

标准激光光源近场空域测量精度研究

段亚轩^{1,2} 陈永权¹ 李 坤¹ 赵建科¹ 龙江波¹ 高立民¹

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)
² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了研究标准激光光源近场空域测量精度,在理论方面建立了标准激光光源近场强度分布的理论模型,在实验方面提出了科学级 CCD 面响应非均匀性校正方案和激光近场计算算法。利用非均匀性校正后的科学级 CCD 和二维扫描装置,在 1053 nm 标准激光光源软边光阑 50 mm×50 mm 口径内 S 形扫描,通过子孔径拼接得到标准激光光源近场图像。近场分布测试结果与理论值一致,差异主要是因为离轴抛物面镜表面粗糙度与科学级 CCD 随机噪声产生了高频分量。对近场参数测试结果进行分析,调制度扩展不确定度为 0.08($k=2$),对比度扩展不确定度为 0.01($k=2$)。研究结果提高了国家大科学工程激光参数测量系统近场空域测试置信度。

关键词 测量; 激光; 近场; 调制度; 对比度; 不确定度

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0308003

Study on Spatial Measurement Accuracy of Standard Laser Source Near-Field Parameters

Duan Yaxuan^{1,2} Chen Yongquan¹ Li Kun¹ Zhao Jianke¹ Long Jiangbo¹ Gao Limin¹

(¹ Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences,
Xi'an, Shaanxi, 710119, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to study on the spatial measurement accuracy of standard laser source near-field parameters, the theoretical model of near-field intensity distribution of standard laser source is established. The surface response non-uniformity correction program of the scientific grade CCD and calculation algorithm of laser near field is proposed. Using corrected scientific grade CCD and two-dimensional scanning device, the 50 mm×50 mm soft-stop images of 1053 nm standard laser source are obtained by S-shaped scanning and capturing. The near-field image of standard laser source is got by the sub-aperture image mosaic. The test results of near-field intensity distribution are accordance with the theoretical results. The main difference between them is the high frequency components mainly caused by the roughness of off-axis parabolic mirror and random noise of the scientific grade CCD. The analysis of near-field parameters test results is that the uncertainty of modulation is 0.08 ($k=2$), and the uncertainty of contrast is 0.01 ($k=2$). The near-field measurement confidence of laser measurement system of National Science and Engineering is improved by the study results.

Key words measurement; laser; near-field; modulation; contrast; uncertainty

OCIS codes 120.4630; 120.4800; 140.5960; 110.4100; 200.4880

1 引 言

在国家大科学工程高功率激光器装置中,要求尽可能提高增益介质能量的提取效率,降低光束传

输中非线性效应对光学元件破坏的风险,并减少由衍射引起的光束调制^[1-3]。因此,各子束关键位置的近场参数测试对高功率激光系统光束控制和运行

收稿日期: 2013-09-16; 收到修改稿日期: 2013-10-21

基金项目: 神光 III 大科学工程资助项目(091Z512BOA)

作者简介: 段亚轩(1983—),男,博士研究生,主要从事光学参数精密诊断方面的研究。E-mail: 6216366@163.com

导师简介: 高立民(1965—),男,研究员,博士生导师,主要从事光电技术和高功率激光参数诊断等方面的研究。

E-mail: glm@opt.ac.cn

起至关重要的作用。激光近场空域一般采用调制度和对比度两个参数^[4]来表征。激光参数测量系统主要针对我国大科学工程中应用研究的高功率大型激光器,主要功能是在装置运行发射期间,完成各子束关键位置的激光近场、波前、远场焦斑形态、时间波形、能量、功率等参数的测试^[5-6],其系统引入的附加近场调制度和对比度,必须采用标准激光光源进行离线标定。目前主要从近场图像处理与分析方面研究激光参数测量系统的近场调制度和对比度^[7-8],并未考虑标准激光光源本身引入的附加近场调制度和对比度。标准激光光源近场空域测量精度的研究甚少,本文从理论和实验方面去定量研究其近场调制度和对比度的测量精度,准确评价激光参数测量系统的近场参数指标,这将为我国大科学工程高功率激光器装置建设提供保障。

