

基于波前传感器的宽带光谱激光系统空间啁啾

陈 杰^{1,2}, 朱海东¹, 康 俊¹, 杨庆伟¹, 郭爱林¹, 孙美智¹, 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国家实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 分析了空间啁啾对宽带光谱超短脉冲激光系统的影响, 提出了利用波前传感器研究神光 II 5 PW (SG-II-5 PW) 装置空间啁啾的实验方法。实验中采集了宽光谱超短脉冲激光经过展宽器及多级空间滤波器后的波前特征, 测量了系统光路产生的横向空间啁啾和波前像差中心相对系统光轴的偏移量, 并通过实时调节色散调节器来消除激光装置的空间啁啾。对比分析了横向空间啁啾被消除前后的波前分布, 计算结果表明 SG-II-5 PW 装置激光光束的聚焦性能和远场能量集中度可得到显著提升。

关键词 激光光学; 超短脉冲; 空间啁啾; 波前传感器; 宽带光谱脉冲

中图分类号 O436.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0706002

Spatial Chirp of Broadband Spectrum Laser System Based on Wavefront Sensor

Chen Jie^{1,2}, Zhu Haidong¹, Kang Jun¹, Yang Qingwei¹, Guo Ailin¹,
Sun Meizhi¹, Xie Xinglong¹, Zhu Jianqiang¹

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

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

Abstract The influence of spatial chirp on broadband ultrashort pulse laser system is analyzed. An experimental method for studying spatial chirp in SG-II-5 PW setup with wavefront sensor is proposed. In experiments, the wavefront feature of broadband ultrashort pulse laser is collected after the pulse passing through the stretcher and multi-stage spatial filters, and the lateral spatial chirp and the offset of the wavefront aberration centre relative to the optical axis of the system are measured. The dispersion regulator is adjusted in real-time to eliminate the spatial chirp in the laser system. The wavefront distributions before and after the spatial chirp elimination are compared, and the theoretical simulation shows that the focusing performance and the far field energy concentration of laser from SG-II-5 PW system are improved obviously.

Key words laser optics; ultrashort pulse; spatial chirp; wavefront sensor; broadband spectrum pulse

OCIS codes 140.3295; 050.1590; 120.1880; 320.7090

1 引 言

自 20 世纪 80 年代中期啁啾脉冲放大(CPA)技术被提出以来^[1], 超短超强激光得到快速发展, 并取得了突破性的进展。目前, CPA 技术已经成为获得超短超强激光脉冲的主要方法, 其中包括脉冲展宽、放大和压缩三个关键步骤。对于 CPA 系统, 增益窄化^[2]、光谱整形^[3]和时空畸变^[4]等都是值得研究的问题。空间啁啾属于时空畸变的一种, 由 CPA 系统中的色散元件引起^[5]。展宽器是 CPA 系统中非常重要的组成部分, 是全系统色散控制的第一个环节, 关系到系统色散与压缩器的匹配^[6]、色散量的调节方式、由色散引起的空间

收稿日期: 2017-02-27; 收到修改稿日期: 2017-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(11304332)、中国科学院对外合作重点项目(GJHZ1659)

作者简介: 陈 杰(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事超短脉冲波前控制方面的研究。E-mail: chenjiecjerry@163.com

导师简介: 朱海东(1974—), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事高功率激光光束质量控制方面的研究。

E-mail: hdzhu@siom.ac.cn(通信联系人)

啁啾以及空间啁啾导致的光束聚焦空间信噪比下降^[7]等问题,因此由系统空间色散引起的空间啁啾是超短超强激光系统中需要解决的问题之一。通常可以利用色散元件(如棱镜对或者光栅)人为引入空间啁啾,如利用两块对称放置的相同棱镜或光栅可以消除角色散^[8],但这种方法无法消除空间啁啾。

