

拍瓦装置皮秒测量系统立体空间激光光路的快速自动准直

秦海棠 刘代中 欧阳小平 王 杨 杨 冬 朱宝强 朱健强

中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800

摘要 拍瓦激光参数诊断过程中,为满足单脉冲信噪比测量仪中周期性极化铌酸锂(PPLN)晶体对光束偏振态的要求,皮秒测量平台的光路排布中采用了立体空间分布结构。针对单脉冲信噪比测量仪快速精确的在线准直要求,推导出马达调整的 4×4 维线性矩阵的数学模型算法,实现皮秒测量平台立体空间激光光路的快速精确准直。实验结果表明,该准直算法能够保证马达调整3次以下,准直时间2 min以内,实现近场准直精度小于0.16 mm,远场调整精度小于0.17 mrad。满足信噪比测量对准直精度和准直时间的要求,使得信噪比信号获取成功率由10%提升到90%,保障拍瓦激光信噪比实验结果满足总体要求(大于 10^6)。

关键词 激光技术; 光束准直; 准直算法; 皮秒激光

中图分类号 TN247 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.0502006

Rapid Laser Beam Auto-Alignment in Stereoscopic Space for Petawatt Picosecond Measurement Systems

Qin Haitang Liu Daizhong Ouyang Xiaoping Wang Yang Yang Dong

Zhu Baoqiang Zhu Jianqiang

Joint Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract Measurement platform must exhibit a stereoscopic space distribution in diagnostic systems for petawatt lasers to meet the requirement of a periodically poled lithium niobate (PPLN) crystal for light polarization in single-pulse contrast measuring instrument. A mathematical model of a 4D linear matrix is proposed to achieve rapid and accurate beam alignment in picosecond measurement platform. In the petawatt experiments, the alignment algorithm ensures that the near-field and far-field accuracy is less than 0.16 mm and 0.17 mrad, respectively. The motor is adjusted less than three times, and the corresponding elapsed time is in 2 min. The mathematical model meets measurement requirements for alignment accuracy and time. The pulse contrast of the petawatt lasers is obtained from the model. The pulse acquisition probability of the contrast measuring instrument reaches 90% from 10%, to guarantee that the experimental result of pulse contrast can meet the general requirement (more than 10^6).

Key words laser technique; beam alignment; collimation arithmetic; picosecond laser

OCIS codes 220.1140; 320.7100; 150.1135

1 引 言

在高功率激光物理研究中,高能皮秒拍瓦激光表现出了极大的应用前景。皮秒参数测量系统用于皮秒拍瓦激光压缩脉冲的能量、脉宽、远场、信噪比等参数的诊断和分析^[1-5]。目前的难点和热点在于高能拍瓦激

收稿日期: 2014-11-25; 收到修改稿日期: 2015-01-05

基金项目: 国家自然科学基金(11204330)

作者简介: 秦海棠(1989—),女,硕士研究生,主要从事皮秒测量激光准直技术方面的研究。E-mail: kfqxqht2012@163.com

导师简介: 刘代中(1973—),男,副研究员,硕士生导师,主要从事高功率激光光束控制与准直方面的研究。

E-mail: dzhliu@mail.shcnc.ac.cn(通信联系人)

光单次脉冲信噪比的诊断与优化。为了实现单次脉冲的信噪比测量,皮秒参数测量系统采用了上海交通大学钱列加教授课题组研制的单脉冲信噪比测量仪^[6-8]。

由于该单脉冲信噪比测量仪的特殊性,它在大型的高能拍瓦激光装置的工程应用中提出了两个技术要求。第一个是对光束偏振态的要求,它的内部采用了非线性晶体实现非共线互相关过程,因此它需要被测脉冲的偏振方向为s方向。为了满足光束偏振态的技术要求,皮秒参数测量系统采用了一对具有空间立体角结构的反射镜,将倾斜的线偏振光旋转为竖直偏振。第二个是对准直精度的要求,由于该单脉冲信噪比测量仪中的非线性晶体为周期性极化铌酸锂(PPLN),工作窗口尺寸(宽×高)为20 mm×0.5 mm,因此在高度这一维提出了高精度的准直要求。为了满足这两个技术要求,解决单脉冲信噪比测量仪在工程应用中的技术问题,通过分析该测量仪的内部结构,本文提出了立体空间激光光路的快速自动准直方案。