2 理论分析

2.1 标准激光光源近场空域理论模型

标准激光光源由激光单模光纤点源和离轴折返式平行光管组成,如图 1 所示,激光单模光纤点源置于离轴折返式平行光管的焦点位置,输出发散光经平面镜反射,由离轴抛物镜准直为平行光输出。以单模光纤端面位置为起始位置 $z = 0$,光波场 $E_1(x_1, y_1, 0)$ 用高斯模型来近似^[9] 表示为

$$E_1(x_1, y_1, 0) = C \exp\left(-\frac{x_1^2 + y_1^2}{\omega_0^2}\right), \quad (1)$$

式中 C 为振幅常量, ω_0 为基模高斯光束的腰斑半径。

根据图 1,单模光纤点源端面 RP1 至观察面 RP2 的 ABCD 变换矩阵可表示为

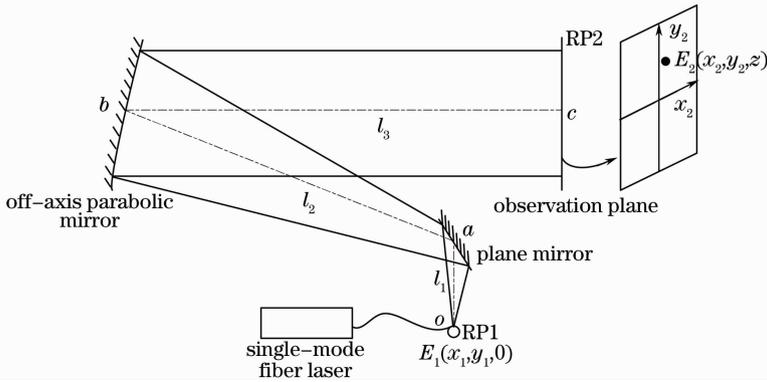


图 1 标准激光光源示意图

Fig. 1 Schematic of standard laser source

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & l_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{l_3}{f} & (l_1 + l_2 + l_3) - \frac{(l_1 + l_2)l_3}{f} \\ -\frac{1}{f} & 1 - \frac{l_1 + l_2}{f} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中 l_1 为单模光纤点源 o 距平面镜中心 a 的距离, l_2 为平面镜中心 a 距离轴抛物面镜中心 b 的距离, l_3 为观察面 RP2 距离轴抛物面镜中心 b 的距离, f 为离轴折返式平行光管的焦距。

根据基尔霍夫标量衍射理论和 Collins 公式^[10],得到标准激光光源观察面 RP2 处的光波场:

$$E_2(x_2, y_2, z) = \left(-\frac{i}{\lambda B}\right) \exp(ikz) \iint_{s_1} E_1(x_1, y_1, 0) \times \exp\left\{\frac{ik}{2B}[A(x_1^2 + y_1^2) + D(x_2^2 + y_2^2) - 2(x_1x_2 + y_1y_2)]\right\} dx_1 dy_1, \quad (3)$$

式中积分对激光光纤点源所在的 s_1 面进行, $z = l_1 + l_2 + l_3$ 。利用菲涅耳衍射公式, (3) 式可化简为

$$E_2(x_2, y_2, z) = \left(-\frac{i}{\lambda B}\right) \exp(ikz) \exp\left[\frac{ikD}{2B}(x_2^2 + y_2^2)\right] \times \mathcal{F}\left\{E_1(x_1, y_1, 0) \times \exp\left[\frac{ikA}{2B}(x_1^2 + y_1^2)\right]\right\}, \quad (4)$$

式中 $\mathcal{F}\{\}$ 表示傅里叶变换算子, k 表示波数, 则标准激光光源观察面 RP2 处的光场强度分布 $I_2(x_2, y_2, z)$ 为

$$I_2(x_2, y_2, z) = \left| \left(-\frac{i}{\lambda B}\right) \mathcal{F}\left\{E_1(x_1, y_1, 0) \times \exp\left[\frac{ikA}{2B}(x_1^2 + y_1^2)\right]\right\} \right|^2. \quad (5)$$

