

光脉冲压缩器光栅失调的在线监测与调节方法

夏素秋^{1,2} 杨庆伟¹ 石帅旭^{1,2} 谢兴龙¹ 朱健强¹

¹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, 上海 201800

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了解决双通单平行光栅对压缩器构型里光栅失调问题,设计了一套结构简单的监测系统方案,根据系统结构进行数值模拟,通过模拟分析提出了一种新的光栅在线调节方法。考虑两块光栅不同维度的失调量,结合模拟得出监测量与失调量的关系,根据监测量变化将失调量一一分离调节,最后将真空室中的失调光栅调回理想位置。对该方法进行了误差和可行性分析,根据压缩器构型参数,得到调节精度范围为 $0.30\sim 2.78\ \mu\text{rad}$ 。

关键词 光栅; 脉冲压缩; 在线监测; 光栅调节

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201643.0801002

Online Monitoring and Adjusting Method for Misaligned Gratings of Optical Pulse Compressor

Xia Suqiu^{1,2} Yang Qingwei¹ Shi Shuaxu^{1,2} Xie Xinglong¹ Zhu Jianqiang¹

¹National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Shanghai 201800, China

²University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

Abstract To solve the misaligned grating problem in the double-pass single-parallel two-grating compressor system, a monitoring system with simple structure is designed. Numerical simulation is investigated based on the system scheme and an original method for online adjusting gratings is proposed. All dimensions of two misaligned gratings are analyzed and then separated to adjust step by step based on the relationship between monitoring variables and misadjustment until the misaligned gratings in the vacuum chamber have been adjusted back to the ideal position. The alignment error and reliability discussion of the method are presented. Based on the existed parameters of the system, the accuracy range from $0.30\ \mu\text{rad}$ to $2.78\ \mu\text{rad}$ is obtained.

Key words gratings; pulse compression; online monitoring; grating alignment

OCIS codes 120.1880; 050.2770; 320.5520

1 引言

啁啾脉冲放大(CPA)是产生高功率、超短激光脉冲最常用的方法^[1]。CPA系统中最主要的设备就是脉冲展宽器和压缩器,而广泛使用的展宽器和压缩器主要都是利用衍射光栅来构建^[2-4]。这是因为光栅具有高色散系数,能保证最大程度地产生展宽(压缩)效应,而CPA系统出射光束的质量取决于展宽器和压缩器在不同级次相位色散的匹配程度。

众所周知,当CPA系统光栅压缩器中光栅表面与栅线均平行且光栅对间距相等时,输出光束在空间上重合在一起,不会存在空间啁啾,且平行光栅对提供的负色散能够补偿啁啾脉冲的正色散^[5-6]。但在实际工

收稿日期: 2016-02-01; 收到修改稿日期: 2016-03-30

基金项目: 国家 863 计划(2014AA8044010)

作者简介: 夏素秋(1991—),女,硕士研究生,主要从事光栅压缩器调节方面的研究。E-mail: xiasuqiu@163.com

导师简介: 朱健强(1964—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事激光驱动器的总体光学设计、结构设计、相关检测技术和测控技术等方面的研究。E-mail: jqzhu@mail.shenc.ac.cn(通信联系人)

程中,为了消除不希望存在的非线性光学效应并保证输出光束的质量,压缩器通常放置在真空压缩室里面。由于光栅调整架电机系统的不稳定性、真空抽运过程的振动和空气流动等因素,光栅将不可避免地偏离原来设定的理想位置^[7-9],即出现失调,失调会使光谱成分在空间上错位,带来剩余角色散^[10]。剩余角色散会使光束不同波长成分的波面倾斜,并引入相对时间延迟。角度失调与位移失调的耦合也将导致不同波长光束所经历的光程不一致而造成色散延迟^[11]。这些因素导致相应焦面辐射强度明显降低^[10],使光栅压缩器引起啁啾脉冲的负色散量发生改变,进而影响压缩脉冲的脉冲宽度。对于大口径的高功率超短脉冲激光系统而言,这会显著影响出射光束的质量^[12],所以工程上迫切地需要能够对失调光栅位置进行监测与精确校准。

