

文章编号: 0253-2239(2006)09-1372-5

# 近红外瞬态脉冲波前高精度干涉检测技术\*

刘 东<sup>1</sup> 杨甬英<sup>1</sup> 夏佐堂<sup>1</sup> 陈阳杰<sup>1</sup> 张小民<sup>2</sup> 陈 波<sup>2</sup> 秦兴武<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)  
(<sup>2</sup> 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621000)

**摘要:** 惯性约束聚变(ICF)系统中高能瞬态脉冲激光由于脉冲时间短、能量高、波前畸变大,通常的检测方法难于检测脉冲激光波前。提出了一种基于空间相位调制技术可用于近红外瞬态波前高精度检测的环形径向剪切干涉仪。该系统可以以 $\phi 30\sim 150$  mm的圆瞳和方瞳口径、对波长为1064 nm的近红外纳秒级脉宽的脉冲激光波前实现共路、无参考面的瞬态、高精度的检测。系统的波前重构理论经过计算机仿真验证,精度达 $1/1000\lambda$ 以上;检测结果与ZYGO数字波面干涉仪进行了比对,峰谷值、均方根值均优于 $1/15\lambda$ ,并具有很好的可重复性。该系统目前已用于惯性约束聚变系统的脉冲检测,并且该技术适用于各种可见光和红外波段激光。

**关键词:** 光学测量; 干涉仪; 波面检测; 径向剪切; 空间相位调制

中图分类号: TH741.1 文献标识码: A

## Measurement of Transient Near-Infrared Laser Pulse Wavefront with High Precision by Radial Shearing Interferometer

Liu Dong<sup>1</sup> Yang Yongying<sup>1</sup> Xia Zuotang<sup>1</sup> Chen Yangjie<sup>1</sup> Zhang Xiaomin<sup>2</sup>  
Chen Bo<sup>2</sup> Qin Xingwu<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027)  
(<sup>2</sup> Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621000)

**Abstract:** Its hard to measure the transient pulsed laser wavefront in inertial confinement fusion (ICF) system by the conventional methods for its short pulse width, large energy, high power and large distortion. An circular radial shearing interferometer based on spatial phase modulation is proposed to measure the transient near infrared laser pulse wavefront with high precision. Transient, highly precise measurement for near-infrared laser pulse wavefront, with pulse width of nanometer scale and central wavelength of 1064 nm, can be carried out with common-path and no reference plane with round and rectangular aperture ranging from  $\phi 30\sim 150$  mm. Theory of wavefront reconstruction has been validated by the computer simulation, and an error less than  $1/1000\lambda$  is obtained. Compared with the results of ZYGO interferometer, an error less than  $1/15\lambda$  for both peak-valley and root mean square value, is gained with good repeatability. The system has already been used in the ICF system to test the pulsed laser wavefront, and can also be applied to other visible and infrared lasers.

**Key words:** optical measurement; interferometer; wavefront measurement; radial shearing; spatial phase modulation

## 1 引 言

惯性约束聚变系统中对激光波前的要求非常高,但是由于其激光脉冲时间短、能量高、畸变量大,通常的波面检测方法不能很好地检测激光波前。利用压电体进行时间相位调制<sup>[1]</sup>测量技术一般只能对

连续激光的波面进行测量;哈特曼-夏克(Hartman-Shack)传感器检测相位的分辨率受限;横向剪切<sup>[2]</sup>干涉仪需要两路光学系统以产生绝对正交的沿 $x$ 、 $y$ 方向剪切的横向剪切干涉图,在对瞬态、实时性要求高的场合,要求能同步采集到两幅干涉图,整个系统

\* 国家自然科学基金联合基金(100176026)资助课题。

作者简介: 刘 东(1982~),男,辽宁大连人,浙江大学现代光学仪器国家重点实验室博士研究生,主要从事光学检测、纳米测试的研究。E-mail: nanotesting@gmail.com