当光纤点源置于离轴折返式平行光管的焦点位置,即 $l_1 + l_2 = f$,且观察面距离轴抛物面镜中心的距离为 $l_3 = f$,则根据(2)式得 $A = 0, B = f$,将其代入(5)式得

$$I_2(x_2, y_2, 2f) = K \times |\mathcal{F}\{E_1(x_1, y_1, 0)\}|^2, \quad (6)$$

式中 $K = \frac{1}{\lambda^2 f^2}$ 。从(6)式可以看出,当观察面距离轴抛物面镜中心的距离等于离轴折返式平行光管焦距时,观察面处的光场强度分布为光纤点源端面光波场的傅里叶变换的模的平方。

2.2 近场空域评价

激光近场空域评价主要采用调制度和对比度两个参数。调制度 M 定义为全强度口径内峰值强度与平均强度之比,用于半定量地描述激光束宏观的近场分布均匀性,表示为(7)式,对比度 C 定义为空间强度分布起伏的均方根值,用于定量描述激光束传输过程中引入的中、高频强度调制度,见(8)式:

$$M = \frac{I_{\max}}{I_{\text{avg}}}, \quad (7)$$

$$C = \frac{1}{I_{\text{avg}}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (I_i - I_{\text{avg}})^2}{N}}, \quad (8)$$

式中 I_{\max} 表示计算口径内强度分布的峰值强度, I_{avg} 表示计算口径内强度分布的平均强度, I_i 表示第 i 个采样点的光强度值, N 表示总的采样点数。

3 实验方案

3.1 实验装置

标准激光光源近场可通过 CCD 探测器成像后输出近场图像,其像元输出灰度反映了近场取样点的激光强弱,通过对近场图像的处理和计算获得标准激光光源近场调制度和对比度。受 CCD 探测器靶面大小的限制,无法完整得到标准激光光源近场图像,故将 CCD 固定在二维扫描装置上,并在观察面进行 S 形二维扫描,以保证多次子孔径拼接后能将整个观察面完全覆盖,每次采集得到的相邻图像具有一定的重叠部分,通过子孔径拼接算法得到标准激光光源近场图像。

为了减小 CCD 探测器本身对标准激光光源近场空域测试的影响,要求 CCD 探测器线性响应动态范围大、信噪比高、面响应非均匀性小,故采用科学级 CCD 作为探测器,其具体参数为:光谱响应范围为 300~1200 nm,像元尺寸为 $13 \mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$,有效像素为 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$,量化位数为 12 位,

靶面尺寸为 $13.3 \text{ mm} \times 13.3 \text{ mm}$,响应非线性小于 2%;面响应不均匀性小于 3%。

二维扫描装置具体参数为:行程范围 x 方向 200 mm, y 方向 150 mm;定位复位精度优于 $5 \mu\text{m}$;直线度优于 $10 \mu\text{m}$; x, y 轴导轨垂直度小于 $1'$;运动过程中晃动小于 0.01 mm。

3.2 科学级 CCD 面响应非均匀性校正

由于受科学级 CCD 的面响应非均匀性等影响^[11-13],直接由近场图像计算而来的调制度和对比度会有很大误差,所以必须对科学级 CCD 进行非均匀性校正,以降低这些因素带给测量的影响。利用自研的 CCD 非均匀性校正装置对所选用的科学级 CCD 现场非均匀性校正如图 2 所示,标准面光源由 1053 nm 脉冲激光器和积分球组成,由于脉冲激光光源经积分球两级匀化,其积分球出光口的均匀性经标定,其调制度 M 为 1.01,故 CCD 非均匀性校正装置引入的非均匀性可以忽略。

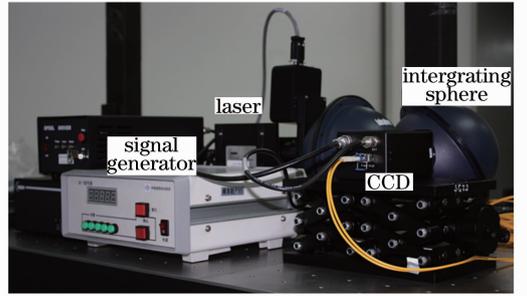


图 2 科学级 CCD 非均匀性校正

Fig. 2 Scientific grade CCD non-uniformity correction

科学级 CCD 放置在积分球出光口,信号发生器给出同步信号使脉冲激光器与 CCD 探测器采集同步,并线性控制脉冲激光器的输出强度。在科学级 CCD 线性响应区内,光强档位选择 10 档,每档采集 10 幅图像,由于 CCD 探测器的光电转换特性为线性^[14],因此,对科学级 CCD 探测器非均匀性校正采用线性校正模型。