2 原理分析及精度要求

单脉冲信噪比测量仪的光路简图如图1所示。被测脉冲和扫描脉冲经过一块焦距 f 为200 mm的柱面镜入射到PPLN晶体上,产生互相关信号。互相关信号经由一块焦距 f 为100 mm的柱面镜入射到光纤阵列上。最终由光电倍增管(PMT)和示波器实现单脉冲信噪比的测量。利用手工调整时,每次实验仪器的调整需要1 h,拍瓦实验时信噪比测量仪的数据获取成功率仅为10%。

为了缩短调整时间,提高调整精度,皮秒测量平台首次利用2048 pixel×2048 pixel阵列的高空间分辨率的电荷耦合器件(CCD)实现近场和远场的快速准确的自动准直。基于图1中的光路结构,经过分析得到单脉冲信噪比测量仪需要的调试精度为:近场定位误差小于0.2 mm,远场定位误差小于1 mrad,调整时间要求10 min以内。

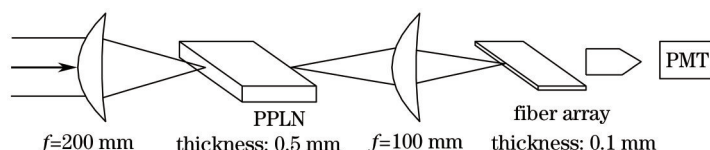


图1 单脉冲信噪比测量仪的光路简图

Fig.1 Schematic of the single-pulse contrast measuring instrument

3 传统的平面空间激光光路的自动准直

平面空间激光光路的自动准直单元如图2所示。通过设置在光路中的近场 CCD(NFCCD)和远场 CCD(FFCCD)来采集近远场激光光斑图像,并求得实时图像中心和基准的偏差 Δx 和 Δy ^[9]。通过设置在光路中的两块反射镜IM1和IM2来实现光路的调整^[10-13]。反射镜IM1上有步进马达NFX和NFY,分别控制IM1方位和俯仰的调整,同样,反射镜IM2上有步进马达FFX和FFY,分别控制IM2方位和俯仰的调整。以反射镜IM1

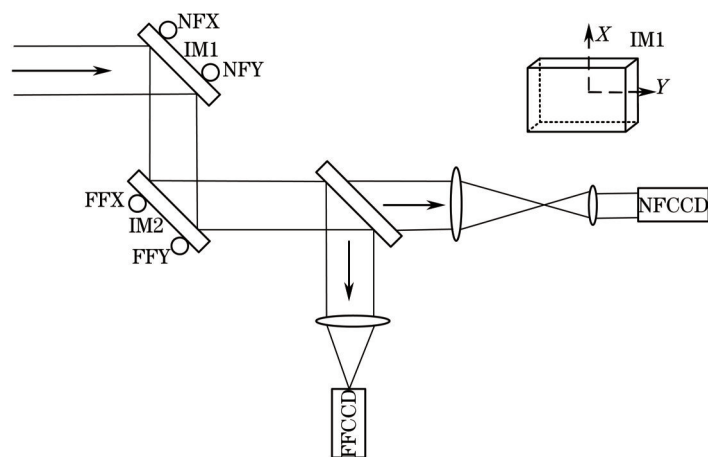


图2 平面空间激光光路的自动准直单元

Fig.2 Auto-alignment unit in traditional 2D space

为例来说明调整方法,图2中右上角为IM1的立体图,马达NFX的转动可以引起IM1绕着X轴转动,即实现IM1方位的调整;马达NFY的转动可以引起IM1绕着Y轴转动,即实现IM1俯仰的调整。

