纤放大器

PACC: 4255N, 4230K, 4225K

1. 引 言

功率高、光束质量好的激光光束在工业切割、焊接具有很大的应用潜力。在低功率运转情况下, 单根光纤的光束质量可以接近干涉极限。但是由于非线性和热效应的影响, 单根光纤功率的提高非常困难, 因此对多路光纤激光进行相干合成控制用以输出功率高并且质量好的光束是目前国内外研究的一个热点。国内外很多学者提出了许多方法来进行光纤激光束相干合成的研究, 以达到在提高激光功率的同时, 保持激光束好的光束质量。但是由于光纤是对温度以及振动非常敏感的元件, 如果不加以控制, 其合成后的远场干涉条纹由于折射率和长度引起的每束输出光束的波前不同步会变得非常模糊, 使其条纹对比度和峰值功率变得很差。目前国内外对于光束波前的探测和控制方法主要有如下几种: 利用光纤耦合器自组织效应的主动校正^[1]、基于外差探测的铌酸锂晶体校正^[2-5]、基于哈特曼传感器探测的分块反射镜校正^[6,7]以及同时采用两种方案的相位控制^[8]。

由于单根低功率光纤的光束质量好, 因此造成

合成后远场条纹对比度下降的主要原因是光束之间的倾斜像差(tilt)以及平移相位差(piston)。通常所谓光纤中的相位噪声实际上就是指平移相位差。采用能动分块反射镜来进行光束的相干合成控制有许多优点, 由于光束的波前校正器采用的是能动分块反射镜, 除了可以校正光束之间的平移相位差之外还有一个最大的优点就是可以校正光束的倾斜像差, 并且分块反射镜是在光束输出端进行校正的, 这是一种线性校正, 可以对输出的高功率激光相位直接进行控制。

本文提出了一种基于图像处理的条纹提取算法, 获得了光纤放大器的平移扰动幅度与时间的变化关系。采用峰值比的特征提取算法完成了两路光纤放大器的实时闭环校正, 并利用条纹提取算法量化分析了闭环前后光束的相位噪声的控制精度。

2. 实验原理

2.1. 条纹提取算法原理

两路具有平移相位差的准直光束在远场会形成

* 国防科技预研基金(批准号 : A06K024)。

† E-mail: yang_ruofu@163.com

特定的干涉条纹^[9]. 具有平移相位差的光束在远场的光斑形状可由二维 Fourier 变换^[10]得到, 即

$$\tilde{E}(x, y) = \frac{c}{f} \exp\left[i k \left(f + \frac{x^2 + y^2}{2f}\right)\right] \iint_{\Sigma} \tilde{E}(x_1, y_1) \times \exp\left[-i 2\pi \left(\frac{xx_1}{\lambda f} + \frac{yy_1}{\lambda f}\right)\right] dx_1 dy_1, \quad (1)$$

其中 λ 为波长, Σ 为孔径范围, $c = \frac{1}{i\lambda}$, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, f 为焦距, $\tilde{E}(x_1, y_1)$ 为 x_1-y_1 平面上入射光波的复振幅, $\tilde{E}(x, y)$ 为 $x-y$ 衍射屏上的光波复振幅. 入射到透镜上的两束光复振幅分布如图 1 所示.

两束光波前复振幅的数学表达式为

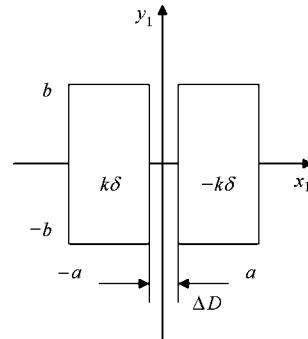


图 1 具有平移相位差的两束光波前分布图

$$\tilde{E}(x_1, y_1) = \begin{cases} \exp(i k \delta) & (-a \leq x_1 \leq -\Delta D/2, -b \leq y_1 \leq b), \\ \exp(-i k \delta) & (\Delta D/2 \leq x_1 \leq a, -b \leq y_1 \leq b), \\ 0 & (\text{其他情形}). \end{cases} \quad (2)$$