$$I'_m = A(i, j) \times I_{m,n}(i, j) + B(i, j), \quad (9)$$

$$m = 1, 2, \dots, 10, n = 1, 2, \dots, 10,$$

式中 $A(i, j), B(i, j)$ 为非均匀性校正因子, $I_{m,n}(i, j)$ 表示第 m 档光强度下采集的第 n 帧图像在 CCD 靶面坐标 (i, j) 的灰度值。

$$\bar{I}_m(i, j) = \frac{\sum_{n=1}^{10} I_{m,n}(i, j)}{10}, m = 1, 2, \dots, 10, \quad (10)$$

$$I'_m = \frac{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \bar{I}_m(i, j)}{p \times q}, m = 1, 2, \dots, 10, \quad (11)$$

式中 I'_m 表示了平均灰度分布为 $\bar{I}_m(i, j)$ 时的平均灰度值, 以此值作为第 m 档光强度下科学级 CCD 探测器非均匀性校正期望值。利用最小二乘法, 得到非均匀性校正矩阵因子 $A(i, j)$ 和 $B(i, j)$ 。通过对科学级 CCD 进行非均匀性校正, 其行方向与列方向校正前后

灰度分布曲线如图 3 所示, 从图中可以看出, 校正后的科学级 CCD 均匀性大幅提高, 利用(7)、(8)式计算得到非均匀校正后的科学级 CCD 调制度 M 由 1.22 降至 1.08, 对比度 C 由 0.027 降至 0.011。

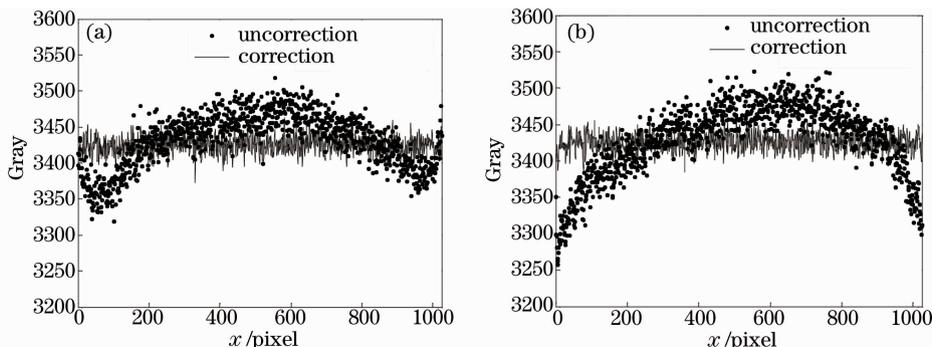


图 3 科学级 CCD 非均匀性未校正和校正分布曲线。(a)行方向; (b)列方向

Fig. 3 Distribution curves of scientific grade CCD uncorrection and correction. (a) Row direction; (b) column direction

3.3 计算算法

标准激光光源近场空域计算算法主要包括子孔径拼接、去背景噪声、去本底、去奇异点和近场参数计算。

基于空间像素灰度的相关算法进行近场图像子孔径拼接, 其计算量太大。为了节省计算时间, 并保证子孔径拼接精度, 采用相位相关算法进行近场图像拼接。

由于利用相位相关函数得到的平移量往往不是整数, 直接进行拼接会产生空洞, 从而影响近场参数计算结果。通过双线性插值得到非整数坐标的灰度值, 然后将相邻子孔径图像进行拼接, 最终得到标准激光光源整个全口径近场图像。

子孔径拼接后的标准激光光源近场图像采用最大类间方差法^[15]去背景噪声。选取近场图像分析区域, 统计灰度直方图, 灰度直方图将图像的强度统计分为噪声区和信号区。由于噪声区与信号区内部较均匀, 灰度方差较小, 因此, 近场图像整体灰度方差则反映了噪声区与信号区边界点的灰度跃变情况。选取阈值 I_{th} 使噪声区灰度方差和信号区的灰度方差与图像整体灰度方差相差最大的灰度等级就

