

激光远场能量密度分布测试系统的实现

段 锦¹ 王光腾¹ 景文博²

(¹ 长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022)
(² 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要 设计了基于 CCD 成像法的激光远场能量密度测量系统, 给出了 CCD 成像法测量远场激光能量密度分布的基本原理, 并在特定条件下对激光能量测量模型进行简化。利用漫反射靶板将激光的能量分布信息采集至 CCD 相机, 并在靶板的特征位置上安装能量探测器, 依据激光能量模型, 将激光光斑图像灰度信息与激光能量探头所测的实际能量值进行信息融合, 得出灰度值与能量密度的映射关系, 进而推测激光远场能量密度分布。实验表明, 此系统可以精确测量千米以上的激光远场能量密度分布, 测量误差小, 且系统简单、可靠, 适于各种条件下的激光远场能量密度测量。

关键词 激光技术; 远场激光测量; 能量密度分布; 图像与数据分析

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.041201

Laser Far-Field Energy Density Distribution Measurement System

Duan Jin¹ Wang Guangteng¹ Jing Wenbo²

¹ School of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China
² School of Optical and Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China

Abstract A laser far-field energy density distribution measurement system based on CCD imaging is designed, the measurement principles based CCD imaging method is given, and the model of laser energy measurement is simplified under special conditions. The image information of laser energy density reflected by the reflective board is acquired by the CCD camera, and the laser energy data is received by detectors on the reflective board. The laser spot image and the actual energy data gotten by energy detectors are analyzed according to the model of laser energy measurement, the relationship between gray value and energy density is gotten, and then the energy density distribution can be calculated. Experiments show that this system can measure the energy density distribution with less measurement error. The system is simple, reliable, and suitable for far-field energy density distribution measurement under various conditions.

Key words laser technique; far-field laser measurement; energy density distribution; image and data analysis

OCIS codes 120.1880; 140.3538; 260.2160

1 引 言

激光的远场能量密度分布是评价激光压制与告警装备的重要指标之一, 其结果可以真实地反映激光压制和对抗武器系统所发射的高功率脉冲激光到达被干扰目标有效部位的激光能量及质量。一般的激光能量测量设备接收口径有限, 只能检测到极小特定空域内的激光能量, 不能满足远场光束质量的测量要求。激光压制与告警设备其作用距离可以达 3 km 以上, 远场光斑直径达到数米, 且脉冲宽度为纳秒级, 对此类远场

收稿日期: 2010-06-23; **收到修改稿日期**: 2010-12-10

基金项目: 国防科工委(A3620060122)资助课题。

作者简介: 段 锦(1971—), 男, 博士, 教授, 主要从事机器视觉、模式识别和光电检测等方面的研究。

E-mail: duanjin@ vip. sina. com

激光的测量通常采用探测器点阵法或 CCD 成像法^[1~4]。探测器点阵法利用一定数量的探测器(能量测头)按特定点阵排列对光斑分布进行空间采样,将光斑信号转换为与探测器点阵分布一致的二维数字信号,通过数据处理可得光斑的形状、形心位置及能量分布^[1]。探测器点阵法是直接接触式测量,中间环节少,精度较高。但其测量精度受探测器个数、阵列布阵方式影响很大,且成本高、系统复杂,使得该方法在实际远场激光测量应用中受到限制。CCD 成像法利用漫反射板将激光的能量分布信息漫反射至 CCD 相机等成像设备。测量时,在漫反射靶板上安装若干能量探测器,通过将能量探测器获取的真实能量与 CCD 相机获取的漫反射板上的相对能量分布进行信息融合,即可得到激光能量的绝对分布^[3]。CCD 成像法空间分辨力更高、信息量更大、系统成本和复杂性更低,其重点在于能量分布模型的建立。目前国内外已对该方法进行了许多研究与应用,对成像法测量远场激光能量密度分布进行了理论建模与误差分析,但是都没有给出具体的实验过程与数据。

本文通过理论分析给出远场激光光斑的能量分布模型,并结合真实实验数据,验证 CCD 成像法测量远场光斑能量分布的可靠性、精确性。

2 能量分布测量模型

CCD 成像法测量远场激光能量密度分布的关键之一是建立准确的能量分布模型,找出激光光斑图像灰度值与漫反射靶板对应位置能量密度的映射关系。通过这个映射关系,可以将光斑图像每一点的灰度值映射为漫反射板对应区域上激光的真实能量密度,从而推测出激光能量密度的绝对分布。

在忽略背景光的条件下,漫反射板上的脉冲激光能量密度为^[3]

$$J(x, y) = \frac{4G(u, v)F^2}{\tau \rho(x, y)R(u, v)A} \sec^4 \omega, \quad (1)$$