平面空间激光光路的自动准直中,反射镜方位和俯仰的调整分别对应激光光斑在CCD上X、Y方向上的移动。X方向马达转动引起光斑移动的示意图如图3(a)所示,Y方向马达转动引起光斑移动的示意图如图3(b)所示。平面空间的准直算法,通常情况下采用简单的多次迭代逼近算法。计算机根据近远场图像中心和基准的偏差,分别驱动X方向马达和Y方向马达,使近远场激光光斑中心逐渐逼近基准位置,直至满足准直精度的要求为止。由于远场调整较近场调整更敏感,计算机控制在算法上的实现过程为:计算机分别驱动马达FFX和FFY使远场光斑中心基本调到基准位置,然后分别驱动马达NFX和NFY一定步数使近场光斑中心逐渐靠近基准位置,但同时限制马达步数在一定范围内以保证远场光斑不跑出视场,如此多次迭代,直到满足准直精度的要求为止。

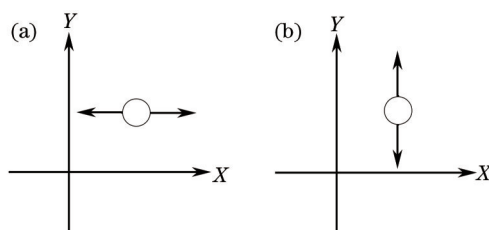


图3 平面空间马达转动引起光斑移动的示意图。(a) X方向马达转动引起光斑移动的示意图;
(b) Y方向马达转动引起光斑移动的示意图

Fig.3 Movement directions of the laser spots in 2D space. (a) Drawn by the motors operating in the X-direction;
(b) drawn by the motors operating in the Y-direction

4 新型的立体空间激光光路的自动准直

4.1 自动准直单元

单脉冲信噪比测量仪中的非线性过程由PPLN晶体产生,需要相互作用的两束脉冲均为s偏振。但是,由于拍瓦激光主光路的空间限制,诊断用脉冲进入皮秒测量系统时,偏振态为竖直方向偏右 36° 。为了满足单脉冲信噪比测量仪对被测脉冲偏振态的要求,皮秒测量平台上设计了一对具有空间立体角的反射镜,称为偏振旋转镜。其中,第一块反射镜IM3位于上层平台,将诊断脉冲的传输方向从水平方向变换为竖直向下;第二块反射镜IM4位于下层平台,将诊断脉冲的传输方向从竖直向下变换为偏水平方向 36° ,以使光的偏振态变为s偏振。为了实现自动准直功能,两个电动反射镜IM1和IM2被安装到偏振旋转镜之前,而NFCCD和FFCCD被安装到偏振旋转镜之后。不同于传统的平面空间光路,立体空间激光光路的自动准直单元如图4所示。

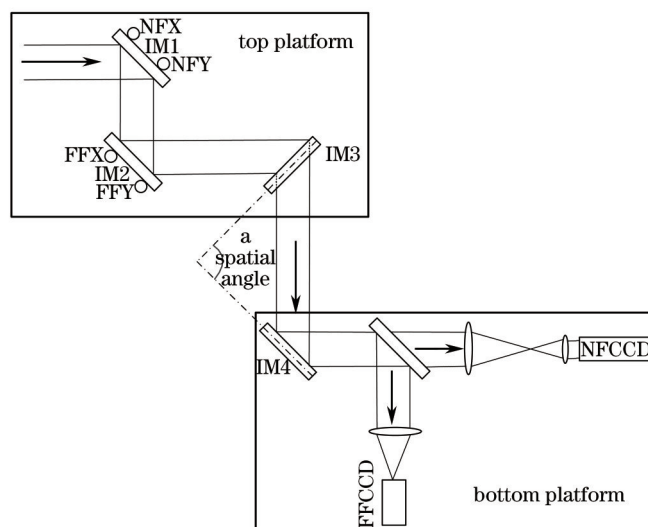


图4 立体空间激光光路的自动准直单元

Fig.4 Auto-alignment unit in new stereoscopic space

不同于传统的平面空间激光光路,立体空间激光光路的自动准直中, X 、 Y 方向马达和近远场图像之间出现了坐标系扭曲的问题。 X 、 Y 方向马达的转动不再对应激光光斑在 CCD 上 X 、 Y 方向上的移动。图 5(a)为 X 方向马达转动引起光斑移动的示意图,图 5(b)为 Y 方向马达转动引起光斑移动的示意图。光斑的移动方向与 X 轴有一个夹角 θ (θ 不等于 0° 或者 90°),在这种情况下,传统的迭代逼近算法就无法判断要选择 X 方向马达和 Y 方向马达中的哪一个,多次迭代逼近算法无法解决坐标系扭曲问题。

