

# 采用扩展的 Nijboer-Zernike 方法的激光光束特征值检测

刘敏时<sup>1</sup> 王晓曼<sup>1</sup> 王 斌<sup>2</sup> 姜宇鹏<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022  
<sup>2</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

**摘要** 采用扩展的 Nijboer-Zernike(NZ)方法的逆运算,由焦平面区域的两幅强度图像,获得激光光束出瞳面的振幅信息和相位信息,进而给出激光光束质量因子  $M^2$ 、束宽、束散角、瑞利长度。构建了满足精度要求的实验系统,对一个 He-Ne 激光器在两天内进行两次测试。将得到的波前相位与相位差异法得到的波前相位进行比较,证明激光波前相位测试结果合理;将得到的特征值数据与  $M^2$ -200s-FW 型激光光束分析仪得到的数据进行比较,证明激光光束特征值测试结果合理。对比两天测试结果,说明该测试系统是稳定可靠的。

**关键词** 激光光学;激光光束特征值;相位恢复;激光传输

**中图分类号** O348.11      **文献标识码** A      **doi**: 10.3788/AOS201434.1014001

## Acquisition of Laser Beam Characteristics by Extended Nijboer-Zernike Method

Liu Minshi<sup>1</sup> Wang Xiaoman<sup>1</sup> Wang Bin<sup>2</sup> Jiang Yupeng<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> School of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China  
<sup>2</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130022, China)

**Abstract** The inverse operation of the extended Nijboer-Zernike (NZ) method is applied to acquire the laser beam characteristics. Two images at the locations before and behind the focal plane are used to calculate the amplitude and phase of wavefront at pupil plane of laser beam. The laser beam quality factor  $M^2$ , the beam width, the divergence, and the Rayleigh range are obtained. The experimental system is established which meets the accuracy requirement. Two actual tests of a He-Ne laser are carried out in different days. The test result of wavefront is compared with that of the phase diversity method and the test results of beam characteristics are compared with that of  $M^2$ -200s-FW beam analyzer, which shows that the proposed method is reasonable. The stability and reliability of the established system is verified by comparison of the tests in different days.

**Key words** laser optics; laser beam characterization; phase retrieval; laser beam transmission

**OCIS codes** 140.3295; 100.5070; 010.3310

## 1 引 言

在激光通信、医学及生物技术、微电子平版印刷等领域,人们越来越关注激光光束的波前信息及特

征值信息<sup>[1-5]</sup>。传统的激光光束特征值检测方法有刀口法和狭缝法。2005年,国际标准化组织的 ISO11146 标准中,描述了通过电荷耦合元件(CCD)

**收稿日期**: 2014-04-01; **收到修改稿日期**: 2014-06-08

**基金项目**: 吉林省工业高新技术项目(20115079)

**作者简介**: 刘敏时(1987—),女,博士研究生,主要从事激光光束质量、波前探测、图像处理等方面的研究。

E-mail: liums49@sina.com

**导师简介**: 王晓曼(1956—),女,硕士,教授,博士生导师,主要从事光通信、光电信息处理、激光光束质量等方面的研究。

E-mail: wmflys@126.com(通信联系人)

采集激光传输过程中的多个激光横截面,求取激光光束特征值的方法。上述方法均存在测试步骤繁琐、测试时间长等不足。1996年,Neal等<sup>[6]</sup>指出,在夏克-哈特曼波前传感器中,由阵列点斑的强度信息粗略给出波前的强度分布,结合点斑位置信息所给出的波前相位分布,能够得到激光光束质量因子。2002年,Schäfer等<sup>[7-9]</sup>采用扩展的夏克-哈特曼技术,即由夏克-哈特曼传感器得到波前的相位信息,另由一个附加的CCD测得波前的强度信息,得到激光光束的特征值,随后他们通过此方法实现了超宽带激光脉冲和闪光光束的光束质量因子的检测。

扩展的Nijboer-Zernike(NZ)算法,是由Janssen<sup>[10]</sup>在2002年基于Nijboer-Zernike理论提出的,通过新的Bessel序列表达焦平面区域的复振幅,能够在波前畸变和大离焦量的情况下得到稳定的收敛。2003年,Dirksen等<sup>[11]</sup>导出了扩展的NZ方法的逆运算,即扩展的NZ波前重建的方法,通过焦平面区域的强度信息获得出瞳处波前的振幅信息和相位信息。

本文将扩展的NZ波前重构理论应用到激光光束特征值检测中,构建了满足精度要求的实际测试系统,在两天中对某激光器进行了两次测试,通过比较激光器出厂指标,验证了系统的测试精度,通过对比测试结果,验证了系统的可靠性及稳定性。和文

献<sup>[6,8]</sup>中的夏克-哈特曼方法相比较,本文方法可在给出激光光束相位信息的同时给出振幅信息,进而计算激光光束特征参数,而夏克-哈特曼方法在获得相位信息之后,必须用另外的方法获得激光光束的强度信息。

