

文章编号: 0253-2239(2004)10-1411-6

光斑矩参量阵列测试法的测量不确定度*

高学燕 苏毅 何均章 周殿华 关有光

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 绵阳 621900)

摘要: 为计算和评估光斑矩参量阵列测试法的测量不确定度,以光斑矩参量积分表达式为出发点,推导了零阶近似下光斑矩参量的离散表达式,初步分析了光强分布数据中单元位置及探测光功率的测量不确定度。在此基础上,根据不确定度传递律,推导了阵列测试法下光斑矩参量测量不确定度的一般表达式。进一步得到了数种常用简化条件下的矩参量不确定度表达式,并进行了相应的分析。由此建立了光斑矩参量计算及其不确定度评定的一套完整方法。利用简化公式,对自行研制的激光光斑分析仪和通用的 CCD 面阵探测器的光斑矩参量测量不确定度进行了分析,给出了计算表达式。

关键词: 光学技术与仪器; 光学测量; 光斑矩参量; 测量不确定度; 激光光斑分析仪; CCD

中图分类号: TH74 文献标识码: A

Uncertainty of Spot Moment Parameters Measured with Array Detectors

Gao Xueyan Su Yi He Junzhang Zhou Dianhua Guan Youguang

(*Institute of Applied Electronics, The Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900*)

(Received 22 July 2003; revised 25 November 2003)

Abstract: To calculate and to evaluate uncertainty of spot moment parameters measured with array detectors are the main goals. First, according to the integral expression of spot moment parameters, the corresponding discrete expressions of them are derived approximating zero order, and uncertainties of position and light power of every detector unit are analyzed preliminarily. General expressions of uncertainty of spot moment parameters are derived according to the transfer law of uncertainty. And then several simple forms of them are derived on corresponding conditions. So the methods of calculating spot moment parameters and evaluating the uncertainty of them are completely developed. Analysis on uncertainty of spot moment parameters measured with laser intensity distribution analyser (LIDA) and CCD are provided at last.

Key words: optics technique and instrument; optical measurement; spot moment parameters; measurement uncertainty; laser intensity distribution analyser; CCD

1 引 言

光斑强度分布的测试在目标跟踪检测^[1]、激光光束质量诊断^[2,3]和激光束波前测量^[4]等方面具有重要意义。常用的光斑测试法有面阵 CCD 法、线阵 CCD 扫描法、单元探测器扫描法、热敏纸法以及针对某些特殊应用的各具特色的阵列测试设备^[5]法。这些方法最终都将给出探测面上光斑强度二维离散分布数据,故都可等效为阵列测试法。

根据光斑强度分布数据,通常需按矩参量计算方法得到光斑零阶矩(总功率)、一阶矩(质心位置)、二阶矩(表征光斑半径)、三阶矩(表征光斑不对称性)和四阶矩(表征光斑峰度)等矩参量^[6]。虽然光斑阵列测试设备一般需经过实验校准,即对阵列各单元(或像素)可能存在的响应非线性和单元间的非均匀性进行修正^[7]。但是,因探测系统不可避免地受到来自自身和环境的各种噪声干扰,这些噪声必然以一定大小的测量不确定度^[8](可在设备校准时得到估计)反映在光斑强度分布数据中,进一步将传递到光斑矩参量,引起相应的测试误差,某些场合甚至会导致闭环控制效果变差^[9,10]。

* 国家 863 计划项目资助课题。

E-mail: gao_xueyan@sina.com

收稿日期:2003-07-22;收到修改稿日期:2003-11-25

阵列测试法下,光斑矩参量探测误差的分析一直是人们关心的研究内容,已有一些不错的研究方法和结果。例如,姜文汉等^[4]采用将信号质心与噪声质心分离的方法,胡林亭等^[1]和 Brian 等^[10]用误差合成的方法分析了质心测量误差,有关光斑二阶矩半径不确定度的分析也有文献^[3]论述。但是,有关研究远未形成系统严密的分析理论。例如,讨论局限于单元形状及排列都具有高度规则性的 CCD 阵列探测器,未对光斑总功率、三阶矩、四阶矩等矩参量进行误差分析,忽略了单元位置不确定度以及所有直接测量值误差间相关性的影响。另外,以测量不确定度为准则评价测量结果及其质量在国际测量领域已逐渐普及^[7,8]。为此,本文对光斑零、一、二阶矩参量测量不确定度的分析与计算方法展开了较全面的探索。光斑三、四阶矩参量不常用,这里不作分析,但其分析方法可参考本文。