光栅压缩器的监测与精确校准,传统的方法有自准直法^[13-14]、角色散法^[15-17]、干涉法、自相关仪法和光谱法^[10,18-21]。但这些方法仅用于正向调节光栅对的位置及平行度,通常思路都是以压缩器的一个子光栅作为基准,调节其他子光栅与基准光栅的相对位置从而达到相互平行,这样带来的一个问题是如果基准光栅出现角度失调,出射光束质量就会下降。真空压缩室中的光栅对可能处于任意失调状态,所以要解决的问题是不仅要调节光栅的相对位置,而且要将所有光栅都调节至最初的理想位置。对于平行光栅对,这将存在多个维度的失调量,如何利用已有的监测设备所获得的信息反演各个维度的失调量是个极其复杂的问题。目前工程上针对这个问题提出的解决方案结构复杂或精度不高^[7,22-23]。本文通过监测设备获取远场角啁啾和延迟量的变化,采用分离变量的思想,研究不同维度的角度失调量与不同监测量的关系,由监测量变化分离出不同失调量,对分离出的失调量进行相应调节,最后将失调光栅调节回理想位置。

2 监测系统结构与数值模拟

2.1 监测系统结构

图 1 为针对双通单平行光栅对压缩器的监测系统结构,监测光经过半透半反镜 2 分束,一部分传输到自相关仪作为参考基准,一部分以一定入射角入射到光栅 1 (grating 1, G1),其衍射光束入射到光栅 2 (grating 2, G2),再由反射镜沿原光路返回,出射光束经半透半反镜 3 分束,一部分反射到自相关仪中计算与入射光的时间延迟(计算时考虑到半透半反镜等器件引起的色散),一部分通过半透半反镜 1,由法布里-珀罗干涉仪(FPI)对其进行光谱调制,选择出有固定频率间隔的几个光谱成分,使其通过消色散镜^[14]聚焦到由显微物镜和 CCD 摄像机组成的远场探测仪中,观察几个光谱成分对应焦点的相对位置变化和相对于理想位置的位移变化。

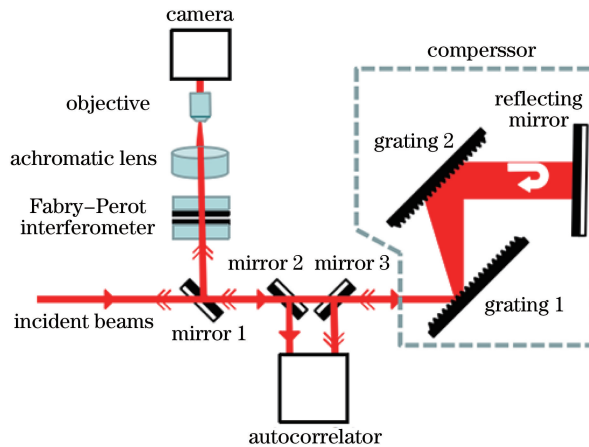


图 1 双通单平行光栅对压缩器的系统结构图

Fig. 1 Schematic diagram for the double-pass single-parallel two-grating compressor system

2.2 模型

根据图 1 结构利用光线追迹法进行模拟仿真,研究失调光栅对于出射光束空间与时间特性的影响。其中 G1 和 G2 的尺寸均为 $400\text{ mm} \times 360\text{ mm}$,光栅常数均为 1740 mm^{-1} ,光栅对间的垂直距离为 872 mm 。口径为 290 mm ,波长范围为 $808\text{ nm} \pm 40\text{ nm}$ 的圆形光束以入射角 56° 打到 G1(离光栅法线方向),然后完成

整个压缩器光路的传输。根据 FPI 和消色散镜的光谱选择功能,选择从 768~848 nm,间隔为 20 nm 的 5 个波长成分光用于仿真,中心波长为 808 nm。消色散镜的透镜焦距为 1000 mm,显微物镜放大倍率 $M=10$ 。

图 2(a)是根据图 1 装置简化的模拟构型图,整体构型的实验室坐标系为 X_0 - Y_0 - Z_0 ,光栅栅线方向与 Y_0 轴方向平行,入射光以平行于 Z_0 轴的方向入射到 G1 的光栅面产生衍射。光栅面所在坐标系称为光栅面坐标系 X - Y - Z ,如图 2(b)所示。光栅面位于 XOY 平面,其中 X 轴方向垂直栅线方向, Y 轴方向与栅线方向平行, Z 轴平行于光栅面的法线方向。入射光束入射点位于实验室坐标系的原点,光束经 G1 光栅面衍射到 G2 光栅面,此过程分为 3 个阶段:1)入射光束的入射向量从实验室坐标系转换到光栅面坐标系,遵循三维空间转换矩阵;2)在 G1 光栅面发生衍射,遵循光栅的空间衍射方程;3)将衍射光束的方向向量转换为实验室坐标系。同理,光束经 G2 衍射到平面镜同样经历上述阶段,由平面镜反射后只需将第 2 阶段调整为遵循空间反射方程,之后沿原路返回出射到像面,这里取坐标系原点所在 X_0 - Y_0 平面为像面(其中,光栅和平面镜利用解析几何的面方程理论表示)。