## 2 基于扩展的NZ方法的激光光束测试模型

### 2.1 基于扩展的NZ方法的激光光束振幅及相位计算

光学系统的广义光瞳函数可以通过NZ系数表示为

$$A(\rho, \theta) \exp[i\phi(\rho, \theta)] = \sum_{n,m} \beta_n^m R_n^{|m|}(\rho) \exp(im\theta), \quad (1)$$

式中 $(\rho, \theta)$ 为光瞳平面的极坐标, $A(\rho, \theta)$ 为光瞳函数的振幅, $\phi(\rho, \theta)$ 为光瞳函数的相位, $\beta_n^m$ 为系统的NZ系数, $n$ 描述阶, $m$ 描述方位角正余弦频率成分, $n, m$ 均为整数。 $R_n^{|m|}(\rho)$ 为径向多项式<sup>[12]</sup>。

根据傅里叶光学理论,距焦平面离焦量为 $f$ 处的复振幅分布 $U(r, \varphi; f)$ 可以通过光瞳函数的傅里叶变换得到。代入(1)式,距焦平面离焦量为 $f$ 处的复振幅分布 $U(r, \varphi; f)$ 可表示为

$$U(r, \varphi; f) = \frac{1}{\pi} \int_0^{1/2\pi} \int_0^{1/2\pi} \sum_{n,m} \beta_n^m R_n^{|m|}(\rho) \exp(im\theta) \exp(if\rho^2) \exp[2\pi i \rho r \cos(\theta - \varphi)] \rho d\rho d\theta, \quad (2)$$

整理(2)式,以扩展的NZ方法给出距焦平面离焦量为 $f$ 处的复振幅分布为<sup>[13]</sup>

$$U(r, \varphi; f) = 2 \sum_{n,m} i^m \beta_n^m V_n^m(r, f) \cos m\varphi, \quad (3)$$

式中忽略了 $\sin$ 项, $V_n^m(r, f)$ 为Bessel级数展开的代数形式。

扩展的NZ方法的逆过程是通过焦平面区域的强度图像推导出系统的NZ系数,从而导出系统的光瞳函数。距焦平面 $f$ 处的光强分布可表示为

$$I(r, \varphi; f) = |U(r, \varphi; f)|^2 = 4 |V_0^0(r, f)|^2 + 8 \sum_{n,m} \text{Re}[\beta_n^m i^m V_n^m(r, f) V_0^{0*}(r, f) \cos(im\varphi)] + C(r, \varphi; f), \quad (4)$$

式中 $C(r, \varphi; f)$ 为交叉项, $*$ 表示共轭,其中

$$C(r, \varphi; f) = 4 \sum_{n_1, m_1, n_2, m_2} \text{Re}\{\beta_{n_1}^{m_1} \beta_{n_2}^{m_2*} i^{m_1 - m_2} V_{n_1}^{m_1} V_{n_2}^{m_2*} \cos[i\varphi(m_1 - m_2)]\}, \quad (5)$$

式中 $''$ 表示去除 $n_1 = m_1 = 0$ 和 $n_2 = m_2 = 0$ 项, $\text{Re}\{\}$ 表示实部。设忽略交叉项 $C(r, \varphi; f)$ 的光强分布为 $I_{\text{appr}}(r, \varphi; f)$ ,则

$$I_{\text{appr}}(r, \varphi; f) = I(r, \varphi; f) - C(r, \varphi; f), \quad (6)$$

对其进行正余弦变换,其余弦变换为

$$I_{\text{appr}}^m(r, f) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_{\text{appr}}(r, \varphi; f) \cos(m\varphi) d\varphi \approx$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2} \chi_0^0 + \sum_n' \operatorname{Re}(\beta_n^0) \chi_n^0 + \sum_n' \operatorname{Im}(\beta_n^0) \psi_n^0, \quad m = 0 \\ \sum_n [\operatorname{Re}(\beta_n^m) \chi_n^m + \operatorname{Re}(\beta_n^{-m}) \chi_n^{-m}] + \sum_n [\operatorname{Im}(\beta_n^m) \psi_n^m + \operatorname{Im}(\beta_n^{-m}) \psi_n^{-m}], \quad m > 0 \end{array} \right. \quad (7)$$

式中'表示去除  $n=0$  项,  $\operatorname{Im}\{\}$  表示虚部。(7) 式中的  $\chi_n^m, \chi_n^{-m}, \psi_n^m, \psi_n^{-m}$  分别为

$$\left\{ \begin{array}{l} \chi_n^m = 8\varepsilon_m \operatorname{Re}[i^m V_n^m(r, f) V_0^{0*}(r, f)] \\ \chi_n^{-m} = 8\varepsilon_m \operatorname{Re}[i^{-m} V_n^{-m}(r, f) V_0^{0*}(r, f)] \\ \psi_n^m = -8\varepsilon_m \operatorname{Im}[i^m V_n^m(r, f) V_0^{0*}(r, f)] \\ \psi_n^{-m} = -8\varepsilon_m \operatorname{Im}[i^{-m} V_n^{-m}(r, f) V_0^{0*}(r, f)] \end{array} \right. \quad (8)$$