2 光斑矩参量表达式

2.1 光斑矩参量连续积分形式

理想情况下,光斑强度分布由探测面上所有点处的功率密度,即 $I(x, y)$ 决定。由定义,该光斑的零、一、二阶矩参量 P 、 \bar{x} 、 R_x 分别为^[2]

$$P = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y) dx dy, \quad (1)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{P} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x I(x, y) dx dy, \quad (2)$$

$$R_x = 2 \sqrt{\frac{1}{P} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^2 I(x, y) dx dy}, \quad (3)$$

\bar{y} 、 R_y 分别和 \bar{x} 、 R_x 的定义相似,本文不再讨论。上述表达式在激光束传输等方面应用广泛。为获得阵列测试光斑矩参量,还需首先将其改造为离散形式的计算表达式。

2.2 光斑矩参量离散求和形式

设阵列探测面为 σ 。若位于探测面外的光功率相对较少,则其对光斑矩参量计算的影响可忽略。这在实际测量中总可以得到足够好的满足。因此,计算光斑矩参量的积分面可从无穷缩为 σ 。令 N 和 σ_n 分别为阵列探测器的单元数和单元 n 对应的面元,且对 σ_n 的划分满足

$$\sigma = \sum_{n=1}^N \sigma_n, \quad (4)$$

令 S_n 、 P_n 、 x_n 和 $G_n^{x^2}$ 分别表示 σ_n 的面积、 σ_n 上的光功率、 σ_n 的几何重心和 σ_n 的几何原点二阶矩,各自的表达式为

$$S_n = \iint_{\sigma_n} dx dy, \quad P_n = \iint_{\sigma_n} I(x, y) dx dy, \quad x_n = \frac{1}{S_n} \iint_{\sigma_n} x dx dy, \quad G_n^{x^2} = \frac{1}{S_n} \iint_{\sigma_n} x^2 dx dy, \quad (5)$$

结合矩参量定义以及(4)式和(5)式,可得

$$P \approx \iint_{\sigma} I(x, y) dx dy = \sum_{n=1}^N \iint_{\sigma_n} I(x, y) dx dy = \sum_{n=1}^N P_n, \quad (6)$$

$$\bar{x} \approx \frac{1}{P} \iint_{\sigma} x I(x, y) dx dy = \frac{1}{P} \sum_{n=1}^N \iint_{\sigma_n} x I(x, y) dx dy \approx \frac{1}{P} \sum_{n=1}^N x_n P_n, \quad (7)$$

$$R_x \approx 2 \sqrt{\frac{1}{P} \iint_{\sigma} (x - \bar{x})^2 I(x, y) dx dy} = 2 \sqrt{\frac{1}{P} \sum_{n=1}^N \iint_{\sigma_n} (x - \bar{x})^2 I(x, y) dx dy} \approx 2 \sqrt{\frac{1}{P} \sum_{n=1}^N (G_n^{x^2} - 2x_n \bar{x} + \bar{x}^2) P_n}. \quad (8)$$

根据(6)式,光斑总功率为各面元上的功率之和,与光斑强度分布、面元数量及各面元的形状与大小无关。(7)式和(8)式的第三步都作了面元 σ_n 上 $I(x, y)$ 为常量的假设。对一定的光斑强度分布(从而平滑程度一定),在 σ_n 足够小时即可得到满足,这