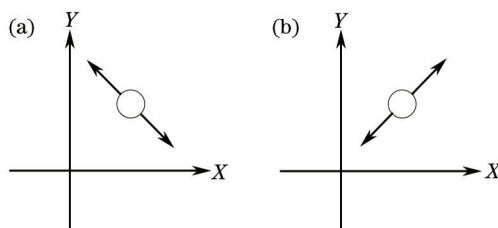


图 5 立体空间马达转动引起光斑移动的示意图。(a) X 方向马达转动引起光斑移动的示意图;
(b) Y 方向马达转动引起光斑移动的示意图

Fig.5 Movement directions of the laser spots in stereoscopic space. (a) Drawn by the motors operating in the X -direction;
(b) drawn by the motors operating in the Y -direction

4.2 快速准直算法

在立体空间激光光路的自动准直控制系统中,马达 NFX、NFY、FFX 和 FFY 的转动均会引起近场光斑中心 (x_n, y_n) 和远场光斑中心 (x_f, y_f) 的变化。因此,可以建立马达转动量 Δf_{NFX} 、 Δf_{NFY} 、 Δf_{FFX} 、 Δf_{FFY} 和近远场光斑中心变化量 Δx_n 、 Δy_n 、 Δx_f 、 Δy_f 之间的数学模型。

光路准直控制系统是一个线性系统,可以采用线性系统相关理论进行处理^[14-15]。为此,建立马达转动量

矩阵 $\begin{bmatrix} \Delta f_{\text{FFX}} \\ \Delta f_{\text{FFY}} \\ \Delta f_{\text{NFX}} \\ \Delta f_{\text{NFY}} \end{bmatrix}$ 和近远场光斑中心变化量矩阵 $\begin{bmatrix} \Delta x_f \\ \Delta y_f \\ \Delta x_n \\ \Delta y_n \end{bmatrix}$ 之间的数学模型为 $\begin{bmatrix} \Delta x_f \\ \Delta y_f \\ \Delta x_n \\ \Delta y_n \end{bmatrix} = \mathbf{B} \begin{bmatrix} \Delta f_{\text{FFX}} \\ \Delta f_{\text{FFY}} \\ \Delta f_{\text{NFX}} \\ \Delta f_{\text{NFY}} \end{bmatrix}$, 其中

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} \end{bmatrix}$$

。利用此数学模型来实现立体空间激光光路的快速准直,步骤如下:

1) 适当的调节光路使近场 CCD 和远场 CCD 都能采集到激光光斑图像。

2) 求线性矩阵 $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} \end{bmatrix}$, 由于满足关系式 $\begin{bmatrix} \Delta x_f \\ \Delta y_f \\ \Delta x_n \\ \Delta y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_{\text{FFX}} \\ \Delta f_{\text{FFY}} \\ \Delta f_{\text{NFX}} \\ \Delta f_{\text{NFY}} \end{bmatrix}$, 因此可得

$$\begin{cases} \Delta x_f = k_{11} \cdot \Delta f_{\text{FFX}} + k_{12} \cdot \Delta f_{\text{FFY}} + k_{13} \cdot \Delta f_{\text{NFX}} + k_{14} \cdot \Delta f_{\text{NFY}} \\ \Delta y_f = k_{21} \cdot \Delta f_{\text{FFX}} + k_{22} \cdot \Delta f_{\text{FFY}} + k_{23} \cdot \Delta f_{\text{NFX}} + k_{24} \cdot \Delta f_{\text{NFY}} \\ \Delta x_n = k_{31} \cdot \Delta f_{\text{FFX}} + k_{32} \cdot \Delta f_{\text{FFY}} + k_{33} \cdot \Delta f_{\text{NFX}} + k_{34} \cdot \Delta f_{\text{NFY}} \\ \Delta y_n = k_{41} \cdot \Delta f_{\text{FFX}} + k_{42} \cdot \Delta f_{\text{FFY}} + k_{43} \cdot \Delta f_{\text{NFX}} + k_{44} \cdot \Delta f_{\text{NFY}} \end{cases} \quad (1)$$