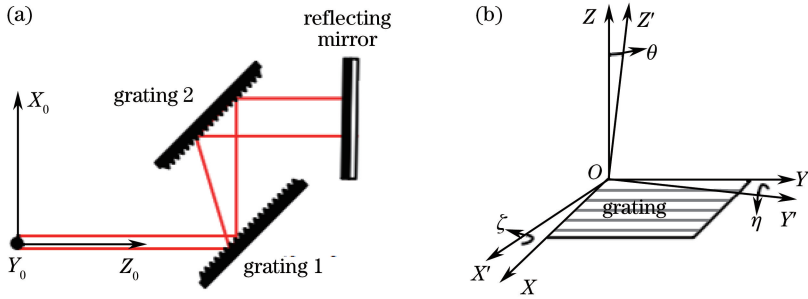


图 2 模拟所用构型的(a)实验室坐标系及(b)光栅面坐标系

Fig. 2 (a) Laboratory coordinates and (b) grating surface coordinates used in the model of simulation

入射光从实验室坐标系转换到光栅面坐标系需遵从三维空间转换矩阵

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中 α, β 和 γ 分别是光栅面坐标系绕实验室坐标系 3 个坐标轴 X_0, Y_0, Z_0 的旋转角度(按右手定则,顺时针方向为正)。

入射光单位向量为 $\mathbf{n} = (a, b, c)$, 经过空间转换矩阵后相对于光栅面坐标系的入射向量为

$$\mathbf{n}_0 = \mathbf{T} \times \mathbf{n}, \quad (2)$$

式中 $\mathbf{n}_0 = (a_0, b_0, c_0)$ 。入射光经过光栅衍射时遵循三维空间的衍射定律,其方向余弦分别为 a_0, b_0, c_0 , 衍射光束单位向量的方向余弦 a_1, b_1, c_1 , 入射光相对于光栅面坐标系的空间衍射方程为

$$a_1 = \frac{k\lambda}{d} \pm a_0, \quad (3)$$

$$b_1 = b_0, \quad (4)$$

$$c_1 = \pm \sqrt{1 - a_1^2 - b_1^2}, \quad (5)$$

式中 k 为衍射级次, λ 为入射光束波长, d 为光栅周期常数。这里 $k=1$ 。

当光栅出现失调时,即图 2(b)所示,绕 X 轴旋转 ζ , 绕 Y 轴旋转 η , 绕 Z 轴旋转 θ 时,在(1)式的基础上,在对应坐标轴的旋转角度加上失调的旋转角度即可。这样就可以依次求出经过 G1 和 G2 的光束向量。而当光束经过反射镜时,其遵循的是空间反射定律:

$$\mathbf{n}_3 = \mathbf{n}_2 + 2 \times |\mathbf{n}_f \cdot \mathbf{n}_2| \times \mathbf{n}_f, \quad (6)$$

式中 \mathbf{n}_3 为出射光束单位向量, \mathbf{n}_2 为入射光单位向量, \mathbf{n}_f 为反射镜单位法向量。

最后,根据坐标系推演可以得到的量是:当光栅处于理想或某一角度失调状态时,经 G1 后不同波长出射光束的方向向量 $\mathbf{n}_c = (a_c, b_c, c_c)$ 、在像面处相应波长焦斑点的坐标 $(x_\lambda, y_\lambda, z_0)$ 以及从入射面到像面处光束所有点各自的光程 G (像面即 CCD 的感应面及自相关仪的接收孔,为模型简单起见,将两者取在同一像面