实质是对光斑强度分布取零阶近似,即各单元对应面元上的功率密度分布均匀。

$G_n^{x^2}$ 依赖于 σ_n 的形状、尺寸及位置。常取的面元形状有矩形(如 CCD)和正六边形(应是一种较好的面元划分)等不同形式。对常见的阵列探测器,面元

为矩形, 设面元 x 方向长为 A , 则 $G_n^{x^2} = x_n^2 + A^2/12$, 代入(8)式, 得

$$R_x = 2 \sqrt{\frac{A^2}{12} + \frac{1}{P} \sum_{n=1}^N X_n^2 P_n}, \quad (9)$$

其中

$$X_n = x_n - \bar{x}, \quad (10)$$

一般情况下, $A \ll R_x$, 故

$$R_x = 2 \sqrt{\frac{1}{P} \sum_{n=1}^N X_n^2 P_n}, \quad (11)$$

此即常见的光斑二阶矩半径的离散求和表达式。

计算光斑一、二阶矩参量的(7)式、(8)式以及(9)式和(11)式是在零阶近似下得到的。对同样的光斑强度分布数据, 假设功率密度在各单元对应的小面元上随空间几何位置呈线性分布, 则同理可得该一阶近似下精度较高的光斑一、二阶矩参量离散求和形式的计算表达式, 这里不再给出。

3 矩参量不确定度一般表达式

由光斑矩参量离散形式的计算表达式可知, 光斑矩参量及其不确定度完全取决于 x_n 、 P_n 及其测量不确定度。

3.1 x_n 、 P_n 的测量不确定度

通过探测器的校准, 一般可对 x_n 、 P_n 存在的系统误差进行有效地修正。例如, 采用光栅或小孔标定方法可校准 CCD 测量系统的像素大小, 采用不同强度的均匀面光源可校准 CCD 探测器的光功率响应。对阵列探测器探测到的光功率分布, 可设背景分布的时间均值信号已被“减掉”, 背景噪声的影响可归入探测器的噪声一并考虑。

3.1.1 P_n 的测量不确定度

P_n 的随机误差源有: 1) 背景噪声导致的探测误差; 2) 该单元探测器本身的探测误差; 3) 单元占

空比小于 100% 导致的取样误差。

单元探测器本身的光功率探测误差因测试中的不确定因素(如探测器中的电路噪声、模-数量化误差以及环境影响等等)而产生。

设单元 n 的光敏面实际为 $\sigma'_n (\leq \sigma_n)$, 则直接由光敏面探测到的光功率为

$$P'_n = \int_{\sigma'_n} I(x, y) d\sigma, \quad (12)$$

令单元占空比 $\epsilon_n = \sigma'_n / \sigma_n (\epsilon_n \leq 100\%)$, 则 P_n 一般估计为

$$P_n = P'_n / \epsilon_n, \quad (13)$$

显然, 光斑强度在面元 σ_n 上分布的不均匀或者随机起伏会导致光功率取样误差的产生。其大小可由光斑强度空间分布起伏的统计规律决定。

3.1.2 x_n 的测量不确定度

x_n 的随机误差源有: 1) 探测器制造过程中有限的单元定位精度; 2) 任一面元上光强分布的随机起伏。

实际光斑强度分布在面元 σ_n 上可能不均匀, 即 σ_n 上实际的光斑重心位置与 x_n 存在差别, 若仍采用零阶近似下的光斑矩参量离散计算方法, 则会导致相应的误差, 该误差与光斑强度空间分布的统计规律有关。