根据此关系式,马达 FFX 正转 n 步,其他三个马达不动,那么系数 $k_{11} = \Delta x_f/n$, $k_{21} = \Delta y_f/n$, $k_{31} = \Delta x_n/n$, $k_{41} = \Delta y_n/n$ 。相应地,只转动 FFY 可以求得系数 k_{12} 、 k_{22} 、 k_{32} 、 k_{42} ;只转动 NFX 可以求得系数 k_{13} 、 k_{23} 、 k_{33} 、 k_{43} ;只转动 NFY 可以求得系数 k_{14} 、 k_{24} 、 k_{34} 、 k_{44} 。为了提高数据的准确度,可以通过多次测量求平均值的方法来减小误差。

3) 求矩阵 \mathbf{B} 的逆矩阵 \mathbf{B}^{-1} , 满足 $\begin{bmatrix} \Delta f_{\text{FFX}} \\ \Delta f_{\text{FFY}} \\ \Delta f_{\text{NFX}} \\ \Delta f_{\text{NFY}} \end{bmatrix} = \mathbf{B}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta x_f \\ \Delta y_f \\ \Delta x_n \\ \Delta y_n \end{bmatrix}$, 就能实现根据近场和远场光斑中心坐标与基准的偏差量求出各个马达所需要转动的步数和方向。

4) 将步骤3)中的关系式输入计算机程序中,由近远场光斑中心与基准的偏差量求得各个马达需要转动的步数和方向,转动马达,实现立体空间激光光路的快速准直。

5) 此时如果准直精度不满足要求,执行步骤4),直到满足要求。

5 皮秒测量平台拍瓦激光信噪比的准直和测量实验

5.1 信噪比的准直和测量

皮秒测量平台拍瓦激光信噪比等参数的测量光路如图6所示。皮秒激光经真空压缩室缩束后,测量取样光可进入皮秒测量平台。连续光和测量取样光通过移入移出反射镜IM2选择进入皮秒测量平台。