式中  $\varepsilon_m$  为常数因子, 当  $m = 0$  时,  $\varepsilon_m = 1$ ; 当  $m$  为其他值时,  $\varepsilon_m = 0.5$ 。对(7)式作内积运算, 内积运算定义为

$$(\psi, \chi) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{\infty} \psi(r, f) \chi^*(r, f) r dr df, \quad (9)$$

可得

$$\left\{ \begin{array}{l} (I_{\text{appr}}^0, \chi_{n'}^0) = \frac{1}{2} (\chi_0^0, \chi_{n'}^0) + \sum_n' \operatorname{Re}(\beta_n^0) (\chi_n^0, \chi_{n'}^0) \\ (I_{\text{appr}}^0, \psi_{n'}^0) = \sum_n' \operatorname{Im}(\beta_n^0) (\psi_n^0, \psi_{n'}^0) \end{array} \right. \quad , \quad m = 0; n, n' = 0, 2, \dots, \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (I_{\text{appr}}^m, \chi_{n'}^m) = \sum_n [\operatorname{Re}(\beta_n^m) + \operatorname{Re}(\beta_n^{-m})] (\chi_n^m, \chi_{n'}^m), \dots, \\ (I_{\text{appr}}^m, \psi_{n'}^m) = \sum_n [\operatorname{Im}(\beta_n^m) + \operatorname{Im}(\beta_n^{-m})] (\psi_n^m, \psi_{n'}^m), \end{array} \right. \quad m = 1, 2, \dots; n, n' = m, m+2, \dots, \quad (11)$$

(10)式和(11)式即为解算 NZ 系数的方程组, 可以解算出光瞳平面的 NZ 系数  $\beta_n^m$ 。

在(7)式的计算过程中, 引入计算的是略掉  $C(r, \varphi; f)$  项的  $I_{\text{appr}}(r, \varphi; f)$ , 而实际得到的强度图像为  $I(r, \varphi; f)$ , 因此需要引入迭代逼近运算, 以消除  $C(r, \varphi; f)$  项引入的误差。将实际测量的含有  $C(r, \varphi; f)$  项的  $I(r, \varphi; f)$  代入(7)式, 进行正余弦变换, 通过(9)式引入内积, 通过(10)式和(11)式构造方程组, 解方程组得到第一次的系数  $\beta_n^m$ ; 将此系数代入(5)式, 得到  $C(r, \varphi; f)$  的值, 并从原始的  $I(r, \varphi; f)$  中减去  $C(r, \varphi; f)$ , 得到第一次逼近的  $I_{\text{appr}}(r, \varphi; f)$ 。重复正余弦变换及解方程组, 得到第二次逼近的 NZ 系数  $\beta_n^m$ ; 再代入(5)式得到第二次逼近的  $C(r, \varphi; f)$ , 进而得到第二次逼近的  $I_{\text{appr}}(r, \varphi; f)$ 。重复上述过程, 随着迭代次数的增加,  $I_{\text{appr}}(r, \varphi; f) = I(r, \varphi; f) - C(r, \varphi; f)$  逐渐趋于真值, 进而求解得到的  $\beta_n^m$  趋于真值。当迭代次数足够多时,  $\beta_n^m$  将不再变化, 得到的  $\beta_n^m$  为真实的 NZ 系数。将最终的  $\beta_n^m$  代入(1)式中, 就可得到激光束出瞳面的振幅分布和相

位分布。计算流程图如图 1 所示。

## 2.2 激光光束特征值的计算

根据 Schäfer 计算激光光束特征值的理论<sup>[14]</sup>, 计算待测平面激光光束强度的空间一阶矩和空间二阶矩以及激光光束波前相位梯度的一阶矩和二阶矩。强度的空间一阶矩  $\langle x \rangle, \langle y \rangle$  和空间二阶矩  $\langle x^2 \rangle, \langle y^2 \rangle$  可表示为

$$\left\{ \begin{array}{l} \langle x \rangle = \frac{\sum x_{ij} \cdot I_{ij}}{\sum I_{ij}}, \quad \langle y \rangle = \frac{\sum y_{ij} \cdot I_{ij}}{\sum I_{ij}} \\ \langle x^2 \rangle = \frac{\sum (x_{ij} - \langle x \rangle)^2 \cdot I_{ij}}{\sum I_{ij}} \\ \langle y^2 \rangle = \frac{\sum (y_{ij} - \langle y \rangle)^2 \cdot I_{ij}}{\sum I_{ij}} \end{array} \right. \quad (12)$$