这里, 光斑边沿相距 ΔD , 在 x 方向上的光斑范围为 $(-a, a)$, 在 y 方向上的光斑范围为 $(-b, b)$. 将 (2) 式代入 (1) 式得到远场光强分布

$$\mathcal{I}(x, y) = |\tilde{E}(x, y)|^2 = \frac{f^2 \lambda^2}{\pi^4 x^2 y^2} \sin^2\left(\frac{k b y}{f}\right) \times \left[\sin\left(k \delta + \frac{k x \Delta D}{2f}\right) - \sin\left(k \delta + \frac{k x a}{f}\right) \right]^2. \quad (3)$$

提取 $y=0$ 的一维数据并对 $\mathcal{I}(x, 0)$ 求导可得

$$\begin{aligned} \frac{d\mathcal{I}(x, 0)}{dx} &= \frac{-8b^2}{\pi^2 x^3} \left[\sin\left(k \delta + \frac{k x \Delta D}{2f}\right) - \sin\left(k \delta + \frac{k x a}{f}\right) \right]^2 \\ &\quad + \frac{8b^2}{\pi^2 x^2} \left[\sin\left(k \delta + \frac{k x \Delta D}{2f}\right) - \sin\left(k \delta + \frac{k x a}{f}\right) \right] \\ &\quad \times \left[\cos\left(k \delta + \frac{k x \Delta D}{2f}\right) \frac{k \Delta D}{2f} - \cos\left(k \delta + \frac{k x a}{f}\right) \frac{k a}{f} \right] \\ &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

将 (4) 式化简为

$$\begin{aligned} &\left[\sin\left(k \delta + \frac{k x \Delta D}{2f}\right) - \sin\left(k \delta + \frac{k x a}{f}\right) \right] \\ &- x \left[\cos\left(k \delta + \frac{k x \Delta D}{2f}\right) \frac{k \Delta D}{2f} - \cos\left(k \delta + \frac{k x a}{f}\right) \frac{k a}{f} \right] \\ &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

设置 δ 范围为 $[-\frac{\lambda}{2}, \frac{\lambda}{2}]$, 步长为 $\frac{\lambda}{50}$, 光斑间距 $\Delta D = 0.5$ mm, $a = 5.3$ mm, $b = 5.6$ mm, $\lambda = 1064$ nm, $f = 1$ m. 对 (5) 式经数值计算得到 δ 与中央主峰位置的关系, 结果如图 2 所示.

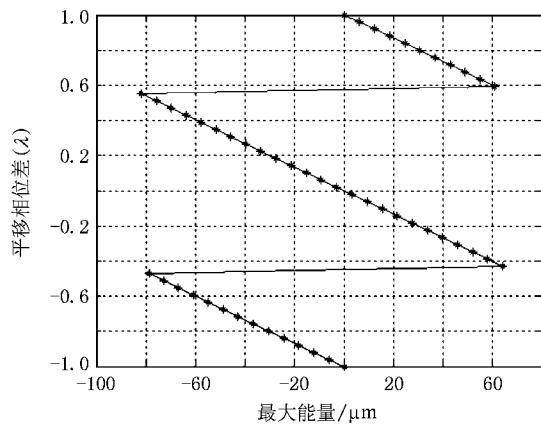


图 2 平移相位差与中央主峰位置的关系

由图 2 可以看出, 两光束的平移相位差与中央主峰位置呈现以 2π 为周期的线性关系, 零级主峰与次峰交替变化. 据此, 就可以利用中央主峰的位置反推得到当前平移相位差的真实值.

实验中利用高速电荷耦合器件 (CCD) 采集一组两路光纤放大器远场合成光斑图像, 然后对这一组光斑利用条纹移动算法进行处理. 首先计算零级主峰位置与次峰位置的像素距离 D , 即为平移相位差变化一个波长的中央主峰在 CCD 上偏移的像素量.

以第一帧为基准,计算第 i 帧的主峰位置相对于第一帧的移动量 d_i ,则第 i 帧相对于第一帧的平移相位差为 $p = \frac{d_i}{D}$,单位为波长 λ 。图 3 是平移相位噪声测量实验光路图。实验中,波长为 $1.064 \mu\text{m}$,线宽为 30 kHz 的激光器输出的激光通过保偏光纤分束器分

别注入到两路光纤放大器进行放大,最后得到两路 0.5 W 左右的输出激光。这两束激光再经准直并由平行反射镜压缩光束间隔,经过透镜聚焦后在焦平面处形成干涉条纹并由 CCD 高速采集。能动分块反射镜没有施加反馈电压,其作用只相当于两个反射镜。