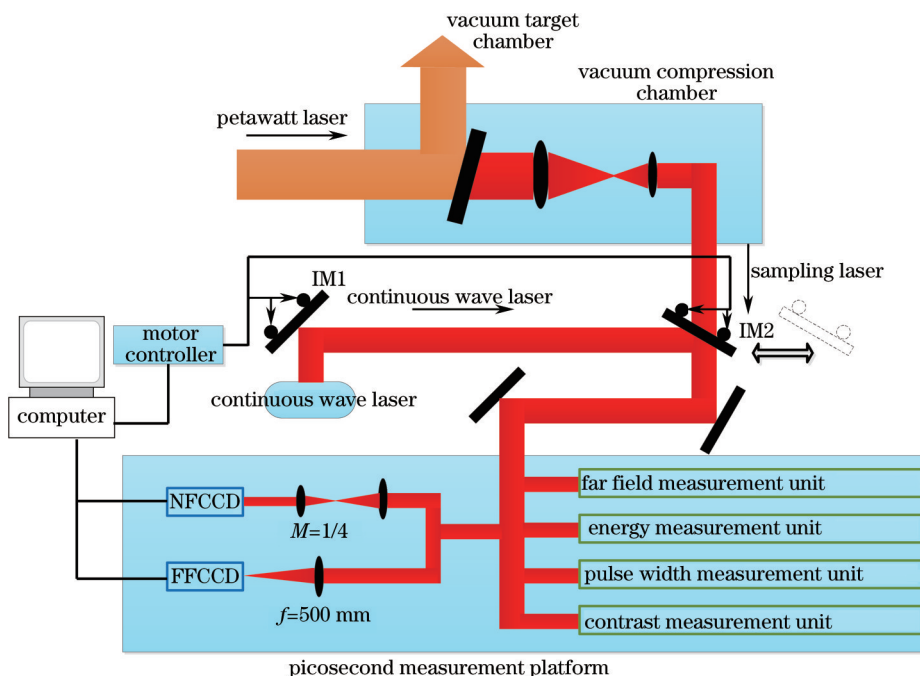


图6 皮秒测量平台拍瓦激光信噪比等参数的测量光路

Fig.6 Optical route of the picosecond measurement platform

拍瓦激光信噪比等参数的测量步骤如下:

- 1) 采集主激光小能量的近场和远场激光光斑图像。
- 2) 利用图像处理算法求出采集到的近远场激光光斑的中心位置,并定此位置为近远场的基准位置。
- 3) 移入反射镜IM2,让连续光进入皮秒测量平台,利用连续光和快速准直算法将皮秒测量平台的光路调到基准位置。
- 4) 用连续模拟光校准单脉冲信噪比等测量仪器。
- 5) 移出反射镜IM2,进行主激光大能量信噪比等参数的测量,采集测量数据。

5.2 实验结果

表1是快速准直算法的实验结果数据。图7是近远场光斑中心的准直结果,图7(a)是近场光斑中心 x_n 的准直结果,图7(b)是近场光斑中心 y_n 的准直结果,图7(c)是远场光斑中心 x_f 的准直结果,图7(d)是远场光斑中心 y_f 的准直结果。图中“□”为准直前的值,“○”为准直的基准,“△”为准直后的值。实验结果数据均是调整次数在3次以内得到的。

实验结果数据中,调整后近场光斑中心偏离基准的最大距离为5.4 pixel,远场光斑中心偏离基准的最大距离为11.2 pixel。近场CCD和远场CCD的空间分辨率为2048 pixel×2048 pixel,工作尺寸为15 mm×15 mm,因此单个像素尺寸约为7.4 μm×7.4 μm。根据近场CCD前光束的缩束比为4:1,可得准直后近场光斑中心偏离基准的最大距离为0.16 mm(5.4×7.4 μm×4),根据远场CCD前透镜的焦距 f 为500 mm,可得准直后远场光斑中心偏离基准的最大距离为0.17 mrad(11.2×7.4 μm/500 mm),满足单脉冲信噪比测量仪对准直精度的要求。

另外,马达调整3次以下,时间2 min以内,即可完成准直,满足信噪比测量实验对准直时间的要求,克服了坐标扭曲造成的人工调整时间过长的缺点。

表1 快速准直算法的实验结果数据

Table 1 Experimental results of the rapid alignment algorithm

Before alignment		After alignment	
$(\Delta x_n, \Delta y_n)$	$(\Delta x_f, \Delta y_f)$	$(\Delta x_n, \Delta y_n)$	$(\Delta x_f, \Delta y_f)$
(40, 32)	(-71, -44)	(-2, 1)	(2, 2)
(23, -13)	(-47, 18)	(-3, -1)	(-4, 7)
(-30, 16)	(59, -19)	(3, 0)	(-5, 9)
(-12, 27)	(27, -41)	(-2, 0)	(7, -2)
(34, 47)	(-61, -81)	(-2, 1)	(6, -8)
(-60, -104)	(115, 178)	(-1, 4)	(3, -9)
(34, -22)	(-64, 43)	(-2, 4)	(3, -4)
(21, -37)	(-38, 65)	(1, -5)	(-5, 10)
(-16, -21)	(42, 53)	(1, 1)	(1, 0)
(-57, 41)	(120, -57)	(2, 5)	(1, -5)
(50, 94)	(-83, -144)	(-3, 1)	(2, 1)
(10, 162)	(-3, -262)	(-3, 2)	(3, -3)