式中  $x_{ij}, y_{ij}$  为待测激光束在坐标  $(i, j)$  点处  $x$  方向和  $y$  方向上的坐标值,  $I_{ij}$  为坐标  $(i, j)$  点处的强度值。激光光束的波前相位梯度一阶距  $\langle \sigma^x \rangle, \langle \sigma^y \rangle$  和梯度二阶距  $\langle \sigma^{x^2} \rangle, \langle \sigma^{y^2} \rangle$  可表示为

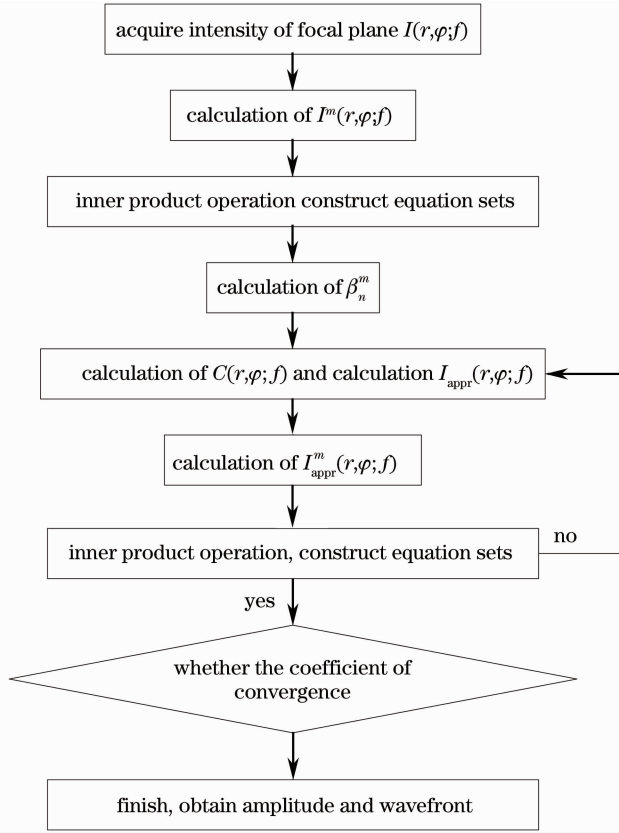


图 1 计算流程图

Fig. 1 Flow chart of calculation

$$\begin{cases} \langle o^x \rangle = \frac{\sum o_{ij}^x \cdot I_{ij}}{\sum I_{ij}}, & \langle o^y \rangle = \frac{\sum o_{ij}^y \cdot I_{ij}}{\sum I_{ij}} \\ \langle o^{x^2} \rangle = \frac{\sum (o_{ij}^x - \langle o^x \rangle)^2 \cdot I_{ij}}{\sum I_{ij}} + \frac{\lambda^2}{4\pi^2} \frac{\sum \left(\frac{\partial I}{\partial x_{ij}}\right)^2}{\sum I_{ij}}, \\ \langle o^{y^2} \rangle = \frac{\sum (o_{ij}^y - \langle o^y \rangle)^2 \cdot I_{ij}}{\sum I_{ij}} + \frac{\lambda^2}{4\pi^2} \frac{\sum \left(\frac{\partial I}{\partial y_{ij}}\right)^2}{\sum I_{ij}} \end{cases} \quad (15)$$

$$\theta_{\sigma_x} = 4 \sqrt{\langle o^{x^2} \rangle}, \quad \theta_{\sigma_y} = 4 \sqrt{\langle o^{y^2} \rangle}, \quad (16)$$

$$\begin{aligned} M_x^2 &= \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle o^{x^2} \rangle - \langle xo^x \rangle^2}, \\ M_y^2 &= \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\langle y^2 \rangle \langle o^{y^2} \rangle - \langle yo^y \rangle^2}. \end{aligned} \quad (17)$$

### 3 实验研究

选择中心波长为  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$  的 He-Ne 激光器作为待测光源,通过 Spiricon 公司的 M<sup>2</sup>-200s-FW 型激光光束分析仪对激光光束进行测试,测试结果如表 1 所示。

实验系统框图如图 2(a) 所示,系统从左到右分别为衰减组、扩束器、平凸透镜、图像采集相机。扩束器放大倍率为 6×,平凸透镜为双胶合透镜,焦距为 200 mm,数值孔径为 0.0125,系统的光学像差可忽略。图像采集相机为 Lumenera 公司的 Lm135 型数字相机,像素尺寸为 4.65 μm×4.65 μm,相机分辨率为 1392 pixel×1040 pixel,波长响应范围为  $\lambda = 400 \sim 1000 \text{ nm}$ 。NZ 系数选择前 36 项。实际测试系统如图 2(b) 所示。