位置上)。

压缩器系统的失调分为入射光的角度失调、G1 与 G2 的三维角度失调和光栅对之间的垂直距离失调(即位移失调)。入射光的失调发生在真空室外,较容易进行校准,而根据实际工程经验,真空室内位移失调较难发生,所以在此主要考虑光栅的三维角度失调。失调量有 6 个, ζ_1 、 η_1 、 θ_1 分别为 G1 绕 X 轴、Y 轴和 Z 轴旋转的失调角度,即为俯仰角、水平角和绕轴角; ζ_2 、 η_2 、 θ_2 则为 G2 绕 X 轴、Y 轴和 Z 轴旋转的失调角度。目的是对于处在任意角度失调状态的光栅对能够找到合适的监测量,根据监测量的变化及其与失调量的关系,将失调光栅对调节回最初的理想状态。由于光栅失调会使出射光束产生空间啁啾及时间上的脉冲延迟,以系统未失调时出射光束的理想相关参数为基准,选用以下几个量作为监测量进行观察分析:

1) δx 、 δy 分别为 G1 和 G2 失调时呈现在远场的最大波长与最小波长焦斑沿 X 轴和 Y 轴的位移之差,即 $\delta x = x_{\lambda_3} - x_{\lambda_1}$, $\delta y = y_{\lambda_3} - y_{\lambda_1}$ (其中最大波长对应参量下标表示为 3,最小波长为 1)。

2) x_{λ_0} 、 y_{λ_0} 分别为 G1 和 G2 失调时中心波长($\lambda_0 = 808 \text{ nm}$)对应焦斑相对于理想焦斑位置(坐标系原点)沿 X 轴和 Y 轴方向的位移,即: $x_{\lambda_0} = x_{\lambda_2}$, $y_{\lambda_0} = y_{\lambda_2}$ (其中中心波长对应参量下标表示为 2)。

3) τ_s 为束光程差对应的延迟,即某一波长成分由于波面倾斜造成的延迟量(束光程差为相同波长光束中各光线的光程差),由于束延迟可以被离轴抛物面反射镜补偿,故考虑以中心波长为校正目标,其剩余束延迟为

$$\tau_s = \frac{(G_{\max,3} - G_{\min,3}) - (G_{\max,1} - G_{\min,1})}{C}, \quad (7)$$

式中 G_{\max} 表示某一波长光束的光程的最大值, G_{\min} 表示最小值, C 为真空中的光速。

4) τ 为波长最长与波长最短光束平均光程的光程差对应的延迟,即为压缩器对入射啁啾脉冲的色散延迟(平均光程为某一波长成分所有光线光程的平均值),考虑失调,除去理想情况下经过压缩器系统的延迟量 τ_0 ,即

$$\tau = \frac{G_{\text{mean},3} - G_{\text{mean},1}}{C} - \tau_0, \quad (8)$$

式中 G_{mean} 表示某一波长光束的光程的最大值。

3 结果分析与调节步骤

图 3 为根据模拟得出的光栅失调时监测量与失调量的对应关系,考虑到显微物镜的放大作用,将空间上的监测量变化均乘以 M (物镜放大倍数)倍。

根据图 3 中现象以及模拟各失调量间不同情况的组合得出以下关系:

1) G1、G2 水平方向的角度失调(即 η_1 和 η_2)会引起焦斑中心波长位置的横向位移绝对值(即 $|x_{\lambda_0}|$)以及不同波长横向相对位置绝对值(即 $|\delta x|$)的拉长。

2) G1、G2 的俯仰角(即 ζ_1 和 ζ_2)和绕轴角(即 θ_1 和 θ_2)失调会引起焦斑中心波长位置的纵向位移绝对值(即 $|y_{\lambda_0}|$)及其不同焦斑点纵向距离绝对值(即 $|\delta y|$)的拉长。

3) G1、G2 水平角(η)和俯仰角(ζ)的失调会产生束延迟(即 τ_s)。

4) G2 水平角失调会产生色散延迟(即 τ),这是因为是角度失调与位移失调的耦合引起不同波长光束平均光程不一致所致。

5) 焦斑位置沿 X 轴的横向位移及相对位置的拉长仅与 G1、G2 水平角的相对不平行度有关,当 $\eta_1 = \eta_2$ 时, $|\delta x| = 0$ 且 $|x_{\lambda_0}| = 0$ 。

6) 束延迟仅仅与光栅对水平角及绕轴角的相对不平行度有关,G1、G2 水平角、绕轴角相互平行时,束延迟为 0。这是因为束延迟由束光程差导致,而束光程差仅与某波长成分光束的波面倾斜有关。