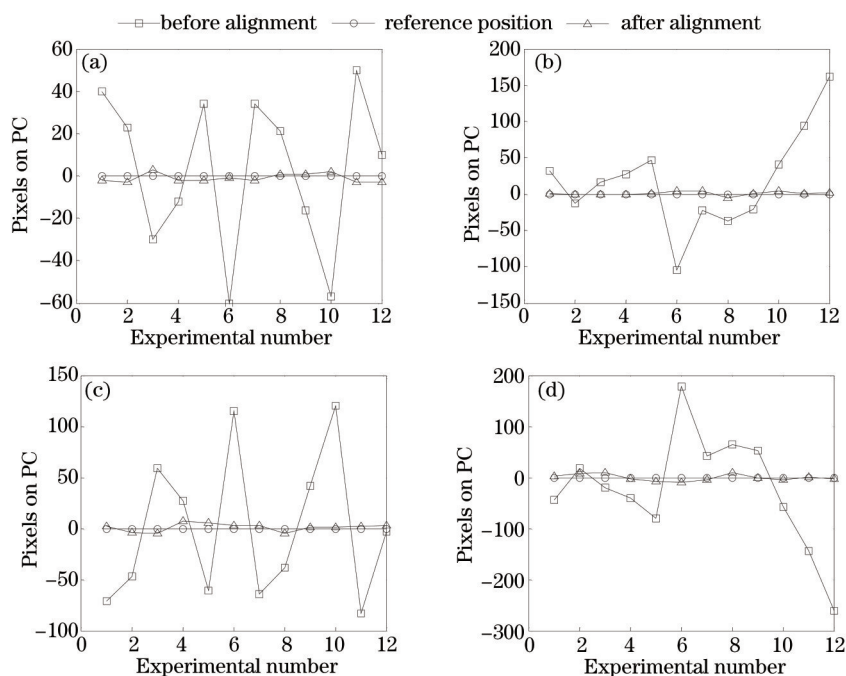


图7 近远场光斑中心的准直结果。(a) 近场光斑中心 x_n 的准直结果;(b) 近场光斑中心 y_n 的准直结果;
(c) 远场光斑中心 x_f 的准直结果;(d) 远场光斑中心 y_f 的准直结果

Fig.7 Alignment results of NF and FF laser spot centers. (a) Alignment result of x_n ; (b) alignment result of y_n ;
(c) alignment result of x_f ; (d) alignment result of y_f

在理想情况下,如果马达传动机构没有传动间隙,那么立体空间激光光路的快速准直算法可以使得马达调整1次即可满足准直精度的要求。但是实际实验时,马达机械结构之间的传动间隙引起的回程差造成调整次数要在3次以内才能满足调整要求。

6 结 论

实验证明,立体空间激光光路的快速准直算法满足了信噪比测量过程中对准直精度的要求,使得拍瓦实验时信噪比测量仪的数据获取成功率从10%提升到了90%,系统调整时间由1 h缩短到10 min,大大提升

了系统工作效率。自动准直系统为单脉冲信噪比测量实验结果最终达标(大于 10^6)提供了保障。

快速准直算法可以解决立体空间光路中出现的反射镜和近远场 CCD 图像之间的坐标系扭曲问题。皮秒测量平台自动准直技术的引入能够满足单脉冲信噪比测量仪的高精度调试要求,实现拍瓦激光信噪比的诊断和分析。快速准直算法能够根据近远场光斑中心的偏差量计算出各个马达所需走的步数和方向,相对于传统的迭代逼近算法,时间短、效率高、适用范围广。类似的模型和算法可以推广到大功率大型激光装置放大链多个近远场准直的快速自动准直中。