式中  $o_{ij}^x, o_{ij}^y$  为待测激光束在坐标  $(i, j)$  点处  $x$  方向和  $y$  方向上的平均波前相位梯度,  $\lambda$  为待测激光光束的波长。进而可以得到混合矩  $\langle xo^x \rangle, \langle yo^y \rangle$  为

$$\begin{aligned} \langle xo^x \rangle &= \frac{\sum (o_{ij}^x - \langle o^x \rangle) \cdot (x_{ij} - \langle x \rangle) \cdot I_{ij}}{\sum I_{ij}}, \\ \langle yo^y \rangle &= \frac{\sum (o_{ij}^y - \langle o^y \rangle) \cdot (y_{ij} - \langle y \rangle) \cdot I_{ij}}{\sum I_{ij}}. \end{aligned} \quad (14)$$

根据上面的计算,可得到激光光束束宽、束散角及激光光束质量因子  $M^2$  为

表 1 M<sup>2</sup>-200s-FW 型激光光束分析仪测试结果

Table 1 Acquisition of M<sup>2</sup>-200s-FW beam propagation analyzer

Laser beam parameter	X-direction	Y-direction
M <sup>2</sup>	1.120	1.103
Divergence /mrad	1.253	1.275
Rayleigh range /mm	537.66	558.47

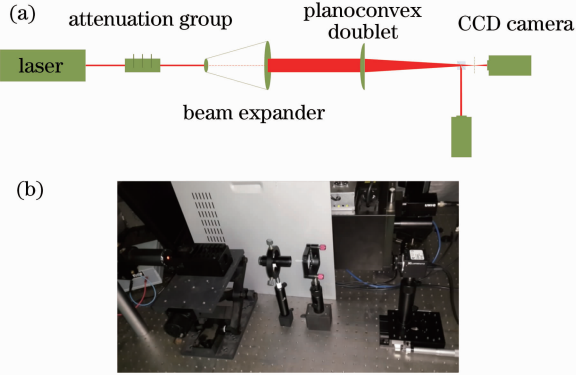


图 2 (a)实验系统框图；(b)实验测试图

Fig. 2 (a) Experimental system; (b) experimental optical system

为了验证测试的可靠性及稳定性，选择两天分别对待测激光光束进行测试。采集距焦平面前、后 5 mm 的图像进行计算，图 3 为第一次采集到的激

光光斑图像，其中图 3(a)为前 5 mm 的光斑图像，图 3(b)为后 5 mm 的激光光斑图像。

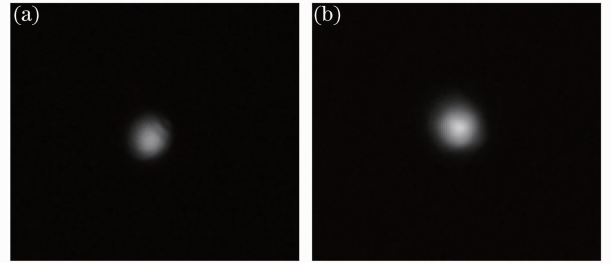


图 3 第一次测试 CCD 相机采集到的激光光斑图像。(a) 焦平面前 5 mm 的光斑图像；(b) 焦平面后 5 mm 的光斑图像

Fig. 3 Intensity images of CCD camera from the first acquisition. (a) 5 mm before the focal plane; (b) 5 mm behind the focal plane

以极坐标表示采集到的图像，代入(7)式，进行正余弦变换，经(9)式引入内积运算，经(10)式和(11)式解方程组，得到 NZ 系数  $\beta_n^m$ ，引入迭代运算，代入(5)式和(6)式，得到趋于真实的  $I_{appr}(r, \varphi; f)$ ，重复正余弦变换及解方程组的计算过程，从而得到真实的 NZ 系数  $\beta_n^m$ 。