是最佳阈值, 其评价函数 g 为

$$g = \max_{I_{th}=1-L} \{ \omega_0(I_{th}) [\sigma_0^2(I_{th}) - \sigma^2]^2 + \omega_1(I_{th}) [\sigma_1^2(I_{th}) - \sigma^2]^2 \}, \quad (12)$$

式中 $\omega_0(I_{th}) = \sum_{0 \leq i \leq I_{th}} p(i)$, $\omega_1(I_{th}) = \sum_{I_{th} < i < L} p(i)$; $p(i)$ 为灰度值为 i 的像素个数, $\sigma_0(I_{th})$ 为噪声区灰度方差, $\sigma_1(I_{th})$ 为信号区灰度方差, σ 为图像整体灰度方差。阈值 I_{th} 在灰度等级 $0 \sim L$ 之间选取, 使评价函数 g 最大的阈值为最佳阈值。

近场图像中的有效强度统计分布从背景中提取出来后, 将噪声区最大概率灰度 I_N 作为本底灰度, 近场图像整体减去该灰度值去本底。由于近场调制度容易受 CCD 随机噪声和奇异点影响, 必须对近场图像去奇异点。按照强激光近场通量分布统计原理^[7], 奇异点是否存在的判定阈值为

$$q_{th} = \bar{I} + 5\sigma, \quad (13)$$

式中 \bar{I} 为图像去本底后的平均灰度值, σ 为图像去本底后的灰度值标准偏差, 当像素位置 (x, y) 处的灰度值 $I_q(x, y)$ 大于判定阈值 q_{th} 时, 即为奇异点。将奇异点像素灰度设定为邻域 8 个点的像素灰度的平均值, 即

$$I_q(x, y) = \frac{1}{8} [I_q(x-1, y-1) + I_q(x, y-1) + I_q(x+1, y-1) + I_q(x+1, y) + I_q(x+1, y+1) + I_q(x, y+1) + I_q(x-1, y+1) + I_q(x-1, y)], \quad (14)$$

近场图像去奇异点并平滑处理后, 根据(7)、(8)式

计算近场调制度 M 和对比度 C 。

4 实验结果与不确定度分析

4.1 实验结果

标准激光光源具体参数为：光纤激光器输出波长为 1053 nm；光谱线宽不大于 2 nm；脉冲宽度为 10 ps；重复频率为 30 MHz；平均输出功率可调，且不稳定度为 $\pm 0.3\%$ ；光纤芯径为 $6.2\ \mu\text{m}$ ，小于平行光管一倍衍射限。离轴折返式平行光管焦距 $f = 1200\ \text{mm}$ ；入瞳直径 $D = 160\ \text{mm}$ ；视场角 $2\omega = 1.2^\circ$ 。由于实际工程需要标准激光光源口径为 $50\ \text{mm} \times 50\ \text{mm}$ ，为了消除直边衍射效应对近场参数测试的影响，在离轴折返式平行光管出光口处固定软边光阑，其距离轴抛物面镜距离为 1200 mm。

利用 Zygo 激光干涉仪标定离轴折返式平行光管，保证光纤点源置于其焦点位置。标准激光光源近场空域测试如图 4 所示。

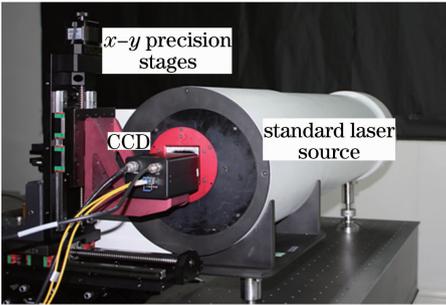


图 4 标准激光光源近场空域测试

Fig. 4 Near-field test of standard laser source

首先调节光纤激光器输出功率，使科学级 CCD 工作在线性响应区。然后控制二维扫描装置，设置扫描步长为 10 mm，科学级 CCD 在软边光阑面进行 S 形二维扫描采集近场图像，扫描路径如图 5 所示，最后将采集的 25 幅图像利用子孔径拼接算法得到标准激光光源近场图像如图 6 所示。