另外, 因探测器制造中的有限加工定位精度, 或者单元尺寸标定过程中存在的不确定度因素的影响, x_n 本身也存在一定大小的不确定度。

3.2 矩参量不确定度一般表达式

由光斑矩参量离散形式的计算表达式, 可得 x_n 、 $P_n (n = 1, 2, \dots, N)$ 对光斑矩参量的影响灵敏系数, 根据不确定度传递律^[8], 不难得到光斑矩参量不确定度的一般表达式:

$$u(P) = \left[\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N r(P_i, P_j) u(P_i) u(P_j) \right]^{1/2}, \quad (14)$$

$$u(\bar{x}) = \frac{1}{P} \left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [P_i P_j r(x_i, x_j) u(x_i) u(x_j) + 2P_i X_j r(x_i, P_j) u(x_i) u(P_j) + X_i X_j r(P_i, P_j) u(P_i) u(P_j)] \right\}^{1/2}, \quad (15)$$

$$u(R_x) = \frac{2}{R_x P} \left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [4P_i X_i P_j X_j r(x_i, x_j) u(x_i) u(x_j) + 4P_i X_i (X_j^2 - R_x^2/4) r(x_i, P_j) u(x_i) u(P_j) + (X_i^2 - R_x^2/4)(X_j^2 - R_x^2/4) r(P_i, P_j) u(P_i) u(P_j)] \right\}^{1/2}, \quad (16)$$

$N, x_n, P_n, X_n, P, \bar{x}, R_x$ 已在上文得到明确; $u(x_n)$ 、 $u(P_n)$ 、 $u(P)$ 、 $u(\bar{x})$ 和 $u(R_x)$ 依次表示 x_n 、 P_n 、 P 、 \bar{x} 和 R_x 的标准不确定度; $r(x_i, x_j)$ 、 $r(x_i, P_j)$ 和 $r(P_i, P_j)$ 依次表示 x_i 与 x_j 、 x_i 与 P_j 、 P_i 与 P_j 间的误差相关系数。另外需要指出的是, 以上三式还可用矩阵形式来表示, 从而以下的分析也可以通过灵敏系数矩阵以及相关系数矩阵的讨论来完成。

显然, 光斑一、二阶矩参量及其不确定度都依赖于光斑强度分布。因此, 在探测器各单元位置不确定度、功率测量不确定度以及所有变量间的误差相关系数已知的条件下, 对测出的每一幅光斑图像, 都应该且可以分别计算其一、二阶矩参量的测量不确定度值。

对一个技术参量齐全的光斑测试设备, 应该提

供探测器各单元位置不确定度、功率测量不确定度以及所有变量间的相关系数。实际应用中, 可根据具体情况对以上三式进行各种简化计算, 以便给出光斑矩参量测量不确定度的评估。

4 矩参量不确定度简化分析

针对不同的测试条件与要求, 实际应用中, 可对矩参量测量不确定度进行一定的简化分析。

4.1 变量的误差之间不相关

若全部 x_n 和 P_n 的误差相互独立, 即 $r(x_i, x_j) = 0$, $r(x_i, P_j) = 0$, $r(P_i, P_j) = 0$, 这里 n, i, j 取值范围均为 $1, 2, \dots, N$, 且 $i \neq j$, 则

$$u(P) = \left[\sum_{n=1}^N u^2(P_n) \right]^{1/2}, \quad (17)$$

$$u(\bar{x}) = \frac{1}{P} \left\{ \sum_{n=1}^N [P_n^2 u^2(x_n) + X_n^2 u^2(P_n)] \right\}^{1/2}, \quad (18)$$

$$u(R_x) = \frac{2}{R_x P} \left\{ \sum_{n=1}^N [(2P_n X_n)^2 u^2(x_n) + (X_n^2 - R_x^2/4)^2 u^2(P_n)] \right\}^{1/2}. \quad (19)$$

根据(17)式, 为减小光斑总功率测量不确定度, 必须降低各单元上的功率不确定度。根据(18)式和(19)式, 光斑质心测量不确定度不仅依赖于单元位置不确定度和单元功率测量不确定度, 而且与光斑总功率及光强分布有密切关系。