若在棱镜对或者光栅对后再对称地放置一套相同的系统,则在理论上可以消除空间啁啾。但是在大型激光系统中,由于整个激光系统的链路较长,口径较大,并且包含众多光学元件,即使在搭建激光系统时进行了精细的安装和调试,由于各种环境不稳定因素的影响,系统中各个光学元件的位置和姿态仍然可能随着时间的推移发生细微的变化,例如真空光路中的元件在抽高真空的过程中,元件的位置或者姿态很可能会发生变化,导致 CPA 系统展宽或者压缩时人为引入的角色散难以被完全消除,从而产生空间啁啾。

目前空间啁啾普遍存在于大型超短超强激光系统中,空间啁啾使光束质量下降、波前像差增大、聚焦时远场焦斑形态劣化以及能量集中度下降,因此检测并消除残余空间啁啾是超短超强激光系统中一项重要的研究内容。本文提出一种新的基于哈特曼波前传感技术的空间啁啾研究方法。该方法从空间啁啾的时空畸变理论出发,计算得到大口径激光系统中残余空间色散和空间啁啾导致的光束质量劣化情况;基于神光 II 5 PW (SG-II-5 PW)装置进行了宽带光谱波前特征的采集,分别得到含横向空间啁啾的波前分布和消除空间啁啾后的波前分布,并对比分析了两者的特征,模拟计算结果表明焦斑形态得到改善,系统聚焦能力和远场能量集中度得到显著提升。

2 空间啁啾理论模型

在研究超短脉冲的电场时,通常假设脉冲电场的时域函数和空域函数是相互独立的。但是,当脉冲发生时空耦合时,这种假设便不再成立^[9]。根据 Akturk 等^[10]提出的超短脉冲时空畸变理论,可以在空间域和频域中描述时空啁啾脉冲,此时一个空间域和频域都为高斯型分布的无空间啁啾脉冲可以表示为

$$E(x, \omega) = E_x(x)E_\omega(\omega), \quad (1)$$

式中 x 为空间位置, ω 为频率, $E_x(x)$ 为空间振幅, $E_\omega(\omega)$ 为频谱振幅。 $E_x(x)$ 和 $E_\omega(\omega)$ 为可分离变量。由于超短脉冲系统中光栅刻线通常垂直于地面,因此假设空间啁啾只存在于 x 方向。当存在空间啁啾时, $E(x, \omega)$ 不能简单地写成(1)式中的可分离变量形式,此时需要引入两个新的参数(频率梯度 $\nu = d\omega_0/dx$ 和空间色散 $\zeta = dx_0/d\omega$, 其中 ω_0 和 x_0 分别为中心频率和空间位置)来表示。

由于大部分空间啁啾是在引入角色散后产生的^[11],假设光束经过色散元件后产生的角色散 $\beta = d\theta_0/d\omega$, 传播距离为 L , 则光束产生的空间色散量 $\Delta\zeta = L\beta$, $\Delta\zeta$ 由光学系统决定。

当系统产生空间色散时,光束电场不能用(1)式描述,而应表示为

$$E(x, \omega) = E_x(x)E_\omega(x - \zeta\omega). \quad (2)$$

理想情况下,脉冲光束的光谱和空间分布都为高斯型,这与实验中 SG-II-5 PW 装置的输出特性相符,有

$$\begin{cases} E_\omega(\omega) = \exp\left[-\left(\frac{\omega}{\Delta\omega}\right)^2\right] \\ E_x(x) = \exp\left[-\left(\frac{x}{\Delta x}\right)^2\right] \end{cases}, \quad (3)$$

式中 $\Delta\omega$ 为频率带宽, Δx 为光束空间宽度。

此时,一个带有空间色散的脉冲电场在 $x-\omega$ 域中可以表示为

$$E(x, \omega) = E_0 \exp\left[-\left(\frac{\omega}{\Delta\omega}\right)^2\right] \exp\left[-\left(\frac{x - \zeta\omega}{\Delta x}\right)^2\right], \quad (4)$$