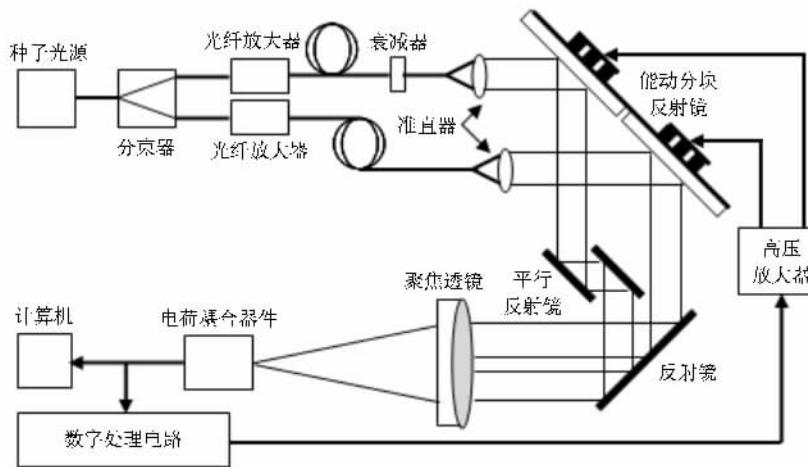


图 3 基于能动分块反射镜校正的平移相位差测量以及闭环控制光路图

实验连续采集了 3×10^4 帧的远场干涉图,采集频率为 2900 Hz 。CCD 采集到的图像序列经由条纹提取算法进行分析得到的平移相位噪声特性如图 4 所示。它是光纤放大器开机不久后进行测量得到的结果。由此可见,光纤放大器的平移相位噪声呈现单向漂移的增长特性,这是由光纤温度升高使得折射率和光纤长度改变引起的。并且由于输出功率较低,因而相位噪声主要成分是低频。在光纤放大器的平移相位差测试中,由于我们所关心的只是由光纤放大器引入的动态相位噪声,而在分块反射镜以及后面的平行反射镜所引入的只是静态的相位差,其大小对分析动态平移相位差没有影响。因此,在条纹移动算法中才以第一帧作为基准来计算。

2.2. 平移相位差的闭环控制原理

双光束的远场干涉图随平移相位差扰动的不同而变化。当平移相位差为波长的整数倍时,零级峰值最大,次级峰值最小;当相位差为半波长的奇数倍时,零级能量已经全部转移到了两个次级上。对于闭环控制,如果采用条纹移动算法来提取平移相位差进行闭环控制,则首先需要给出一个最佳主峰位置,然后控制合成后的主峰位置在此最佳位置上。但是如果两束光斑有整体移动或是 CCD 移动的情况下,最

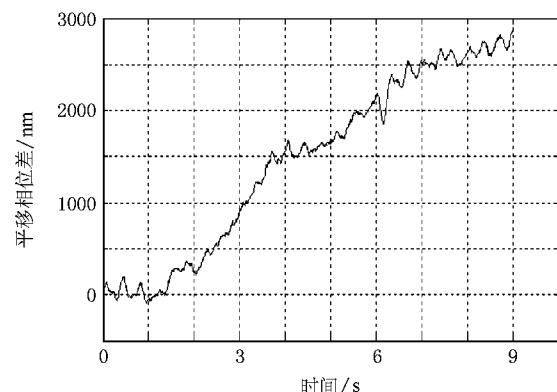


图 4 平移相位扰动随时间的变化关系

佳主峰位置就会变化从而造成远场合成后效果降低。

在控制阶段,我们采用 Gary 等^[11]提出的峰值比算法来提取平移相位特征,由于该算法需要做除法运算,数字信号处理计算时间会耗时更多,并且除法运算也会使计算的误差增大。在对不同的平移相位差下的干涉图像进行分析时,发现当它为 2π 的整数倍时两个次峰高度相等,因此在闭环控制中,只需要控制两个次峰高度使之相等就能保证零级峰值最大。