选择合适的迭代次数，使之既满足精度的要求，

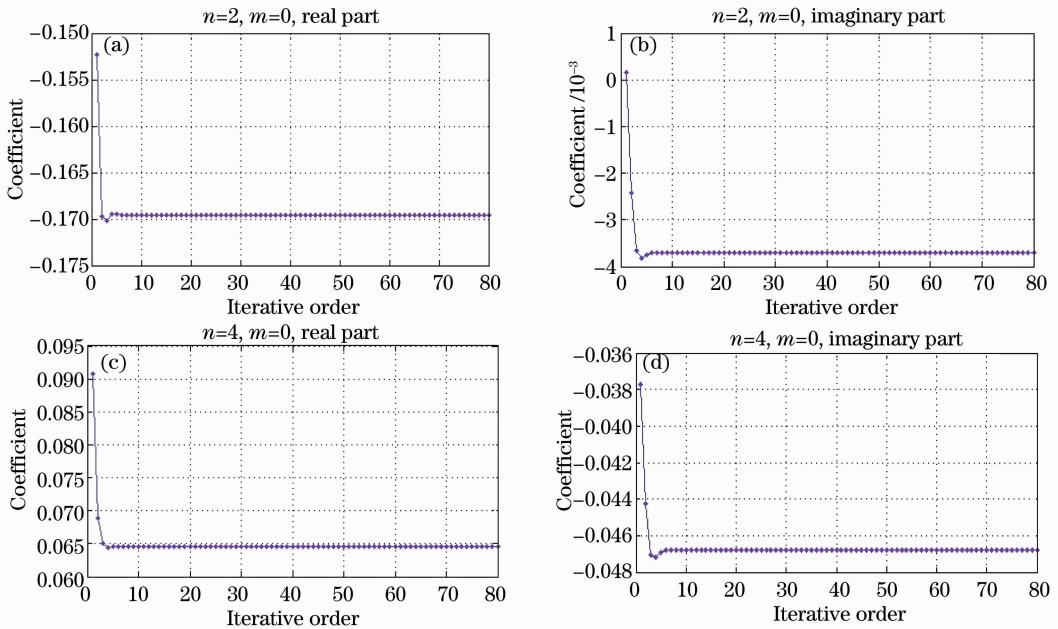


图 4 系数随迭代次数的变化曲线。(a)  $\beta_2^0$  项的实部；(b)  $\beta_2^0$  项的虚部；(c)  $\beta_1^0$  项的实部；(d)  $\beta_1^0$  项的虚部

Fig. 4 Curves of iterative order and coefficient. (a) Real part of  $\beta_2^0$ ; (b) imaginary part of  $\beta_2^0$ ; (c) real part of  $\beta_1^0$ ; (d) imaginary part of  $\beta_1^0$

又保证较短的计算时间。本次测试中,迭代次数为 5 时 NZ 系数达到  $10^{-3}$  的精度;迭代次数为 16 时达到  $10^{-7}$  的精度;迭代次数为 30 时达到  $10^{-15}$  的精度。图 4 给出了  $\beta_r^e, \beta_i^e$  随迭代次数增加的变化曲线。

选择 50 次迭代,得到的  $\beta_n^e$  代入(1)式,得到光瞳平面的强度及相位分布,如图 5 所示,图 5(a)为强度图像,图 5(b)为相位图像。表 2 的第 2 列给出

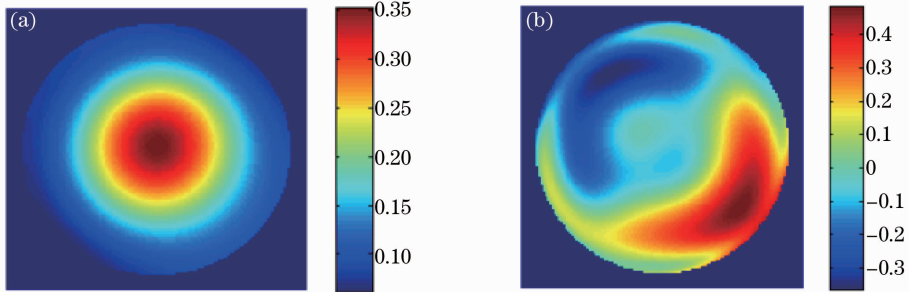


图 5 第一次测试的强度图像和相位图像。(a) 强度图像; (b) 相位图像

Fig. 5 Intensity and phase images calculated by the first acquisition. (a) Intensity image; (b) phase image

表 2 激光光束波前 PV 值及 RMS 值的对比表

Table 2 Comparison of PV value and RMS value

	1st acquisition	2nd acquisition	Difference
PV value	0.1280 $\lambda$	0.1351 $\lambda$	0.0071 $\lambda$
RMS value	0.0248 $\lambda$	0.0373 $\lambda$	0.0125 $\lambda$

表 3 两次测试的激光光束特征值对比表

Table 3 Comparison of characteristics of laser beam

Parameters of laser beam	1st acquisition		2nd acquisition		Difference	
	X-direction	Y-direction	X-direction	Y-direction	X-direction	Y-direction
$M^2$	1.1034	1.1043	1.1229	1.1111	0.0195	0.0068
Beam width /mm	0.6950	0.6950	0.6950	0.6951	0.0000	0.0001
Divergence /mrad	1.2982	1.2803	1.3017	1.2880	0.0035	0.0077
Rayleigh range /mm	535.36	542.84	533.92	539.59	1.4400	3.2500

采用相位差异法验证所得波前相位分布的合理性。相位差异法是利用在焦及离焦面上的若干幅强度图像来估算波前相位的方法<sup>[15]</sup>。使用离焦量为  $\pm 15, \pm 10, \pm 5$  mm 的离焦图像及在焦图像,拟合光瞳平面的波前相位,得到的波前分布轮廓图如图 6 中实线所示,其波前相位 PV 值为 0.1954 $\lambda$ ,RMS 值为 0.0381 $\lambda$ 。图 6 中虚线所示为本文方法得到的波前相位分布轮廓图,与实线轮廓图相比较,相位 PV 差值为 0.0674 $\lambda$ ,RMS 差值为 0.0133 $\lambda$ ,验证了本文方法的相位测试精度。