或用频率梯度 ν 表示为

$$E(x, \omega) = E_0 \exp\left\{-\left[\frac{x}{(\Delta x')^2}\right]\right\} \exp\left[-\left(\frac{\omega - \nu x}{\Delta\omega'}\right)^2\right], \quad (5)$$

其中

$$\nu = \frac{\zeta}{\zeta^2 + \left(\frac{\Delta x}{\Delta\omega}\right)^2}, \quad (6)$$

式中 E_0 为电场振幅, $\Delta x'$ 为空间啁啾引起的光束空间展宽量。 $\Delta x'$ 可表示为

$$\Delta x' = \left[\frac{1}{(\Delta x)^2} - \left(\frac{\nu}{\Delta \omega} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (7)$$

由空间啁啾造成的光束带宽下降量可表示为

$$\Delta \omega' = \left[\frac{1}{(\Delta \omega)^2} + \frac{\xi^2}{(\Delta x)^2} \right]^{-1/2} \quad (8)$$

根据(6)~(8)式,可以计算得到中心波长为 808 nm 的 SG-II-5 PW 装置中由空间色散和频率梯度造成的光束带宽下降和空间展宽的变化趋势,理论计算结果如图 1 所示。可以看出,只有将系统中残余的空间色散与横向空间啁啾消除,才能保证光束的传输与聚焦性能,若宽带光谱中某个频率成分发生较大横向偏移,将使光束质量明显下降。对于中心波长为 808 nm 的 SG-II-5 PW 装置,若在保证归一化带宽在 99% 以上,则需要将长波段和短波段(相对中心波长约为 30 nm)的空间相对偏差控制在全口径的 1.9% 以内。

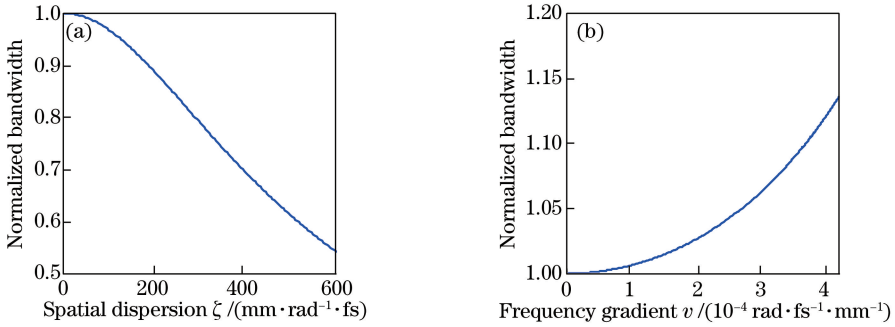


图 1 理论计算结果。(a)空间色散与归一化带宽的关系;(b)频率梯度与归一化光束宽度的关系

Fig. 1 Theoretical calculation results. (a) Relationship between spatial dispersion and normalized bandwidth; (b) relationship between frequency gradient and normalized bandwidth

3 横向空间啁啾的测量与模拟聚焦特性分析

系统种子源为一台飞秒激光器,激光脉冲宽度为 10 fs,中心波长为 808 nm,半峰全宽(FWHM)约为 90 nm,重复频率为 75 MHz,种子源振荡器产生的飞秒脉冲时间波形和光谱分布如图 2 所示。SG-II-5 PW 超短脉冲激光系统的光路示意图如图 3 所示。