7) 小角度失调时上述监测量与失调量呈现线性关系,且彼此相互独立。

由于 6 个失调量相互独立,可以根据相互独立的现象分离出对应的失调量,针对性地调节光栅,从而一步步降低变量数。

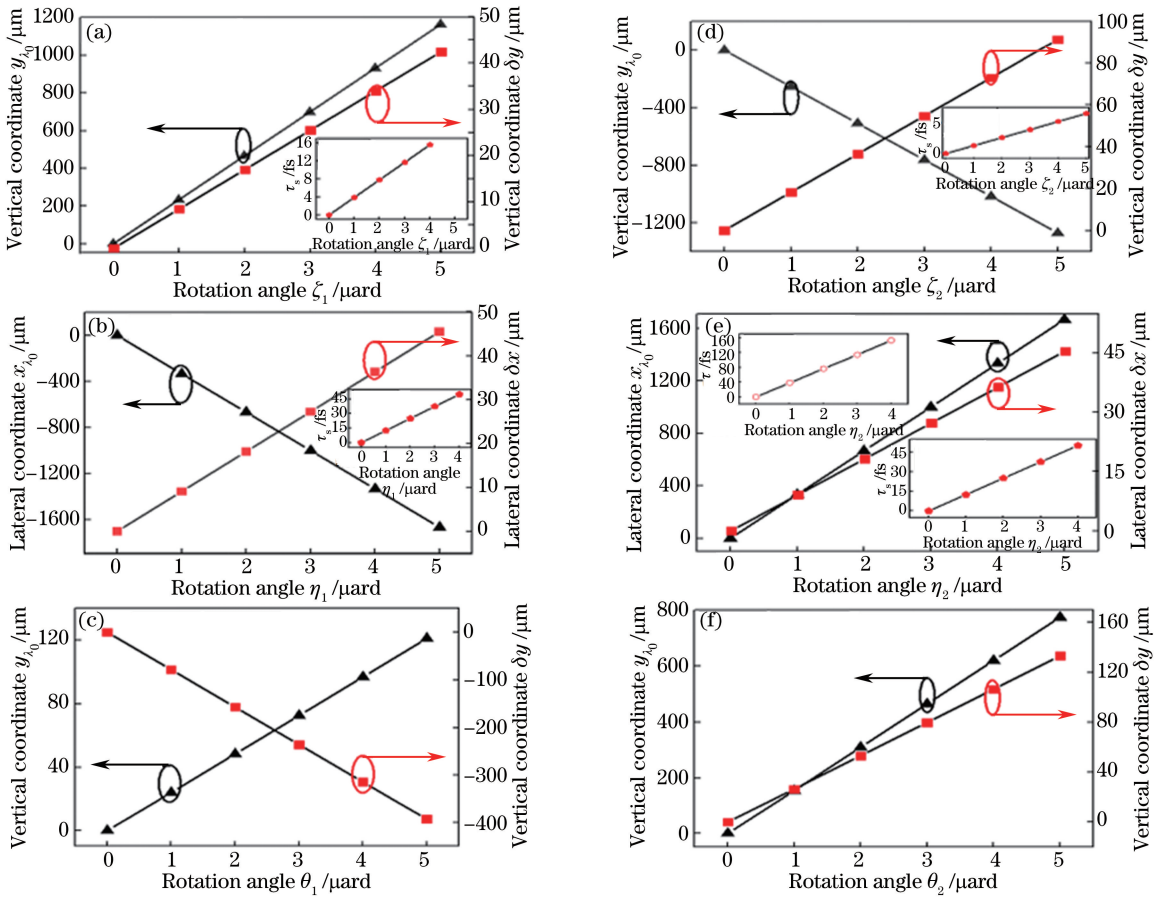


图 3 其他维度失调量为 0 时，一维失调量变化与监测量的对应关系。(a) y_{λ_0} 、 δy 和 τ_s 对应 ζ_1 ；

(b) x_{λ_0} 、 δx 和 τ_s 对应 η_1 ；(c) y_{λ_0} 、 δy 对应 θ_1 ；(d) y_{λ_0} 、 δy 和 τ_s 对应 ζ_2 ；(e) x_{λ_0} 、 δx 、 τ 和 τ_s 对应 η_2 ；(f) y_{λ_0} 、 δy 对应 θ_2

Fig. 3 Monitoring variables offsets versus one dimension misadjustment when other misadjustments are zero.