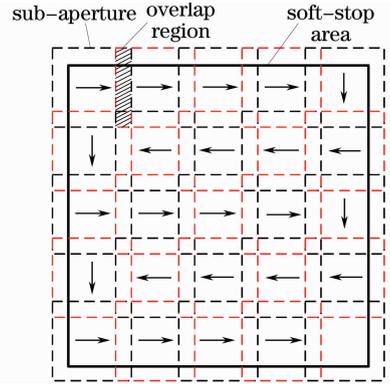


图 5 扫描路径示意图

Fig. 5 Schematic of scanning path

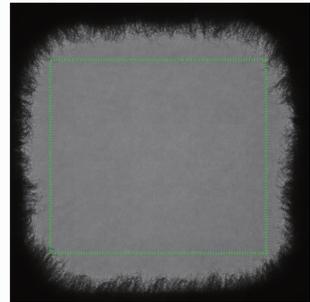


图 6 标准激光光源近场拼接图像

Fig. 6 Near-field mosaic image of standard laser source

选取标准激光光源近场图像宽度的 80% 为分析区域，如图 6 中虚线所示。将标准激光光源近场分布水平与垂直方向测试结果归一化，对其利用最小二乘法进行多项式拟合。根据标准激光光源具体参数，利用(6)式，选取计算采样间隔为 0.5 mm，计算得到标准激光光源近场分布的理论模拟结果，其近场调制度 M 为 1.11，对比度 C 为 0.027。标准激光光源近场分布水平与垂直方向理论结果与测试结果对比如图 7 所示。

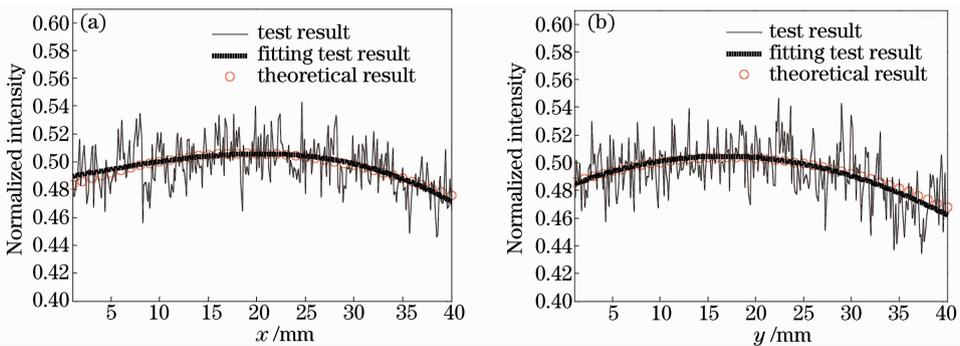


图 7 标准激光光源近场分布理论结果与测试结果。(a)水平方向；(b)垂直方向

Fig. 7 Theoretical results of near-field distribution of standard laser source and test results.

(a) Horizontal direction; (b) vertical direction

从图 7 中可以看出,标准激光光源近场分布理论结果与测试拟合结果水平方向极差为 0.003,垂直方向极差为 0.005。由此可见,标准激光光源近场分布测试结果与理论值是一致的。差异主要是由于离轴抛物面镜表面粗糙度和科学级 CCD 随机噪声产生的高频分量引起。调节光纤激光器输出功率,使科学级 CCD 响应平均灰度约为饱和灰度的 30%,50%和 70%,并分别测试 5 次,利用近场计算算法得到标准激光光源近场调制度和对比度结果如表 1 所示,调制度 M 平均值为 1.135,对比度 C 平均值为 0.0324。

表 1 标准激光光源近场参数测试结果

Table 1 Near-field test results of standard laser source

Time	Average gray	Modulation	Contrast
1	1011.47	1.143	0.0326
2	1010.87	1.141	0.0325
3	1015.26	1.136	0.0328
4	1016.34	1.138	0.0326
5	1018.05	1.141	0.0331
6	2014.12	1.135	0.0325
7	2009.34	1.132	0.0326
8	2013.31	1.131	0.0323
9	2011.28	1.131	0.0319
10	2005.20	1.133	0.0323
11	3076.69	1.134	0.0324
12	3079.25	1.133	0.0321
13	3061.08	1.131	0.0313
14	3097.11	1.134	0.0320
15	3072.24	1.138	0.0324
Average result		1.135	0.0324