具体控制算法如下:首先沿与光束排布垂直的方向上像素相加得到一维光强分布,利用此光强的

一维分布数据计算中央最大峰值 P_m 及与其左右相邻的两个次峰值 P_1, P_r , 其电压更新方程如下:

$$V_{n+1} = K_1 V_n + K_2 (P_1 - P_r). \quad (6)$$

此电压反馈方程是一个比例控制方程, 当 $P_1 = P_r$ 时, 反馈电压不再变化, 平移相位差控制到波长整数倍, 主峰高度达到最大。由于能动分块反射镜行程有限, 还需要设置它的电压工作范围, 当反馈电压超过此电压范围就需要减去或加上一个平移相位差周期电压。此周期电压由标定光路计算得到, 其计算方法是在标定光路中给分块反射镜施加连续增加的一组电压, 让干涉条纹滚动一个周期, 滚动一个周期所对应的施加电压的增加值就是平移相位差周期电压。

3. 实验结果及分析

在闭环控制实验中的光路结构图如图 3 所示, 其闭环反馈电压通过高压放大器放大后输出给分块反射镜进行实时的闭环控制。图 5 是开环和闭环下 3 s 长曝光积分图。从图 5 可以看出, 在闭环前条纹比较模糊, 而在闭环后条纹清晰可辨。在开环下条纹对比度为 0.09, 而在闭环下条纹对比度则提高到 0.25。

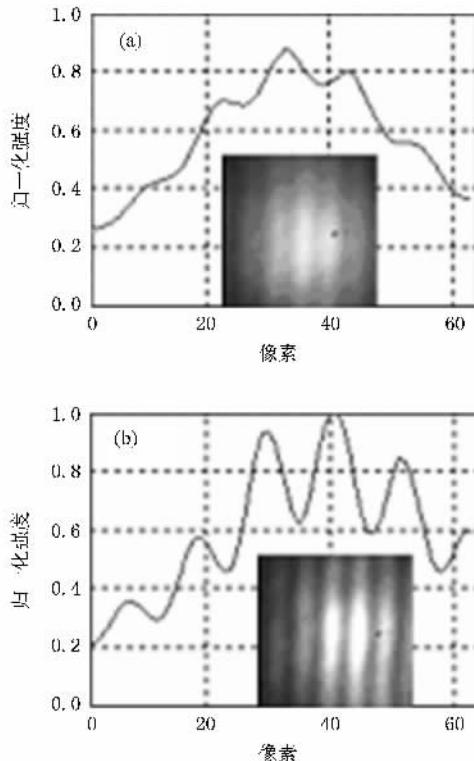


图 5 开闭环前后一维和二维远场光斑长曝光图 内插图为对应的光斑图。(a)开环 (b)闭环

对开闭环的远场图, 我们利用条纹提取算法分析了开闭环工作的光纤放大器输出光束的平移相位噪声特性, 如图 6 所示。开环下光纤放大器的平移相位噪声强度幅值为 1053.4 nm, 闭环后相位噪声强度幅值降为 116.7 nm, 系统校正精度接近 $\lambda/10$ 。另一方面, 通过开闭环的相位变化数据进行了频谱分析(图 7), 系统的控制带宽大约为 50 Hz。在频谱图中出现的尖峰, 是由光纤放大器的电源噪声引起的, 其频率约为 100 Hz。