当从理论分析与实验研究的角度确定探测器所有单元位置及测量功率间的误差相关系数都存在困

难时(这在实际工作中是普遍存在的), 常采用以上简化计算方法, 以便得到光斑矩参量测量不确定度的近似估计值。

4.2 $u(x_n)$ 和 $u(P_n)$ 皆为常数

在全部 x_n 和 P_n 的误差相互独立基础上, 若 $u(x_n) = u_x$ 为常数, $u(P_n) = u_p$ 为常数, $n = 1, 2, \dots, N$, 则

$$u(P) = \sqrt{N} u_p, \quad (20)$$

$$u(\bar{x}) = \frac{1}{P} (u_x^2 \sum_{n=1}^N P_n^2 + u_p^2 \sum_{n=1}^N X_n^2)^{1/2}, \quad (21)$$

$$u(R_x) = \frac{2}{R_x P} [4u_x^2 \sum_{n=1}^N P_n^2 X_n^2 + u_p^2 \sum_{n=1}^N (X_n^2 - R_x^2/4)^2]^{1/2}. \quad (22)$$

对单元均匀分布的阵列探测器, 各单元所用材料、传感器、采集电路以及制作工艺等的一致性使得 $u(x_n) = u_x$ 和 $u(P_n) = u_p$ 的假设通常是合理的。需要指出: 若探测面上各单元的探测面积不同, 则 $u(P_n) = u_p$ 的假设一般不成立, 因而不能采用(20)式~(22)式。

根据(21)式, 使得每个单元刚好饱和时的光斑是阵列测试法下各种强度分布的光斑中质心测量不

确定度最小的。根据该结论, 在光斑质心测量误差要求一定条件下, 可得到对实际阵列测试设备各单元参量误差的最低要求, 因此对相关技术指标的设计有重要参考价值。

4.3 u_x 很小

在全部 x_n 和 P_n 的误差相互间独立, $u(x_n) = u_x$ 为常数, $u(P_n) = u_p$ 为常数的基础上, 若 u_x 可忽略, $n = 1, 2, \dots, N$, 则

$$u(P) = \sqrt{N}u_p, \quad (23)$$

$$u(\bar{x}) = \frac{u_p}{P} \left(\sum_{n=1}^N X_n^2 \right)^{1/2}, \quad (24)$$

$$u(R_x) = \frac{2u_p}{R_x P} \left(\sum_{n=1}^N X_n^4 - \frac{1}{2} R_x^2 \sum_{n=1}^N X_n^2 + \frac{N}{16} R_x^4 \right)^{1/2}, \quad (25)$$

由(24)式和(25)式,光斑质心和半径测量不确定度都与光斑功率成反比,因此实际测试中,应通过调节光源强度、选择探测器量程等手段使探测器尽可能工作在相对较高的功率状态。光斑质心也应尽量调节到面阵几何中心(更准确地讲,是探测面上所选的计算窗口中心),这有助于减小光斑质心和半径测量不确定度。

阵列探测器各单元的几何位置不确定度相对功率不确定度较小的假设往往能得到满足,因此,对应的光斑矩参量不确定度的计算表达式对实际应用具有重要意义。

5 典型光斑测试设备不确定度分析

5.1 激光光斑分析仪

激光光斑分析仪(laser intensity distribution analyser, LIDA)是一种新型激光束功率密度分布阵列探测器。其探测器单元位置分布如图1,其中网格交叉点代表探测器单元中心位置,相邻单元间距为1 cm,单元总数 $N=481$ 。探测器单元的位置不确

定度很小,设光斑强度分布使得零阶近似成立,则可忽略 $u(x_n)$ 对光斑矩参量测量不确定度的影响,仅考虑 $u(P_n)$ 的影响,且可近似认为各单元测量功率的随机误差是独立同分布的。因此,可按(23)式~(25)式分析激光光斑分析仪光斑矩参量测量不确定度。