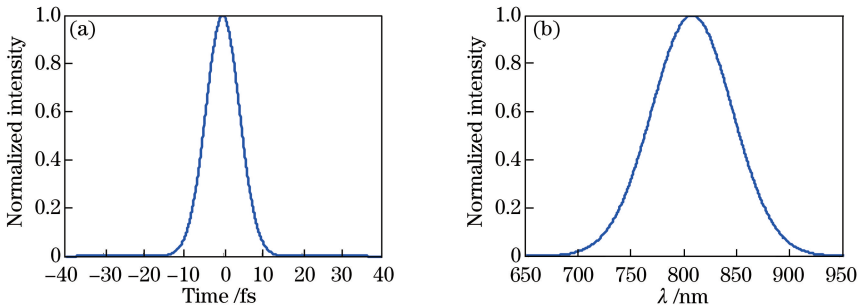


图 2 种子源振荡器产生的飞秒脉冲。(a)时间波形;(b)光谱分布

Fig. 2 Femtosecond pulse generated by seed source oscillator. (a) Time-domain waveform; (b) spectrum distribution

振荡器输出的光束经过展宽器后被展宽成纳秒级脉冲,以便后续光学参量啁啾脉冲放大(OPCPA)链路对脉冲进行放大。展宽后的脉冲经过一个独立的色散调节器,该调节器采用四通微调压缩器构型对光路中产生的色散以及空间啁啾进行补偿。通过展宽器和色散调节器的光束再经 3 级 OPCPA 和 5 级空间滤波器进行扩束。第 5 级空间滤波器 SF5 输出光束的脉冲宽度为 2 ns,光谱宽度为 90 nm,光束口径从 3 mm 扩展到 290 mm,光谱在空间域和频域的分布都为高斯型,满足(3)式。

由中国科学院光电技术研究所研制的自适应光学系统对空间滤波器 SF5 出射的光束进行波前测量和校正,采用 22×22 子孔径阵列的哈特曼波前传感器进行波前测量,波前校正器由 77 个驱动单元的变形镜构