参 考 文 献

- Ouyang Xiaoping, Yang Lin, Peng Yonghua, *et al.*. Analysis on reliability of diagnostics system for picosecond petawatt laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0108003.
欧阳小平, 杨琳, 彭永华, 等. 皮秒拍瓦激光的参数测量系统可靠性分析[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0108003.
- Ouyang Xiaoping, Hua Neng, Yang Lin, *et al.*. A method of online diagnosing for focusing performance in picosecond parameter measurement system[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0202004.
欧阳小平, 华能, 杨琳, 等. 皮秒参数测量系统中聚焦特性的在线诊断方法[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0202004.
- Xiaoping Ouyang, Jingui Ma, Lin Yang, *et al.*. Accuracy of single-shot autocorrelation measurements of petawatt laser pulses[J]. Appl Opt, 2012, 51(18): 3989-3994.
- Zhu Ping, Xie Xinglong, Jiao Zhaoyang, *et al.*. Influence of wave-front error on temporal signal-to-noise ratio in large aperture ultrashort pulse focusing system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1032001.
朱坪, 谢兴龙, 焦兆阳, 等. 大口径超短脉冲聚焦系统波前误差对时间信噪比的影响[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1032001.
- Tang Qing, Yang Lin, Guo Yajing, *et al.*. Research of sampling and propagating characteristics of high power ultraviolet nanosecond laser pulse[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0905006.
唐清, 杨琳, 郭亚晶, 等. 高功率紫外纳秒激光脉冲的光纤取样传输特性研究[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0905006.
- Dongfang Zhang, Liejia Qian, Peng Yuan, *et al.*. Fiber-array-based detection scheme for single-shot pulse contrast characterization[J]. Opt Lett, 2008, 33(17): 1969-1971.
- Jingui Ma, Yongzhi Wang, Peng Yuan, *et al.*. Single-shot pulse-contrast measurement based on high-order quasi-phase-matching cross-correlation[J]. Opt Lett, 2012, 37(21): 4486-4488.
- Yongzhi Wang, Xiaoping Ouyang, Jingui Ma, *et al.*. First application of single-shot cross-correlator for characterizing Nd:glass petawatt pulses[J]. Chin Phys Lett, 2013, 30(2): 024201.
- Lü Fengnian, Liu Daizhong, Xu Renfang, *et al.*. Performance of image processing in beams automatic alignment system[J]. Optical Technique, 2005, 31(3): 335-337.
吕凤年, 刘代中, 徐仁芳, 等. 图像处理在光路自动准直系统中的应用[J]. 光学技术, 2005, 31(3): 335-337.
- He Wei, Chen Qinghao, Xu Renfang, *et al.*. Image transfer based automatic laser alignment technique for laser-fusion facility[J]. Acta Optica Sinica, 1999, 19(9): 1279-1283.
何为, 陈庆浩, 徐仁芳, 等. 激光核聚变装置中基于像传递的激光自动准直技术研究[J]. 光学学报, 1999, 19(9): 1279-1283.
- Zhou Wei, Hu Dongxia, Zhao Junpu, *et al.*. Optimizing on algorithm and flow of beam alignment in high power solid-state laser driver[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(1): 78-81.
周维, 胡东霞, 赵军普, 等. 高功率固体激光器光路自动准直算法与流程优化[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 78-81.
- Li Hong, Wang Dongfang, Zou Wei, *et al.*. Design of high power laser beam automatic alignment system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(10): 1002003.
李红, 王东方, 邹伟, 等. 高功率激光装置光束自动准直系统设计[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1002003.
- Zeng Peiying, Liu Daizhong, Peng Zengyun, *et al.*. Research of auto-alignment system based on ethernet[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0302009.
曾沛颖, 刘代中, 彭增云, 等. 基于以太网的自动准直系统研究[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0302009.
- Da Zhengshang, Li Dongjian, Zhou Wei, *et al.*. Mathematical model for beam automatic fast alignment[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(12): 2534-2538.
达争尚, 李东坚, 周维, 等. 光路自动准直快速调整数学模型研究[J]. 光子学报, 2008, 37(12): 2534-2538.
- Xie Yue, Tang Zhong, Guo Zhongping, *et al.*. Control arithmetic for cavity mirror and reflector in beams automatic alignment system[J]. Information and Electronic Engineering, 2010, 8(1): 111-113.
谢阅, 唐钟, 虢仲平, 等. 光路自动准直中腔镜及反射镜控制算法[J]. 信息与电子工程, 2010, 8(1): 111-113.

栏目编辑: 何卓铭