4.2 不确定度分析

标准激光光源近场空域测试不确定度来源主要由以下几个方面组成。

1) 光纤激光光源引入的不确定度 $u_1(M)$ 和 $u_1(C)$:1053 nm 单模光纤激光器输出平均功率稳定性为 $\pm 0.3\%$ (均方根值,8 h),且 M^2 因子为 1.05,光纤激光光源本身的光场分布与标准激光光源输出强度分布关系如(6)式所示,通过多次实验,调节光纤激光光源的输出功率,测量得到相应的标准激光

光源近场调制度和对比度,对测试数据分析,其引入的不确定度 $u_1(M) \approx 0.01, u_1(C) \approx 0.002$ 。

2) 离轴抛物面镜引入的不确定度 $u_2(M)$ 和 $u_2(C)$:离轴抛物面镜膜层反射率均匀性大于 99%,表面光洁度为 II 级,在测试口径内,表面无灰尘,表面粗糙度对标准激光光源近场只引入高频分量,不影响近场分布。离轴抛物面镜引入的不确定度 $u_2(M) \approx 0.02, u_2(C) \approx 0.002$ 。

3) 科学级 CCD 探测器引入的不确定度 $u_3(M)$ 和 $u_3(C)$:科学级 CCD 面响应非均匀性校正后,近场调制度 M 为 1.018,对比度 C 为 0.011。调节光纤激光器输出功率,确保科学级 CCD 工作在线性响应区内。科学级 CCD 的随机噪声对标准激光光源近场测试只引入高频分量。科学级 CCD 探测器引入的不确定度 $u_3(M) \approx 0.02, u_3(C) \approx 0.003$ 。

4) 二维扫描装置引入的不确定度 $u_4(M)$ 和 $u_4(C)$:二维扫描装置 x, y 轴导轨之间垂直度误差小于 $1'$,直线度优于 $10 \mu\text{m}$,拼接口径内近场图像与实际偏差为 $14.5 \mu\text{m}$,倾斜、晃动小于 0.01 mm 。CCD 靶面坐标与扫描轨迹坐标之间夹角小于 $30''$ 。此引入的近场图像与实际偏差可以忽略。故二维扫描装置引入的不确定度 $u_4(M) \approx 0.02, u_4(C) \approx 0.002$ 。

5) 外界背景环境引入的不确定度 $u_5(M)$ 和 $u_5(C)$:标准激光光源近场测试在千级暗室(洁净度为千级的暗室)进行,温度为 $22 \text{ }^\circ\text{C}$,相对湿度为 40%,外界背景环境引入的不确定度可以忽略,即 $u_5(M) \approx 0, u_5(C) \approx 0$ 。

6) 近场测试算法引入的不确定度 $u_6(M)$ 和 $u_6(C)$:利用相位相关算法进行子孔径拼接,其精度优于 1 pixel。采用最大类间方差法选取背景噪声阈值,由噪声区最大概率灰度值得到本底灰度,并根据激光通量分布选取去奇异点阈值并进行平滑处理,近场测试算法引入的不确定度 $u_6(M) \approx 0.01$ 和 $u_6(C) \approx 0.002$ 。

以上各分量独立互不相关,则合成不确定度为

$$u(M) = \sqrt{u_1^2(M) + u_2^2(M) + u_3^2(M) + u_4^2(M) + u_5^2(M) + u_6^2(M)} \approx 0.04, \quad (15)$$

$$u(C) = \sqrt{u_1^2(C) + u_2^2(C) + u_3^2(C) + u_4^2(C) + u_5^2(C) + u_6^2(C)} \approx 0.005. \quad (16)$$