图 7 为第二次采集得到的激光光斑图像,图 7(a)为焦平面前 5 mm 的光斑,图 7(b)为焦平面后 5 mm 的光斑。图 8 为经计算得到的光瞳平面的强度及相

了相位数据的峰谷(PV)值及均方根(RMS)值。将振幅数据及相位数据代入 2.2 节计算,得到本次测试的激光光束特征值,如表 3 的第 2 列及第 3 列所示,与表 1 中使用  $M^2$ -200s-FW 型激光光束分析仪测试结果相比较,光束质量因子的平均差值为 0.0089,光束束散角的平均差值为 0.0253 mrad,激光瑞利长度的平均差值为 8.965 mm,说明测试结果合理。

位图像,可以看出和第一次测量得到的分布(图 5)基本一致。

表 2 第 3 列给出了第二次测量的相位 PV 值及 RMS 值,第 4 列为两次测量的差值,其中 PV 差值为 0.0071 $\lambda$ ,RMS 差值为 0.0125 $\lambda$ 。由第二次测量得到的振幅数据及相位数据,计算得到激光光束特征值,如表 3 第 4 列及第 5 列所示。表 3 第 6 列及第 7 列给出两天实验结果的差值,其中光束质量因子  $M^2$  的差值小于 0.02,激光光束束宽的差值小于 0.0001 mm,激光光束发散角的差值小于 0.008 mrad,激光瑞利长度的差值小于 3.3 mm。可以看出,两天的实验结果基本一致,测试系统稳定。

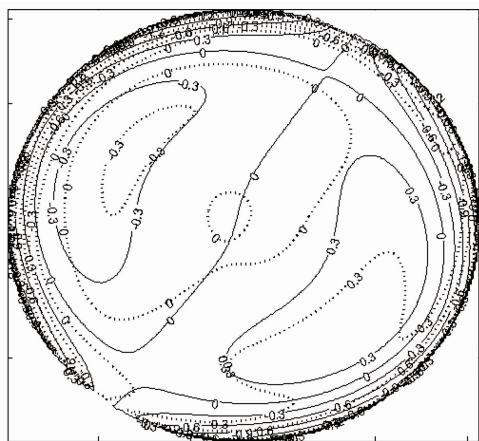


图 6 相位分布比较图,其中虚线为通过扩展的 NZ 方法得到的相位分布轮廓图,实线为通过相位差异法得到的相位分布轮廓图

Fig. 6 Comparison of phase distribution where the dotted line is obtained by the extended NZ method, the solid line is obtained by the phase diversity method

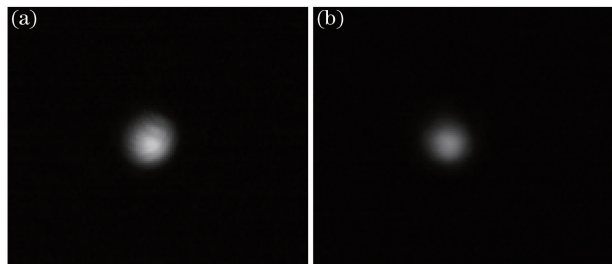


图 7 第二次测试 CCD 相机采集到的激光光斑图像。(a) 焦平面前 5 mm 的光斑图像; (b) 焦平面后 5 mm 的光斑图像

Fig. 7 Intensity images of CCD camera from the second acquisition. (a) 5 mm before the focal plane; (b) 5 mm behind the focal plane

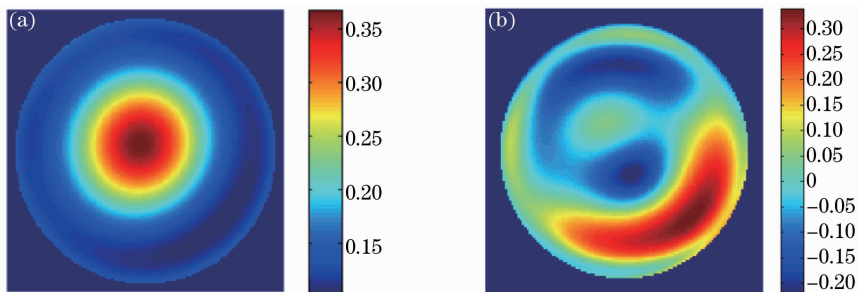


图 8 第二次测试得到的强度图像和相位图像。(a) 强度图像; (b) 相位图像

Fig. 8 Intensity and phase images calculated by the second acquisition. (a) Intensity image; (b) phase image