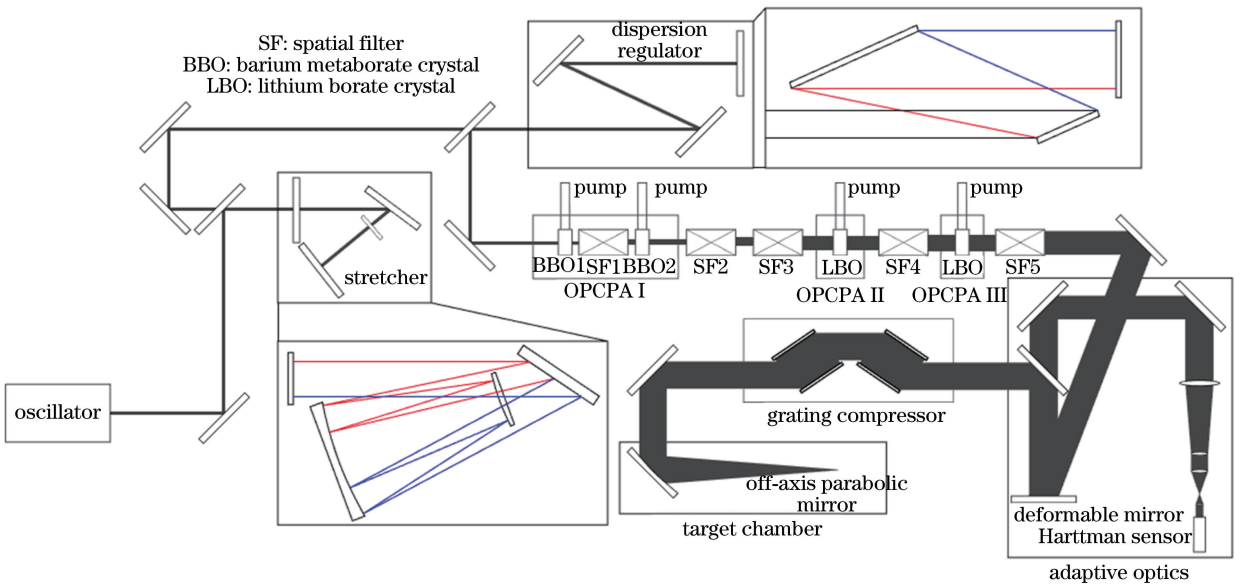


图 3 SG-II-5 PW 超短脉冲激光系统的光路示意图

Fig. 3 Light path diagram of SG-II-5 PW ultrashort pulse laser system

成。经过波前校正的光束经大型光栅压缩器压缩后,由离轴抛物面镜在靶室聚焦。

由于系统中存在空间啁啾,不同波长的光的空间位置在横向会发生偏移,因此也会引入额外的像差。在实验中,利用波前传感器分别对中心波长、短波段和长波段的光束进行测量。首先测量了中心波长为 808 nm 的波前,再分别测量了 780 nm 和 830 nm 的波前,得到的各波段波前特征分布如图 4 所示,实验中波前误差用峰谷(PV)值衡量,PV 值可表示波前畸变的起伏程度。

从图 4 中可以明显看出,系统色散产生的横向啁啾导致不同波段的波前分布非常不均匀,并且引入了额外的像差。780 nm 处的波前表现为会聚的离焦像差,830 nm 处的波前表现为发散的离焦像差,且在短波段和长波段存在不同程度的反方向横向偏移。波前像差中心偏离系统光轴,造成光束质量下降,这种横向空间啁啾使光束在宽带光谱聚焦情况下的焦斑形态变差,能量集中度下降,空间信噪比降低。利用计算机进行模拟

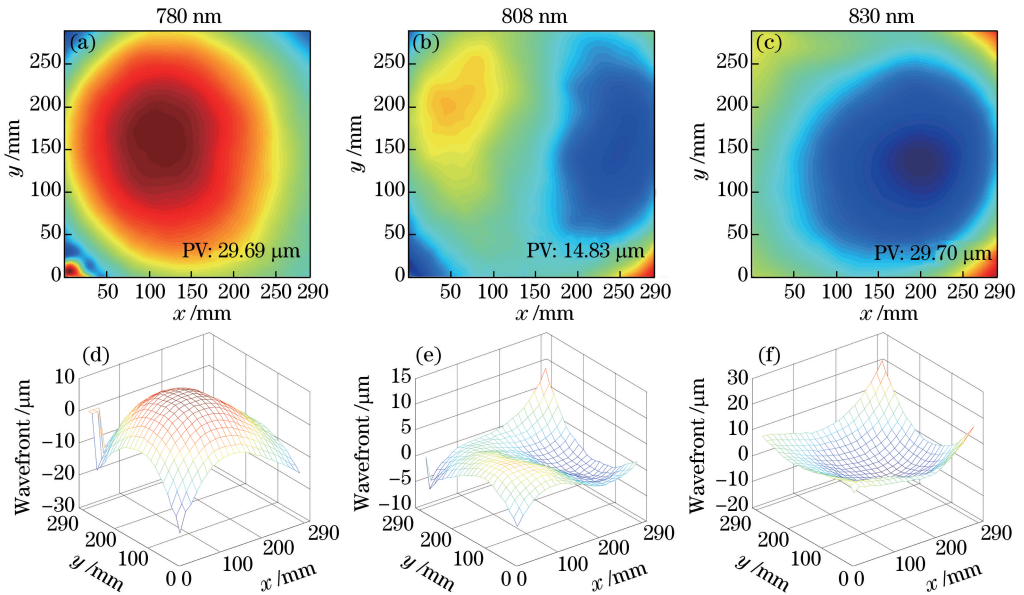


图 4 波前传感器测量得到不同波段下的波前特征分布。(a)(b)(c)二维分布;(d)(e)(f)三维分布

Fig. 4 Wavefront characteristic distributions at different wavelengths measured by wavefront sensor.