收稿日期: 2005-10-18; 收到修改稿日期: 2006-02-16

结构比较复杂。而径向剪切干涉仪<sup>[3]</sup>由于其共路、无需专门参考面、结构简单,由单幅干涉图即可进行波面检测,并且具有较高的精度,所以其在瞬态、实时的波面检测中具有较大优势。空间相位调制<sup>[4]</sup>检测波前可以很好地抑制噪声,把它与径向剪切技术结合起来,就可以得到信号质量优良的干涉图,从而可以进行高精度的检测。

本文主要研究一种可用于瞬态(仅单幅干涉图)激光波前实时检测的径向剪切干涉体系及其数据处理技术(以下简称近红外干涉仪)。该系统可以以 $\phi 30\sim 150\text{ mm}$ 的圆瞳和方瞳口径,对纳秒级脉宽的近红外脉冲激光实现共路、无参考面的高精度测量;系统的波前重构理论经过计算机仿真验证,仿真精度超过 $1/1000\lambda$ ;该系统检测结果与 ZYGO 数字波面干涉仪进行了比对,检测结果均方根值优于 $1/15\lambda$ ,并有很好的重复性;目前该系统已在惯性约束聚变系统中使用,并得到了高精度的测量结果。

## 2 瞬态波前径向剪切干涉原理及数据处理流程

瞬态波前径向剪切干涉系统原理及数据处理流程如图 1 所示。环形径向剪切系统由分光板 S、反射镜  $M_1$ 、 $M_2$  和一个伽利略系统组成,其中伽利略系统产生的虚焦点可以防止高能激光产生电离,并有利于系统装调。图中,被测波前经分光板分成两路进入由一伽利略望远镜系统构成的环形径向剪切干涉系统,透射光路(虚线)经 S- $M_2$ - $M_1$ - $L_2$ - $L_1$  直接透过分光板,由于  $f'_1 > f'_2$ ,形成扩束光束;而经分光板反射的一路光束(实线)逆向传播后再由分光板反射形成缩束光束。至此,两扩、缩束光束形成径向剪切波面  $\phi_0(\rho, \theta)$ <sup>[5,6]</sup>:

$$\phi_0(\rho, \theta) = W(\rho, \theta) - W(\beta\rho, \theta), \quad (1)$$

其中  $W$  为被测波前,  $\rho$  和  $\theta$  为极坐标的极径和极角,  $\beta$  为径向剪切比,且  $\beta = f'_2/f'_1$ 。