选取包含因子 $k=2$,则标准激光光源近场空域测试扩展不确定度为

$$U(M) = k \cdot u(M) = 0.08, \quad (17)$$

$$U(C) = k \cdot u(C) = 0.01. \quad (18)$$

5 结 论

基于基尔霍夫标量衍射理论和 Collins 公式得到标准激光光源近场强度分布的理论模型,并提出了标准激光光源近场空域测试方案。利用自行研制

的科学级 CCD 非均匀性校正装置对科学级 CCD 进行非均匀性校正,从而降低了探测器本身响应非均匀性对测试结果的影响。研究了近场空域计算算法,通过子孔径拼接、去背景噪声、去本底和去奇异点,从而合理给出标准激光光源近场空域参数测试结果。标准激光光源近场光场强度分布测试拟合结果与理论模拟结果归一化后,水平方向极差为 0.003,垂直方向极差为 0.005,由此可见,标准激光光源近场分布测试结果与理论值是一致的。差异主要是由于离轴抛物面镜表面粗糙度和科学级 CCD 随机噪声产生的高频分量引起。对近场空域参数测试结果进行不确定度分析,调制度扩展不确定度为 0.08($k=2$),对比度扩展不确定度为 0.01($k=2$),从而提高了国家大科学工程激光参数测量系统的近场空域测试结果置信度。

参 考 文 献

- 1 F Rainer, R K Dickson, R T Jemirgs, *et al.*. Development of practical damage-mapping and inspection systems[C]. SPIE, 1999, 3492: 556-563.
- 2 G C Bhar, A K Chaudhary, P Kumbhakar. Study of laser induced damage threshold and effect of inclusions in some nonlinear crystals[J]. Appl Surf Sci, 2000, 161(1-2): 155-161.
- 3 Wen Shuangchun, Qian Liejia, Fan Dianyuan. A study on multiple filamentation of locally modulated laser beams[J]. Acta Physica Sinica, 2003, 52(7): 1640-1644.
文双春, 钱列加, 范滇元. 强光束局部小尺度调制致多路成丝现象研究[J]. 物理学报, 2003, 52(7): 1640-1644.
- 4 Du Xiangwan. Factors for evaluating beam quality of a real high power laser on the target surface in far field[J]. Chinese J Lasers, 1997, 24(4): 327-332.
杜祥琬. 实际强激光远场靶面上光束质量的评价因素[J]. 中国激光, 1997, 24(4): 327-332.
- 5 B M Van, Wonierghem, J A Caird, *et al.*. Recent results of the national ignition facility beamlet demonstration project [C]. SPIE, 1995, 2633: 22-28.
- 6 Yu Yongai, Zhang Lingling, Tang Qianjin, *et al.*. Real-time laser beam quality measurement technique[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(2): 255-258.
于永爱, 张玲玲, 唐前进, 等. 激光束质量实时测量技术[J]. 中国激光, 2007, 34(2): 255-258.
- 7 Zhao Junpu. Study on High Power Solid State Laser Beam Quality Diagnosis [D]. Chengdu: Sichuan University, 2006, 24-25.
赵军普. 高功率固体激光光束质量诊断方法研究[D]. 成都: 四川大学, 2006. 24-25.
- 8 Sun Zhihong, Peng Zhitao, Liu Hua, *et al.*. Calculated methods of high power laser near field parameters[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(4): 544-548.
孙志红, 彭志涛, 刘 华, 等. 高功率激光近场空域计算方法[J]. 中国激光, 2008, 35(4): 544-548.
- 9 D Marcuse. Theory of Dielectric Optical Waveguide (Second Edition)[M]. New York: Academic Press, 1974.
- 10 Lü Baida. Propagation and Control of High-Power Lasers[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999. 78-109.
吕百达. 强激光的传输与控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. 78-109.
- 11 Satoru C, Tanaka, Tom Silvey, Gregory J Long, *et al.*. High-resolution, low-light, image-intensified CCD camera[C]. SPIE, 1991, 1448: 21-26.
- 12 D L Marta, P Jaume, A Montserrat, *et al.*. Optimized algorithm for the spatial nonuniformity correction of an imaging system based on a charge-coupled device color camera[J]. Appl Opt, 2007, 46(2): 167-174.
- 13 D L Perry, E L Dereniak. Linear theory of nonuniformity correction in infrared staring sensors[J]. Opt Eng, 1993, 32(8): 1854-1859.
- 14 Wang Qingyou. Technology of Image Sensor Application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. 90-99.
王庆有. 图像传感器应用技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006. 90-99.
- 15 Chen Xinglin, Zheng Yanhong, Wang Yan. Influence of spot noise in inter-satellite optical communications and suppression algorithm[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(3): 743-747.
陈兴林, 郑燕红, 王 岩. 光斑噪声对星间光通信的影响及抑制算法[J]. 中国激光, 2010, 37(3): 743-747.

栏目编辑:何卓铭