(a)(b)(c) Two-dimensional distribution; (d)(e)(f) three-dimensional distribution

计算,得到的带有横向空间啁啾的光束焦斑形态如图 5(a)所示。通过焦斑形态计算得到的远场能量集中度曲线如图 5(b)所示。可以看出,能量集中度分别为 50%和 95%时对应的焦斑半径分别为 $47\ \mu\text{m}$ 和 $160\ \mu\text{m}$ 。

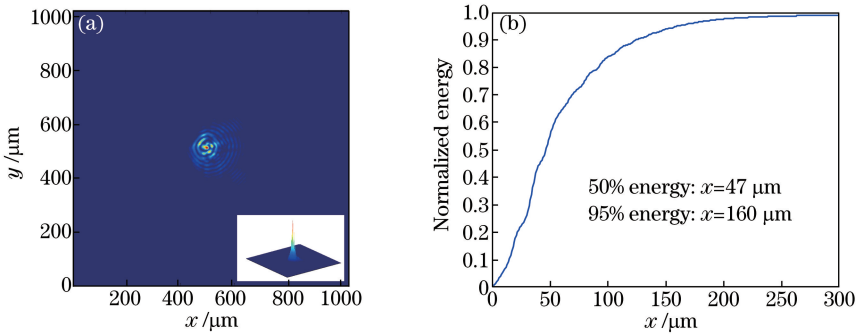


图 5 带有横向空间啁啾的光束聚焦模拟结果。(a)焦斑形态;(b)远场能量集中度

Fig. 5 Simulation results of beam focusing with transverse spatial chirp. (a) Shape of focal spot; (b) far-field energy concentration

为了消除空间色散引起的横向啁啾,必须精调图 3 中的色散调节器。该色散调节器是一个微调压缩器的四通结构,由两块光栅和一块反射镜组成。调节色散调节器并监控波前传感器测量到的波前分布,使短波段和长波段的波前离焦中心与系统光轴同轴;将色散引起的横向空间啁啾降至最低,再次测量主激光脉冲不同波段的波前分布情况,得到消除横向空间啁啾后不同波段的波前分布情况,如图 6 所示。

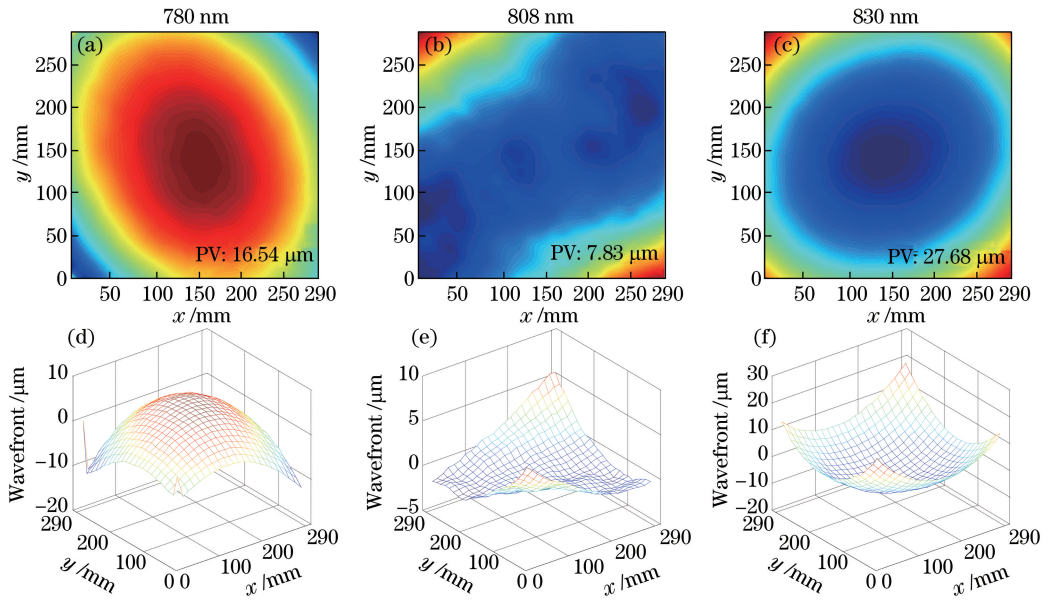


图 6 消除横向空间啁啾后不同波段波前的分布情况。(a)(b)(c)二维分布;(d)(e)(f)三维分布

Fig. 6 Wavefront distributions at different wavelengths after eliminating transverse spatial chirp.