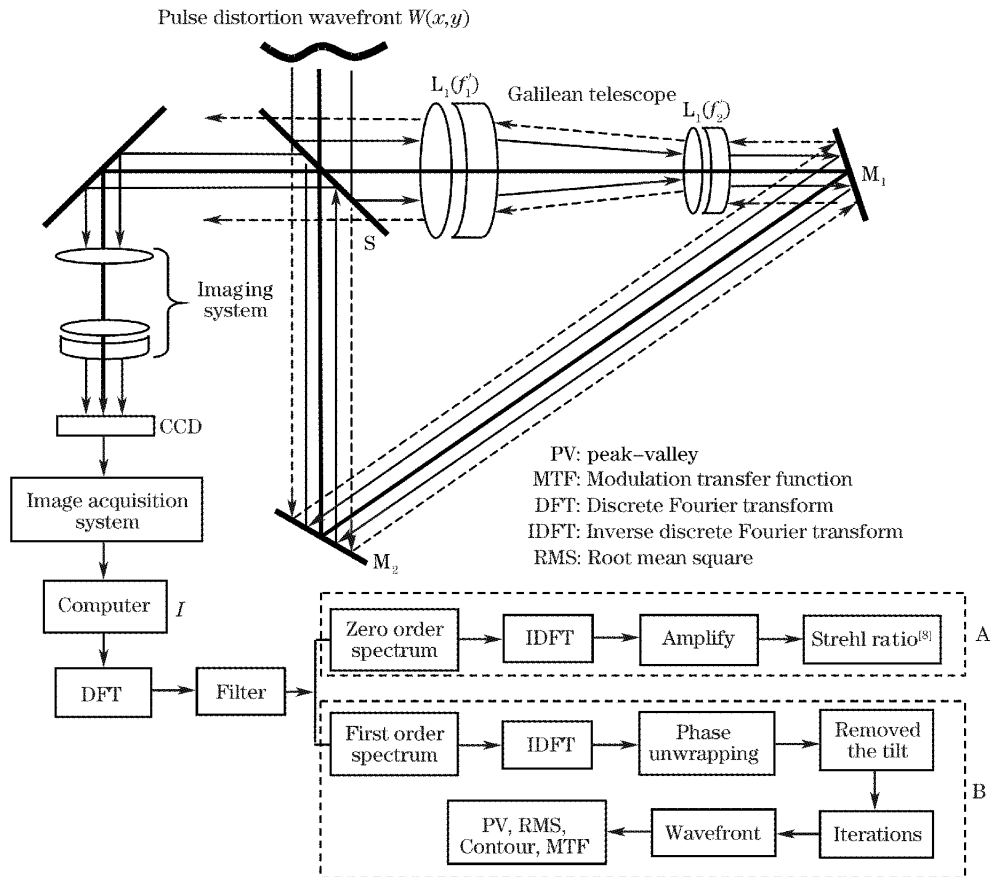


图 1 系统框图及光学信息处理过程

Fig. 1 System layout and procedure of optical information processing

此时,将分光板 S 倾斜一个角度  $\alpha$ ,就决定了空间相位调制的载波的大小  $f_0$ ,这是一种线性载波方式,剪切波面信息便加载到了载波上,该带有线性载

波的条纹信息经成像系统成像在 CCD 上,图像采集系统将灰度信号转换成数据量送入计算机,得到径向剪切干涉图的数据(至图中 I 模块)。

通常,干涉图的强度分布可表示为

$$i(x,y) = a(x,y) + b(x,y)\cos[2\pi f_0 x + \phi(x,y)], \quad (2)$$

其中  $a(x,y)$  和  $b(x,y)$  为光强变量,  $\phi(x,y)$  为由于干涉图所表征的相位信息,  $f_0$  为由两个波前的倾角  $\theta$  决定的空间载波频率,且  $f_0 = \sin \theta/\lambda$ 。

空间载波频率  $f_0$  的引入,可以有效地抑制噪声,提高信噪比。 $f_0$  的选择从理论上讲,上限受奈奎斯特采样定理限制,下限受被检波前经傅里叶变换后在频谱面上所产生的一级谱宽度限制。同时,  $f_0$  的增大可以增加承载信息的能力,但会影响测量精度。所以,选择合适的  $f_0$  是很重要的。

根据全息理论,(2)式可写为<sup>[7~9]</sup>

$$i(x,y) = a(x,y) + c(x,y)\exp(i2\pi f_0 x) + c^*(x,y)\exp(-i2\pi f_0 x), \quad (3)$$

其中

$$c(x,y) = \frac{1}{2}b(x,y)\exp[i\phi(x,y)],$$

\* 表示取共轭复数。 $i(x,y)$  对  $x$  的傅里叶变换为

$$I(f,y) = A(f,y) + C(f-f_0,y) + C^*(f+f_0,y), \quad (4)$$

上式中,右边第一项为未经波面调制的背景光,第二及第三项为含有相位信息中心在  $\pm f_0$  处的频谱。利用带通滤波器取出正一级分量,运用傅里叶变换平移定理,将一级频谱移至中心并作傅里叶逆变换

$$c(x,y) = \mathcal{F}^{-1}\{C(f,y)\}, \quad (5)$$

即得到剪切波面相位为

$$\phi_0(x,y) = \arctan\left\{\frac{\text{Im}[c(x,y)]}{\text{Re}[c(x,y)]}\right\}, \quad (6)$$