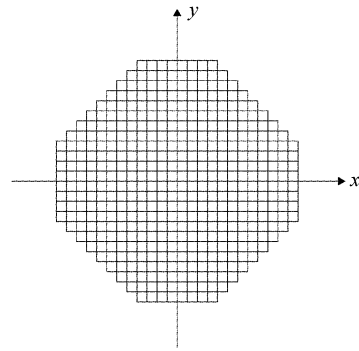


Fig. 1 Distribution of all detector units of LIDA

显然,总功率不确定度为单个探测器单元测量功率不确定度的 \sqrt{N} 倍。由图1,不难求出 $\sum_{n=1}^N X_n^2$ 和 $\sum_{n=1}^N X_n^4$,代入(24)式和(25)式,得

$$u(\bar{x}) = \frac{u_p}{P} \sqrt{481 \bar{x}^2 + 18484}, \quad (26)$$

$$u(R_x) = \frac{2u_p}{P} \sqrt{\frac{1}{R_x^2} (481 \bar{x}^4 + 110904 \bar{x}^2 + 1483564) - \frac{1}{2} (481 \bar{x}^2 + 18484) + \frac{N}{16} R_x^2}, \quad (27)$$

设光斑强度为高斯分布,峰值功率密度为 I_0 (W/cm^2),半径为 w (cm),则光斑总功率为 $P = \pi w^2 I_0 / 2$ (W),代入(26)式和(27)式,可得该光斑 $u(\bar{x})$ 和 $u(R_x)$ 。

典型情况下,取 $u_p / I_0 = 1\%$,可得曲线 $u(\bar{x}) \sim (\bar{x}, R_x)$ 和 $u(R_x) \sim (\bar{x}, R_x)$,分别见图2和图3。由图2,光斑偏离LIDA中心越远,则其 $u(\bar{x})$ 越大。由图3,对相同 R_x ,光斑偏离中心越远,则 $u(R_x)$ 越大;对一定的光斑偏心位置, R_x 越小,则 $u(R_x)$ 越大。这些结论对提高实际测试精度有较大参考价值。

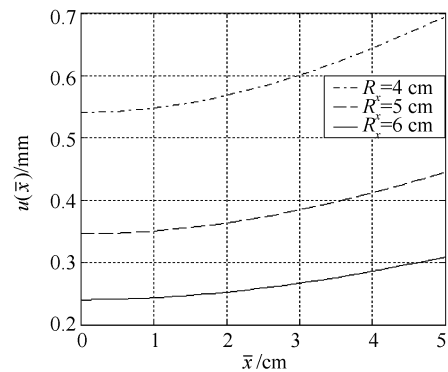


Fig. 2 Uncertainty of spot centroid

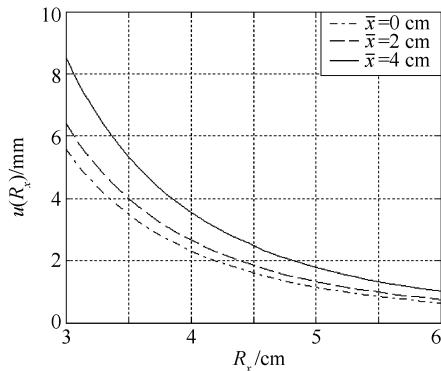


Fig. 3 Uncertainty of spot radius

5.2 CCD 面阵探测器

经过像素尺寸、面响应均匀性和像素响应的非线性等标定后,在忽略各像素位置不确定度,假设所有像素的光强测量不确定度相同条件下,根据 CCD 探测器单像素的光强测量不确定度,采用 4.3 节的结果,不难得到光斑矩参量的测量不确定度。不妨设 CCD 像素数为 $h \times v$ (实际为计算中选定的像素窗口), h, v 分别为 x, y 方向的像素数,以一个像素的大小为长度单位,坐标原点取在窗口几何中心,可得

$$u(P) = u_p \sqrt{hv}, \quad (28)$$

$$u(\bar{x}) = \frac{u_p}{P} \sqrt{\frac{1}{12} hv (12\bar{x}^2 + h^2 - 1)}, \quad (29)$$

$$u(R_x) = \frac{2u_p}{R_x P} \sqrt{\frac{hv}{240} [240\bar{x}^4 + 120(h^2 - 1)\bar{x}^2 + 3h^4 - 10h^2 + 7 - 10R_x^2(12\bar{x}^2 + h^2 - 1) + 15R_x^4]}. \quad (30)$$