(a)(b)(c) Two-dimensional distribution; (d)(e)(f) three-dimensional distribution

对比分析图 4、6 的实验结果可以看出,由于存在空间啁啾,图 4 中脉冲光谱在 $780\ \text{nm}$ 处的离焦像差中心向左偏移,而 $830\ \text{nm}$ 处的离焦像差中心向右偏移,通过系统色散元件的调节以及波前传感器的实时监控反馈,可使图 6 中的脉冲光谱在 $808\ \text{nm}$ 处的波前像差中心处于光束光轴位置,并且使 $780\ \text{nm}$ 和 $830\ \text{nm}$ 处对应像差的离焦中心向光束几何中心聚拢,横向偏移基本消失,不同波段的波前像差中心和系统光轴重合。实验中各波长具体的相对偏移量如表 1 所示(系统光束的全口径为 $290\ \text{mm} \times 290\ \text{mm}$)。

由表 1 和相对偏移量的计算结果可知, $780\ \text{nm}$ 和 $830\ \text{nm}$ 波前像差中心相对系统光轴的偏移量从 $-26\ \text{mm}$ 和 $54\ \text{mm}$ 分别下降至 $3\ \text{mm}$ 和 $1\ \text{mm}$,横向空间啁啾基本被消除。利用波前传感器可以将各波段的波前中心调整至大口径系统的光轴处,横向空间啁啾引起的系统波前分布不均匀得到显著改善,不同波段的横向偏移误差被控制在可接受的范围(约 1%)以内。

表 1 不同波段波前的中心位置与相对系统光轴偏移量

Table 1 Center position and offset relative to system axis of wavefront at different wavelengths

Case	Center position at	Center position	Δx at		Offset at	
	780 nm /mm	at 830 nm /mm	780 nm /mm	830 nm /mm	780 nm /%	830 nm /%
With spatial chirp	119	199	-26	54	-8.97	18.62
Without spatial chirp	148	146	3	1	1.03	0.34

由图 6(b)可见,脉冲中心波长 808 nm 处的波前畸变主要源于系统的像差,以像散和离焦为主要特征。消除横向空间啁啾后的光束聚焦模拟结果如图 7 所示。

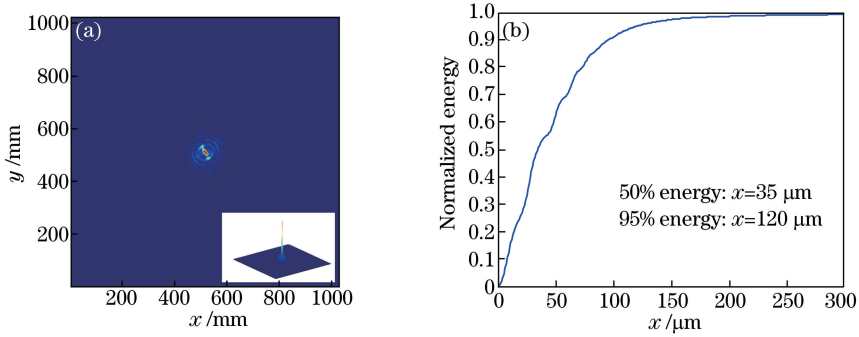


图 7 消除横向空间啁啾后的光束聚焦模拟结果。(a)焦斑形态;(b)远场能量集中度

Fig. 7 Simulation results of beam focusing without transverse spatial chirp. (a) Shape of focal spot; (b) far-field energy concentration