其中 Im 和 Re 表示取复数的虚、实部。

(4)式~(6)式的过程,即完成了图 1 中离散傅里叶变换→滤波→移频→提取一级谱→逆离散傅里叶变换的处理过程。

由于剪切波面相位是用傅里叶变换的反正切求得,而反正切函数的主值范围是  $-\pi \sim +\pi$ , 大于  $2\pi$

的波面相位变化将产生相位跳变,所以,需要建立一个相位补偿函数,把它加在不连续的相位分布上,使之成为连续分布,即图 1 中消跳变过程 II。

由于干涉图孔径有限,  $i(x,y)$  在进行二维傅里叶变换之前需用滤波函数汉明(Hamming)函数(圆瞳)或二维三角函数(方瞳)对其进行滤波,以防止频率泄漏效应。

同时,由于所有计算量都是离散的,在把  $C(f-f_0,y)$  移频到中心时,仍存在移频误差,在波面上表现为一个微小的倾斜,所以需要图 1 中消倾斜模块 III 来消除剪切波面的倾斜。

为了得到真正的被检波面,应用迭代算法将(1)式不断乘  $\beta$  并求和,最终得<sup>[5,6]</sup>

$$\sum_{i=0}^n \phi_0(\beta^i \rho, \theta) = W(\rho, \theta) - W(\beta^{n+1} \rho, \theta), \quad (7)$$

于是,便得到被检波前

$$W(\rho, \theta) = \sum_{i=0}^n \phi_0(\beta^i \rho, \theta) + W(\beta^{n+1} \rho, \theta), \quad (8)$$

式中  $n$  为迭代次数,  $W(\beta^{n+1} \rho, \theta)$  为测量误差<sup>[9]</sup>。

当迭代至  $n$  大到一定程度时,波面接近平面波,即  $W(\beta^{n+1} \rho, \theta) \rightarrow 0$ , 而  $\phi_0(\beta^i \rho, \theta)$  可通过由干涉条纹所获得的最初数据不断迭代而得到,这样便可求得真正的被检波面  $W(\rho, \theta)$ 。

### 3 系统波前重构计算机仿真论证

为了验证上述空间相位调制理论和波前重构算法的正确性和精度,先进行系统仿真实验,用计算机模拟了具有较大畸变的原始波前,以及其通过径向剪切干涉系统后产生的干涉图。然后用上述数学模型对干涉图进行处理,恢复得到原始波面相位,与模拟波面相位相比较就可计算系统的理论精度。

图 2(a)为模拟的复杂波面相位,图 2(b)为模拟的波面相位通过径向剪切干涉系统后产生的干涉图,图 2(c)为对干涉图进行傅里叶变换、滤波、移频、傅

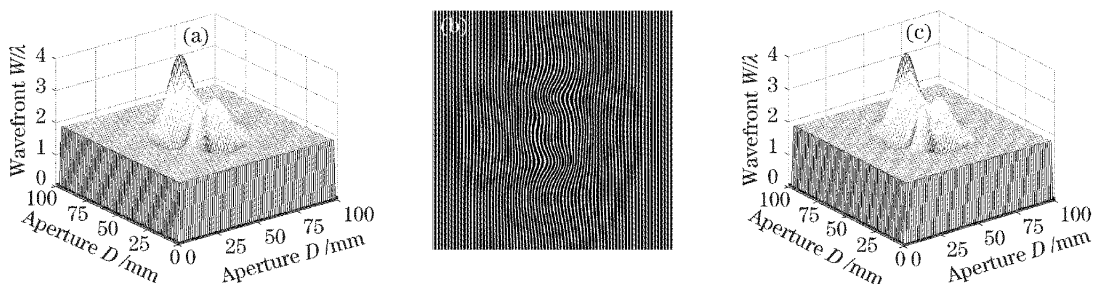


图 2 (a) 仿真波面, (b) 仿真径向剪切干涉图, (c) 重构波面

Fig. 2 (a) Simulated wavefront, (b) simulated radial shearing interferogram, (c) reconstructed wavefront

里叶逆变换、消跳变、迭代后恢复得到的波面相位，仿真数据见表 1。

表 1 仿真实验数据  
Table 1 Data of simulation

	Peak-valley /λ	Root mean square /λ
Simulated phase	4.0000	0.2897
Reconstructed phase	3.9991	0.2905
Error	0.0016	0.0006