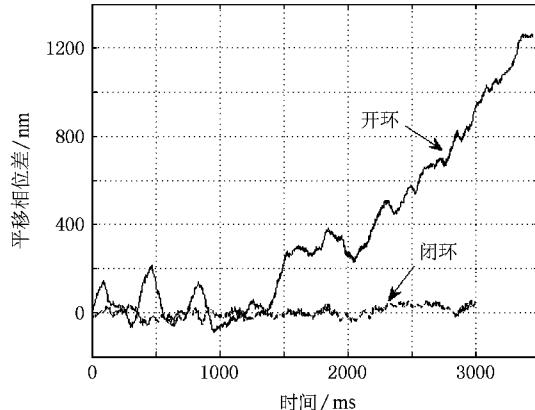


图 6 开闭环下平移相位差幅度对比曲线

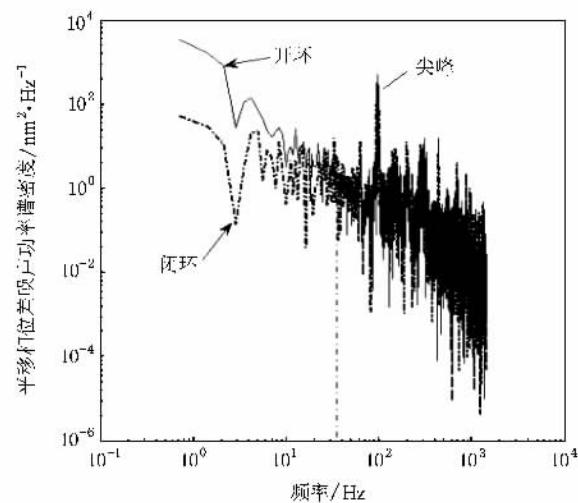


图 7 开闭环下的平移相位差频谱图

4. 结 论

本文提出了一种基于高速 CCD 探测的平移相位噪声的条纹移动算法, 根据此算法得到了毫瓦级光纤放大器的平移相位噪声的幅度与时间的变化特

性关系。在闭环控制的数据分析中,利用此算法进行分析得到了具有物理意义的闭环控制精度以及系统校正带宽。另一方面,实验利用新颖的相位控制器件——能动分块反射镜完成了两路 500 mW 光纤激光器的相位补偿,并设计了一套用于实时控制的高速硬件处理电路。闭环系统控制精度约为 $\lambda/10$,控制带宽达到 50 Hz,闭环控制前后条纹对比度从 0.09

提高到 0.25。闭环后远场干涉条纹稳定,实验效果比较理想。结果表明,采用分块反射镜对毫瓦级的光纤激光产生的平移相位扰动具有良好的校正能力。

感谢国防科学技术大学光电科学与工程学院的许晓军教授以及周朴、吴武明、王小林、马浩统博士的大力协助,并感谢国防科学技术大学光电科学与工程学院提供实验条件。

- [1] Jia X J, Liu F N, Fu S G, Liu Y G, Yuan S Z, Dong X Y 2007 *Chin. Phys.* **16** 2993
- [2] Xiao R, Hou J, Jiang Z F 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 184 (in Chinese) [肖 瑞、侯 静、姜宗福 2006 *物理学报* **55** 184]
- [3] 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]
- [4] Wei L, Naresh S, Amnon Y, Anthony K, George R, Firooz A, Hossein H, Jeffrey U 2007 *Opt. Exp.* **15** 3201
- [5] Ji X L, Li X Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7674 (in Chinese) [季小玲、李晓庆 2008 *物理学报* **57** 7674]
- [6] Daniel R N, Steve D T, Morgan R, Tony G S, Mial E W, James K G, Rosenthal R R, Bentley A E 1995 *Proc. SPIE* **2534** 80
- [7] Yang P, Yang R F, Shen F, Li X Y, Jiang W H 2009 *Opt. Commun.* **282** 1349
- [8] Goodno G D, Komine H, McNaught S J, Weiss S B, Redmond S, Long W, Simpson R, Cheung E C, Howland D, Epp P, Weber M, McClellan M, Sollee J, Injeyan H 2006 *Opt. Lett.* **31** 1247
- [9] Gary A C, Mitchell T, Catherine M O 2000 *Proc. SPIE* **4003** 188
- [10] Diaz U R, Jimenez H A 2004 *Opt. Exp.* **12** 1192
- [11] Gary A C, Catherine M O, Mitchell T 2000 *Appl. Opt.* **39** 4706

Experimental research on phase detection and correction of two fiber amplifier based on active segmented mirrors^{*}

Yang Ruo-Fu^{1,2)†} Yang Ping¹⁾ Shen Feng¹⁾

1) Key Laboratory for Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China

2) Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

(Received 22 Febrary 2009; revised manuscript received 8 April 2009)

Abstract

The measurement of piston noise is a critical issue in coherent combining of fiber lasers. This paper presents a strip extracting algorithm, which get the amplitude of phase noise in fiber amplifier. By this algorithm, phase noise of fiber amplifier working in 10^{-3} W level is measured and real-time controlled by high-speed digital processing circuit and active segment mirrors. Experimental results indicate, that after closing the loop, fringe contrast improves from 0.09 to 0.25, intensity value of piston noise decreases from 1053.4 nm down to 116.7 nm; the calibration precision and bandwidth of the system achieve $1/10\lambda$ and ~ 50 Hz, respectively.

Keywords : active segment mirror, strip extract algorithm, phase noise, fiber amplifier

PACC : 4255N, 4230K, 4225K

^{*} Project supported by the Advanced Research Foundation for National Defense Science and Technology, China (Grant No. A06K024).

[†] E-mail: Yang_ruofo@163.com