由图 7(b)可以看出,消除空间啁啾后聚焦的光斑质量相比调整前得到明显改善,聚焦功率密度得到显著提升。当远场能量集中度为 50%时,对应的半径减小了 25.53%;当远场能量集中度为 95%时,对应的半径减小了 25%;模拟计算结果表明远场环围能量集中度得到显著提高。由中心波长为 808 nm 的波前分布 [图 6(b)]可以看出,系统对角线上存在着明显的像散,导致聚焦后的光斑形态仍具有一定程度的扩散。待 SG-II-5 PW 宽带激光系统完成全链路贯通后,利用自适应光学对系统像差进行实时校正,则可在实验中进一步改善离轴镜聚焦后的远场焦斑形态和远场能量集中度。

4 结 论

通过分析空间啁啾产生的原因,结合实验与理论计算分析了超短脉冲激光系统中空间啁啾对系统性能的影响。基于 SG-II-5 PW 超短超强激光系统,提出了利用哈特曼波前传感器对系统空间啁啾进行实时测量,定量分析了宽光谱飞秒光源经过展宽器、小型色散调节压缩器、空间光路以及多级空间滤波器等等长距离系统链路传输后不同波段的波前分布特征。利用波前传感器监测并调整色散调节器后,将不同波段的波前中心横向偏移减小至系统光路口径的 1% 以下,从而保证了光束的传输性能。通过模拟计算可得到脉冲远场焦斑形态与能量集中度分布曲线,计算结果表明消除空间啁啾后焦斑形态得到明显改善,相同远场能量集中度下的焦斑半径减小了约 25%,聚焦性能明显得到提升。

致谢 感谢中国科学院光电技术研究所的相关研究人员与本课题组在研究过程中的有益探讨以及研制提供了自适应光学波前检测设备。

参 考 文 献

[1] Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. Optics Communications, 1985, 55(6): 447-449.

[2] Liu Lanqin, Peng Hansheng, Wei Xiaofeng, et al. Compensation of gain narrowing by using AOPDF in high-power ultra-short pulse laser systems[J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(6): 2764-2768.

刘兰琴, 彭翰生, 魏晓峰, 等. 高功率超短脉冲激光系统中用 AOPDF 实现增益窄化补偿的实验研究[J]. 物理学报,

- 2005, 54(6): 2764-2768.
- [3] Guo Ailin, Yang Qingwei, Xie Xinglong, *et al.* Chirped pulse spectrum shaping by spatial grating with variable line-space[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(2): 272-274.
郭爱林, 杨庆伟, 谢兴龙, 等. 变栅距光栅实现啾啾脉冲光谱整形[J]. *光学学报*, 2007, 27(2): 272-274.
- [4] Akturk S, Gu X, Bowlan P, *et al.* Spatio-temporal couplings in ultrashort laser pulses[J]. *Journal of Optics*, 2010, 12(9): 093001.
- [5] Akturk S, Gu X, Zeek E, *et al.* Pulse-front tilt caused by spatial and temporal chirp[J]. *Optics Express*, 2004, 12(19): 4399-4410.
- [6] Wang Hongying, Liu HongJun, Li Xiaoli, *et al.* Dispersion control in broadband optical parametric chirped-pulse amplification laser system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(7): 1338-1343.
王红英, 刘红军, 李小莉, 等. 宽带光学参变啾啾脉冲放大系统的色散控制[J]. *光学学报*, 2007, 27(7): 1338-1343.
- [7] 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.
- [8] Fork R L, Martinez O E, Gordon J P. Negative dispersion using pairs of prisms[J]. *Optics Letters*, 1984, 9(5): 150-152.
- [9] Akturk S, Gu X, Gabolde P, *et al.* The general theory of first-order spatio-temporal distortions of Gaussian pulses and beams[J]. *Optics Express*, 2005, 13(21): 8642-8661.
- [10] Gu X, Akturk S, Trebino R. Spatial chirp in ultrafast optics[J]. *Optics Communications*, 2004, 242(4): 599-604.
- [11] 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.