由图 2 及表 1 可见，波面畸变量的峰谷值为 4 的原始波面，经过仿真重构所得到的重构波面与原始波面非常吻合，重构算法可以很好地恢复出比较复杂的波面相位，重构精度在 1/1000λ 以上。

### 4 系统实时检测结果及分析

#### 4.1 系统精度验证

根据图 1 的原理，研制了一套用于近红外瞬态脉冲波前检测的干涉仪。为了验证该系统的精度，将近红外干涉仪与 ZYGO 数字波面干涉仪进行比对检测。实验中，用近红外干涉仪与 ZYGO 干涉仪分别对一个标准平板进行透射波前检测(之所以用标准平板是因为这样可以使系统误差更好地表现出来)，测得数据如表 2 所示。

将两干涉仪的测量结果进行比较，可以看到，两干涉仪所测得的透射波前的均方根值之差仅为 0.004λ，已经远优于 1/15λ；峰谷值之差仅为 0.056λ，已经优于 1/17λ，可以说已经达到了一个高精度的检测结果。需要特别指出的是，由于 ZYGO 干涉仪是通过压电时间相位调制来实现测试的，属非共路系统，且其对环境非常敏感，以至于它对测试环境要求非常高；而近红外干涉仪，由于其采用共路的径向剪切系统，再结合空间相位技术，使它对外界环境不甚敏感，而且由于它只需要一幅干涉图，时间分

辨率极高，对外界环境影响不敏感，更适合于现场的实时检测。

表 2 近红外干涉仪和 ZYGO 干涉仪测试结果对比  
Table 3 Comparison of near-infrared interferometer and ZYGO interferometer

Parameter	Times			
	1	2	3	Average
Near infrared interferometer				
Peak-valley value /λ	0.1652	0.1741	0.1799	0.1731
Root mean square /λ	0.0249	0.0269	0.0272	0.0263
ZYGO interferometer				
Peak-valley value /λ	0.112	0.120	0.118	0.117
Root mean square /λ	0.021	0.022	0.022	0.022
Peak-valley value /λ error	0.1731-0.117=0.056			
Root mean square /λ Error	0.0263-0.022=0.004			

#### 4.2 惯性约束聚变系统中检测结果<sup>[5,6,10,11]</sup>

该近红外干涉仪已经对惯性约束聚变系统中 1053 nm 波段、脉宽为纳秒量级的近红外激光波前畸变相位实现了脉冲采样及数据处理。图 3 是该干涉仪在惯性约束聚变系统中实际检测到的数据。图 3(a)为干涉仪测得的径向剪切干涉图；图 3(b)为按图 1 中 B 框图部分处理恢复出来的惯性约束聚变系统中瞬态激光脉冲波面相位的三维分布；图 3(c)为按图 1 中 A 框图部分处理而恢复出来的惯性约束聚变系统中瞬态激光的振幅分布。

如图 1 中所示，该系统仅通过一幅干涉图就可以以极高精度恢复出激光波前相位和振幅，给出激光的波前相位三维图形、等高图、波前畸变的峰谷值、均方根值、均方根梯度值和激光束的斯特雷尔(Strehl)比等，同时还可以给出系统的调制传递函数、点扩展函数等系统参量。系统良好的抗干扰性、重复性和稳定性为脉冲波前的检测和校正提供了可靠的数据依据。