- (a) y_{λ_0} , δy and τ_s versus ζ_1 ; (b) x_{λ_0} , δx and τ_s versus η_1 ; (c) y_{λ_0} , δy and τ_s versus θ_1 ;
- (d) y_{λ_0} , δy and τ_s versus ζ_2 ; (e) x_{λ_0} , δx , τ and τ_s versus η_2 ; (f) y_{λ_0} , δy versus θ_2

假设压缩室光栅处于任意一种失调状态，对应失调角为 ζ_1 、 η_1 、 θ_1 、 ζ_2 、 η_2 、 θ_2 。根据 δx 、 x_{λ_0} 的变化调节 η_2 ，当 $|\delta x|=0$ 且 $|x_{\lambda_0}|=0$ 时， $\eta_1=\eta_2$ ，这样 6 个失调量降低为 5 个。

无法根据焦斑纵轴方向的变化分离出俯仰角和绕轴角的变化，但是从时间特性上考虑，自相关仪得出的延迟量由 2 个因素组成： $\zeta_1 \neq \zeta_2$ 导致的束延迟以及 G2 水平角失调时造成的色散延迟。以延迟量为基准共同调节 G1、G2 的水平角，当延迟量达到最小值时，此时色散延迟 $\tau=0$ ，即 $\eta_1=\eta_2=0$ 。这时未知失调量变为 4 个： ζ_1 、 θ_1 、 ζ_2 、 θ_2 。

以自相关仪算得的延迟量为基准调节 ζ_2 ，当由失调引起的延迟量为 0 时，即 $\tau_s=0$ ，此时 $\zeta_1=\zeta_2$ 。此时未知量降为 3 个： ζ_1 、 θ_1 、 θ_2 。

对此状态进行了模拟，发现以 y_{λ_0} 为基准调节 θ_2 时，如图 4 所示，当 $|y_{\lambda_0}|$ 取得最小值时， $\theta_1=\theta_2$ 。未知失调量变为 2 个： ζ_1 、 θ_1 。

此时再以 y_{λ_0} 为基准共同调节 G1、G2 的绕轴角，当 $|y_{\lambda_0}|$ 取得最小值时，G1、G2 绕轴角变为 0，最后剩下未知量 ζ_1 ，以 y_{λ_0} 为基准共同调节 G1、G2 的俯仰角即达到理想状态。调节思路复杂但操作步骤简单直观，表 1 给出了失调光栅调节步骤。

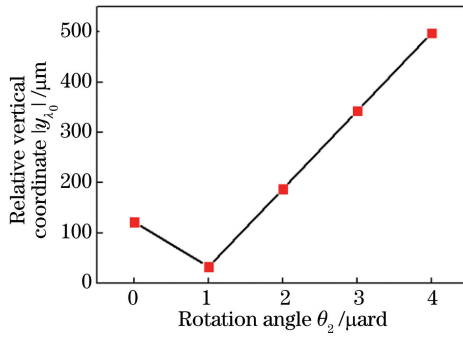


图 4 当 $\zeta_1 = \zeta_2 = 2 \mu\text{rad}$, $\eta_1 = \eta_2 = 0$ 且 $\theta_1 = 1 \mu\text{rad}$ 时, $|y_{\lambda_0}|$ 随 θ_2 的变化关系

Fig. 4 $|y_{\lambda_0}|$ versus θ_2 when $\zeta_1 = \zeta_2 = 2 \mu\text{rad}$, $\eta_1 = \eta_2 = 0$ and $\theta_1 = 1 \mu\text{rad}$

表 1 失调光栅调节步骤

Table 1 Regulating step of misaligned gratings

Angular drifts of grating	Monitoring objects	Monitoring ariables	Comment
η_2	Coordinates of the focal spot	$\delta x, x_{\lambda_0}$	Making $ \delta x , x_{\lambda_0} $ approach to 0
η_1, η_2	Pulse delay of autocorrelator	τ	Adjusting to the minimum of pulse delay
ζ_2	Pulse delay of autocorrelator	τ_s	Adjusting to the minimum of pulse delay
θ_2	Coordinate of the focal spot	y_{λ_0}	Adjusting to the minimum of $ y_{\lambda_0} $
θ_1, θ_2	Coordinate of the focal spot	y_{λ_0}	Adjusting to the minimum of $ y_{\lambda_0} $
ζ_1, ζ_2	Coordinate of the focal spot	y_{λ_0}	Making $ y_{\lambda_0} $ approach to 0