对一定的光强分布,根据上式容易得到对应的光斑矩参量测量不确定度的定量数值结果。在光斑强度分布为高斯型、探测器噪声为均匀分布或高斯分布情况下,以上三式的正确性已很好地通过了用随机数模拟噪声的计算机仿真的验证。

结论 以光斑矩参量的积分定义为基础,得到了:1) 零阶近似下,光斑矩参量离散求和形式的表达式,并明确了其中各量的含义;2) 光斑矩参量测量不确定度一般表达式;3) 各种常见简化条件下的光斑矩参量测量不确定度表达式;4) 合理近似下的 CCD 面阵探测器的光斑矩参量测量不确定度表达式。由此建立了光斑矩参量计算及其不确定度评定的一套完整方法。

数据处理报告中,应按测量不确定度的有关规范和标准给出扩展不确定度及包含因子^[7]。由参量测量值及其绝对不确定度,可得相对不确定度。文中有关 \bar{x}, R_x 的讨论同样适用于 \bar{y}, R_y 。本文的分析实质上是数学形式上的,因此,其结论在物理与化学等相关测试领域具有普适性。

进行光斑矩参量的误差分析与计算的前提是:已知阵列各单元位置不确定度、功率不确定度以及各相关系数。这需要对测试设备进行分析或实验研究而得到;另外,光斑强度分布特性也是估计光斑矩参量测量不确定度的重要信息。

致谢 感谢傅淑珍研究员、袁学文、叶一东、廖原、谢川林、周山、向汝建、葛成良等同志的帮助。

参 考 文 献

1 Hu Linting, Lu Xiankui, Jin Junkun *et al.*. Laser facula

measurement with CCD. *Laser Technology* (激光技术), **25**(2): 154~157 (in Chinese)

2 Lü Baida. *Propagation and Control of High Power Lasers* (强激光的传输与控制). Beijing: National Defense Industry Press, 1999. 64~68 (in Chinese)

3 Ma Chong. Affection of detecting system noise to measurement of laser beam width. *Modern Measurement and Test* (现代计量测试), 2000, (1): 38~41 (in Chinese)

4 Jiang Wenhan, Xian Hao, Shen Feng. Detecting error of Shack-Hartmann wavefront sensors. *Chin. J. Quantum Electron.* (量子电子学报), 1998, **15**(2): 218~227 (in Chinese)

5 Guan Youguang, Fu Shuzhen, Gao Xueyan *et al.*. A novel energy density detectors of high energy laser. *High Power Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束), 2000, **12**(2): 175~177 (in Chinese)

6 Zhu Xiaopeng, Wei Xin, Ye Xiaojun *et al.*. Theoretical calculation of beam quality factor M^2 of stripe semiconductor lasers. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(1): 45~49 (in Chinese)

7 Liu Yingzhuang, Zhu Yaoting, Zhu Guanxi *et al.*. Study of under water spot spread of collimated laser beam. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2001, **28**(7): 617~620 (in Chinese)

8 General Equipment Department of Chinese People's Liberation Army. GJB 3756-99. *Expression and evaluation of measurement uncertainty* (测量不确定度的评定与表示). Beijing: Army Standard Press of General Equipment Department, 1999 (in Chinese)

9 Chen She, Yan Haixing, Li Shushan. Numerical simulation of adaptive optics system: effect of noise and detection error. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(5): 544~551 (in Chinese)

10 Li Xinyang, Jiang Wenhan. Analysis of the optimal-gradient reconstruction algorithm used in adaptive optical systems. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(6): 756~760 (in Chinese)

11 McComas B K, Friedman E J. Wavefront sensing for deformable space-based optics exploiting natural and synthetic guide stars. *Opt. Engng.*, 2002, **41**(8): 2039~2049