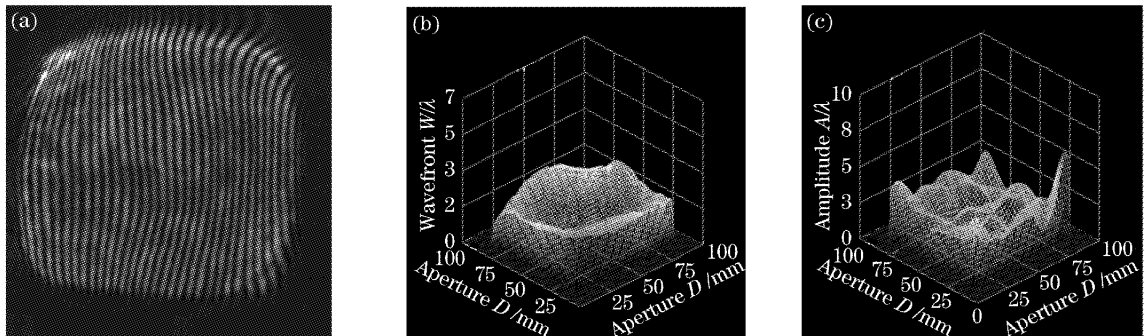


图 3 惯性约束聚变系统实际测量结果。(a) 干涉图,(b)被测激光波面相位,(c)被测激光振幅

Fig. 3 Test data in inertial confinement fusion system. (a) Interferogram,(b) phase of tested laser,(c) amplitude of tested laser

## 5 结 论

基于空间相位调制技术的径向剪切干涉仪发挥了空间相位调制技术和径向剪切干涉技术各自的优点,仪器抗噪、抗干扰性能好,波前检测分辨率高,可测的波前畸变量大,适用于不同可见光、红外波段的瞬态图像高速采集及检测,从单幅干涉图计算恢复波面相位信息,并能达到较高的精度。可以以较高精度对大畸变波前实现高速、高空间分辨率的测量。除了惯性约束聚变系统外,该技术在航空、航天、航海、气动光学等诸多领域,特别是对快速、实时性要求比较高的场合也具有非常重要而广泛的应用。

### 参 考 文 献

- 1 He Yong, Chen Jimbang, Zhu Rihong *et al.*. Laser rods wavefront distortion testing instrument[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(10): 938~942 (in Chinese)  
何 勇, 陈进榜, 朱日宏等. 激光棒波前畸变测试仪[J]. 中国激光, 2003, **30**(10): 938~942
- 2 Luan Zhu, Liu Liren, Liu De'an *et al.*. Double-shearing wavefront testing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1417~1420 (in Chinese)  
栾 竹, 刘立人, 刘德安等. 双剪切波面干涉测量法[J]. 光学学报, 2004, **24**(10): 1417~1420
- 3 P. Hariharan, D. Sen. Radial shearing interferometer[J]. *Sci. Instrum.*, 1961, **38**(11): 428~432
- 4 Mitsuo Takeda. Spatial carrier heterodyne techniques for precision interferometry and profilometry [C]. *Proc. SPIE*, 1989, **1121**: 73~80
- 5 Chen Jian, Yang Yongying, Zhuo Yongmo *et al.*. Novel radial shearing interferometer based on spatial phase modulation[C]. *Proc. the Second International Symposium Instrumentation Science and Technology*, 2002, **2**: 321~326
- 6 Li Dahai, Chen Huaixin, Chen Zhenpei *et al.*. Algorithm and accuracy study of wavefront reconstruction with different amplification ratio based on the cyclic radial shearing interferometer[J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(6): 504~508 (in Chinese)  
李大海, 陈怀新, 陈祯培等. 径向剪切干涉波面重构算法和不同倍数下重建精度的研究[J]. 中国激光, 2002, **A29**(6): 504~508
- 7 Donald J. Bone, H. A. Bachor, R. John Sandeman. Fringe-pattern analysis using a 2-D Fourier transform[J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(10): 1653~1660
- 8 Mitsuo Takeda, Hideki Ina, Seiji Kobayashi. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**: 156~160
- 9 Bai Jian, Yang Guoguang. Infinite element model for the reconstruction of two-dimensional shearing wavefront[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(6): 726~731 (in Chinese)  
白 剑, 杨国光. 二维剪切波面重建的有限元模型[J]. 光学学报, 1998, **18**(6): 726~731
- 10 He Shunzhong, Wei Yongjie, Jiang Chengzhi. Study on a reference optical system applied to the outline loss measurement of complicated three-dimension object[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(6): 329~331
- 11 Lu Yuanbiao, Yang Yongying, Chen Yangjie *et al.*. Calculating Strehl ratio through radial shearing method[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5638**: 428~437