4 精度分析

所存在的误差主要为监测量与失调量之间的传递误差以及监测设备的系统误差(即 CCD 的读取误差与自相关仪的时间分辨率)。选取的 CCD 摄像机的像素尺寸为 $3.6 \mu\text{m}$, 读取误差为 3 个像素, 自相关仪的时间分辨率为 1 fs。根据调节步骤里的参考基准来确定每一维的测量精度, 以图 3 及图 4 中失调量与监测量的数值比例关系作为精度计算的数值参考。

第 1 步: 以 $\delta x, x_{\lambda_0}$ 为参考基准判断 η_1, η_2 是否平行, 考虑到衍射极限时聚焦焦斑尺寸

$$D = 1.22\lambda_0 fM / (0.5\phi), \quad (9)$$

式中 λ_0 为光束中心波长, f 为透镜焦距, ϕ 为光束口径。

通过(9)式计算得焦斑尺寸约为 $60.7 \mu\text{m}$, 而根据图 3(d), 光栅出现小幅度失调时, $\delta x < D$, 而 $x_{\lambda_0} > D$, 故以 x_{λ_0} 为参考基准观测 CCD 中的相应变化, 根据图 3(d) 中 x_{λ_0} 与 η_2 呈正比关系, 有

$$x_{\lambda_0} = K_1 \eta_2, \quad (10)$$

式中 K_1 为常量。

当 $|x_{\lambda_0}| = D$ 时, $\eta_2 = \pm 0.18 \mu\text{rad}$, 即 η_1, η_2 平行度的最小测量精度为 $\pm 0.18 \mu\text{rad}$ 。

第 2 步: 根据图 3(d) 附图中 η_2 与延迟量 τ 的关系, 即

$$\eta_2 = K_2 \tau, \quad (11)$$

式中 K_2 为常量。

结合自相关仪的时间分辨率, 当 $\tau = 1 \text{ fs}$ 时, 得到 η_2 的测量精度为 $\pm 0.30 \mu\text{rad}$, η_1 的测量精度为平行度精度和 η_2 测量精度两者相加, 即 $\pm 0.48 \mu\text{rad}$ 。以此类推, 根据图 3、图 4 中监测量与失调量的对应比例关系, 结合调节步骤逐步算得相应失调量的精度。以 CCD 上显示的沿 X 轴与 Y 轴的位移以及自相关仪的脉冲延迟量为参考基准, 依次得到最小测量精度分别为 $\zeta_1 = \pm 2.78 \mu\text{rad}$, $\zeta_2 = \pm 2.78 \mu\text{rad}$, $\theta_2 = \pm 0.79 \mu\text{rad}$, $\theta_1 = \pm 1.18 \mu\text{rad}$ 。透镜焦距变大会导致位移随角度失调更加敏感, 但相应地也会引起聚焦焦斑尺寸变大。光束口径变大可以降低焦斑尺寸并提高测量范围, 但受光栅尺寸所限, 过大的口径会造成光谱剪切。提高显微镜的放大倍率会提高测量精度, 但是会相应地降低测量范围, 所以需根据工程上对精度的要求来选择器件及相应参数。

5 结 论

对于高功率超短脉冲 CPA 激光系统,置于真空室里光栅压缩器的失调问题一直是一个棘手的问题,针对此问题提出了一种可行的在线实时调节方法。利用这种方法可以将处于任意失调状态的光栅对调节回最初的理想状态。根据空间啁啾、脉宽展宽与光栅对三维角度失调的关系,利用自相关仪和由 FPI、消色散镜、CCD 组成的远场探测仪来监测光栅的角度失调,结合相关理论和模拟结果得出监测量与失调量的关系,利用分离变量的思想提出了简单快速的调节方案。此方法可在实际工程中实现快速自动化准直。通过精度分析发现此方法调节精度范围在 $0.30\sim 2.78\ \mu\text{rad}$,能满足实际高功率超短脉冲激光系统的精度要求,这种方法同样适用于单通双平行光栅对的失调校准调节。