## 4 结 论

采用扩展的 NZ 波前重建的方法,由焦平面区域的两幅强度图像,获得激光光束波前的振幅信息和相位信息,进而得到激光光束质量因子  $M^2$ 、光束直径、束散角、瑞利长度等特征值。构建了满足精度要求的测试系统,对同一激光器在不同日期进行两次测试。采用通用的相位差异法和  $M^2$ -200s-FW 型激光光束分析仪分别对激光光束波前相位和激光光束特征值进行了测试,用以进行比对研究,验证了该方法测试结果的合理性。对比不同日期的两次测试结果,波前相位 PV 差值为  $0.0071\lambda$ , RMS 差值为  $0.0125\lambda$ , 光束质量因子  $M^2$  的差值为 0.02, 光束束宽的差值为  $0.0001\text{ mm}$ , 光束发散角的差值为  $0.008\text{ mrad}$ , 激光瑞利长度的差值为  $3.3\text{ mm}$ , 说明测试系统稳定。与扩展的夏克-哈特曼波前传感器方法相比较,该方法中波前振幅和相位的获得源自

同一测量数据。另外,系统无需微透镜阵列,相对简单且易于实现。

## 参 考 文 献

- Liu Yongji, Wang Zhaoqi, Lü You, *et al.*. Effects of the reflection losses and nonnormal incidence of laser on the eye's visual quality after refractive procedure on a cornea [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(7): 1101-1104.  
刘永基, 王肇圻, 吕 尤, 等. 激光斜入射和反射对角膜屈光手术后眼成像质量的影响[J]. 中国激光, 2008, 35(7): 1101-1104.
- Wen Donghai, Jiang Yuesong, Zhang Xuguo, *et al.*. Speckle characteristics of laser radar polarization imaging and despeckling algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0311003.  
闻东海, 江月松, 张绪国, 等. 激光偏振成像散斑统计特性和抑制方法研究[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0311003.
- Xu Wenyu, Bai Yanzhu, Liu Yang, *et al.*. Real-time laser facula detection based on top-three-neighborhood-region continuous-pixels numbering [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1212002.  
徐文字, 白延柱, 刘 洋, 等. 基于上三邻域连续点计数的激光光斑实时监测[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1212002.

- 4 Ma Xinxue, Wang Jianli, Wang Bin, *et al.*. Quantitative analysis of the measurement precision of phase retrieval wavefront sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1028001.  
马鑫雪, 王建立, 王 斌, 等. 相位恢复波前传感器测量精度的定量分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(10): 1028001.
- 5 Wu Congjun, Yan Changxiang, Liu Wei. Analysis of optical aberration impact on acquisition performance [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(10): 1005004.  
吴从均, 颜昌翔, 刘 伟. 像差对通信捕获光斑质心的影响[J]. *中国激光*, 2013, 40(10): 1005004.
- 6 D R Neal, W J Alford, J K Gruetzner, *et al.*. Amplitude and phase beam characterization using a two-dimensional wavefront sensor [C]. *SPIE*, 1996, 2870: 72–82.
- 7 Xu Hongyan, Xian Hao, Zhang Yudong. Algorithm for reconstructing the whole-aperture wavefront from annular sub-aperture Hartmann-Shack gradient data [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 0112005.  
徐洪艳, 鲜 浩, 张雨东. 利用环形子孔径哈特曼-夏克斜率数据复原全孔径波前相位算法研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(1): 0112005.
- 8 B Schäfer, K Mann. Determination of beam parameters and coherence properties of laser radiation by use of an extended Hartmann-Shack wave-front sensor [J]. *Appl Opt*, 2002, 41(15): 2809–2817.
- 9 B Schäfer, K Mann, G Marowsky, *et al.*. Characterization, wavefront reconstruction and propagation of ultra-broadband laser pulses from Hartmann-Shack measurements [C]. *SPIE*, 2005, 5918: 59180P.
- 10 A J E M Janssen. Extended Nijboer-Zernike approach for the computation of optical point-spread functions [J]. *J Opt Soc Am A*, 2002, 19(5): 849–857.
- 11 P Dirksen, J Braat, A J E M Janssen, *et al.*. Aberration retrieval using the extended Nijboer-Zernike approach [J]. *Journal of Microlithography, Microfabrication and Microsystems*, 2003, 2(1): 61–68.
- 12 V Lakshminarayanan, A Fleck. Zernike polynomials: A guide [J]. *Journal of Modern Optics*, 2011, 58(7): 545–561.
- 13 C V D Avoort, P Dirksen, Augustus J E M Janssen. Aberration retrieval from the intensity point-spread function in the focal region using the extended Nijboer-Zernike approach [J]. *Journal of Modern Optics*, 2005, 52(12): 1695–1782.
- 14 K Mann, A Bayer, M Lübbecke, *et al.*. Comprehensive laser beam characterization for applications in material processing [C]. *SPIE*, 2009, 7202: 72020C.
- 15 R G Paxman, T J Schulz, J R Fienup. Joint estimation of object and aberrations by using phase diversity [J]. *J Opt Soc Am A*, 1992, 9(7): 1072–1085.

栏目编辑: 张浩佳