参 考 文 献

- 1 Maine P, Strickland D, Bado P, *et al.* Generation of ultrahigh peak power pulses by chirped pulse amplification[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1988, 24(2): 398-403.
- 2 Treacy E B. Measurement of picosecond pulse substructure using compression techniques[J]. Applied Physics Letters, 1969, 14(3): 112-114.
- 3 Martinez O E. 3000 times grating compressor with positive group velocity dispersion: Application to fiber compensation in 1.3-1.6 μm region[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1987, 23(1): 59-64.
- 4 Wang Yanhai, Liu Guocai, Yang Qingwei, *et al.* Three dimensional OPCPA numerical simulations for a petawatt class laser system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(7): 071404.
王艳海, 刘国才, 杨庆伟, 等. 用于拍瓦级激光系统的三维光参量啁啾脉冲放大的数值模拟[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(7): 071404.
- 5 Bor Z, Racz B, Szabo G, *et al.* Femtosecond pulse front tilt caused by angular dispersion[J]. Optical Engineering, 1993, 32(10): 2501-2504.
- 6 Fiorini C, Sauteret C, Rouyer C, *et al.* Temporal aberrations due to misalignments of a stretcher-compressor system and compensation[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1994, 30(7): 1662-1670.
- 7 Li Z, Wang T, Xu G, *et al.* Littrow angle based autocollimation method for precision online monitoring three-dimensional angular drifts of chirped-pulse compression-gratings[J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84(6): 063109.
- 8 Habara H, Xu G, Jitsuno T, *et al.* Pulse compression and beam focusing with segmented diffraction gratings in a high-power chirped-pulse amplification glass laser system[J]. Optics Letters, 2010, 35(11): 1783-1785.
- 9 Qiao J, Kalb A, Nguyen T, *et al.* Demonstration of large-aperture tiled-grating compressors for high-energy, petawatt-class, chirped-pulse amplification systems[J]. Optics Letters, 2008, 33(15): 1684-1686.
- 10 Pretzler G, Kasper A, Witte K J. Angular chirp and tilted light pulses in CPA lasers[J]. Applied Physics B, 2000, 70(1): 1-9.
- 11 Fiorini C, Sauteret C, Rouyer C, *et al.* Temporal aberrations due to misalignments of a stretcher-compressor system and compensation[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1994, 30(7): 1662-1670.
- 12 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.
- 13 Yuan J, Long X. CCD-area-based autocollimator for precision small-angle measurement [J]. Review of Scientific Instruments, 2003, 74(3): 1362-1365.
- 14 Yuan J, Long X, Yang K. Temperature-controlled autocollimator with ultrahigh angular measuring precision[J]. Review of Scientific Instruments, 2005, 76(12): 125106.
- 15 Liu F, Liu X L, Wang Z H, *et al.* Compression grating alignment by far-field monitoring[J]. Applied Physics B, 2010, 101(3): 587-591.
- 16 Börzsönyi A, Mangin-Thro L, Cheriaux G, *et al.* Two-dimensional single-shot measurement of angular dispersion for compressor alignment[J]. Optics Letters, 2013, 38(4): 410-412.
- 17 Zhu Pengfei, Qian Liejia, Liu Yupu, *et al.* Alignment of grating pair for single-pulse compression[J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(6): 509-512.
朱鹏飞, 钱列加, 刘玉璞, 等. 单次工作的压缩器光栅对的平行性调整[J]. 中国激光, 2002, 29(6): 509-512.

- 18 Osvay K, Kovács A P, Heiner Z, *et al.* Angular dispersion and temporal change of femtosecond pulses from misaligned pulse compressors[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, 10(1): 213-220.
- 19 Varjú K, Kovács A P, Kurdi G, *et al.* High-precision measurement of angular dispersion in a CPA laser[J]. *Applied Physics B*, 2002, 74(s1): 259-263.
- 20 Sacks Z, Mourou G, Danielius R. Adjusting pulse-front tilt and pulse duration by use of a single-shot autocorrelator[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(7): 462-464.
- 21 Zhang Suxia, Li Fangjia, Liu Jun. Research progress of self-referenced spectral interferometry on the characterization of femtosecond pulses[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(1): 010001.
张素侠, 李方家, 刘 军. 自参考光谱干涉法测量飞秒脉冲的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(1): 010001.
- 22 Yakovlev I V. Alignment of chirped-pulse compressor[J]. *Quantum Electronics*, 2012, 42(11): 996-1001.
- 23 Roberts R S, Bliss E S, Rushford M C, *et al.* Image analysis algorithms for the advanced radiographic capability (ARC) grating tilt sensor at the National Ignition Facility[C]. *SPIE*, 2014, 9216: 92160B.