式中 $J(x, y)$ 为漫反射板上 (x, y) 位置处脉冲激光能量密度, $G(u, v)$ 为像元 (u, v) 的灰度值, F 为光圈数, τ 为 CCD 相机光学系统透过率, $\rho(x, y)$ 为漫反射板 (x, y) 位置处的漫反射率, $R(u, v)$ 为 CCD 的响应度, ω 为漫反射板上 (x, y) 点对相机光轴的离轴角。像元 (u, v) 对应于漫反射板上的位置 (x, y) 可由相机标定参数和相机成像模型计算得到, CCD 像元面积 A 由 CCD 厂商提供。

由(1)式可以看出,激光的能量密度模型与相机的光圈数、光学系统透过率、漫反射板的反射率、CCD 的响应度和离轴角等参数有关。当实验设备及实验条件确定不变,漫反射板的各部位均匀相等且不考虑 CCD 响应度带来的误差时,参数 $F, \tau, \rho(x, y), A, R(u, v)$ 就固定不变,都可当作常数,(1)式可简化为

$$J(x, y) = P G(u, v) \sec^4 \omega, \quad (2)$$

式中 $P = \frac{4F^2}{\tau \rho(x, y)R(u, v)A}$ 为一常数,此时激光的能量密度模型只与离轴角 ω 有关。假设 CCD 相机与漫反射靶板距离较远(200 m 以上),且漫反射板处光斑直径在 3 m 以内,则 ω 值很小, $\sec \omega \approx 1$, 此时忽略离轴角 ω 带来的影响,可以近似地认为远距离测量时,激光能量密度与激光图像灰度之间成线性关系

$$J = aG + b, \quad (3)$$

式中 J 代表能量密度, G 代表灰度值, a, b 为常数。确定 a, b 的值,就确定了灰度值与能量密度的映射关系。

3 系统组成与测量原理

成像法测量激光远场能量密度的系统主要包括被测设备(激光器)、漫反射靶板、能量采集设备、图像采集设备、同步控制器和数据处理计算机等部分^[5],其基本原理框图如图 1 所示。能量采集设备由分布在漫反射靶板上的光电探测器及能量数据传输装置组成,其作用是采集漫反射靶板特定位置的能量值。图像采集设备由 CCD 相机、光学系统、图像采集卡等组成,负责采集激光光斑图

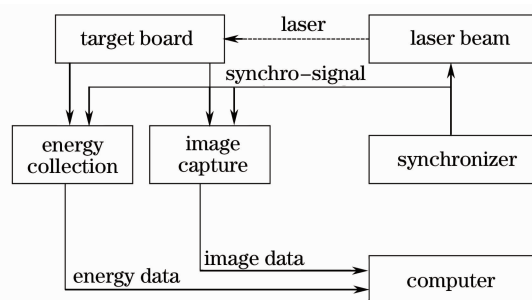


图 1 成像法测量远场激光能量密度基本原理框图
Fig. 1 Block diagram of laser far-field energy density distribution measurement system

像。同步控制器保证了光斑图像和能量数据在精确时统下同步采集。数据处理计算机对采集到的图像数据与能量数据进行信息融合,推算出远场光斑的能量密度分布。

对于采集到的光斑图像,通过空间位置标定,获取靶板上多个探头位置对应像素的灰度值,并与对应的能量密度数据进行拟合,推算出此序列图像的灰度和能量映射关系,进而推测出整个光斑的能量密度分布。数据处理流程图如图 2 所示。

4 实验及结果分析

进行外场实验时,在距离激光器 1~6 km 处设置漫反射靶板,在漫反射靶板上特征点处布设激光能量探测器。能量探头口径为 1 cm×1 cm,准确度为 95%。图像采集设备瞄准漫反射靶板,与靶板距离大于 200 m。激光器发射能量为单脉冲 50~500 mJ,波长 532 nm,脉宽 10 ns。靶面材料采用超硬铝,表面喷塑,均匀性优于 95%,反射率大于 80%,尺寸为 3 m×3 m^[5]。CCD 相机前加 532 nm 窄带滤光片,消除杂光干扰,并加适当衰减片,使得采集到的光斑图像不饱和且灰度层次分明。布置设备时,被测设备光轴和图像采集系统光轴都应近似垂直靶面,可按照文献[6]的方法进行角度调整,及夹角误差修正。靶板上的能量探测器个数及分布,激光光斑的识别定位^[7,8],影响能量密度的探测精度。探测器的分布要满足用最少的能量探测器实现最高的激光照射精度^[6]。探头个数太多成本高且造成 CCD 上的盲点多,不利于数据处理时的拟合;探头个数太少影响拟合精度,增加测量误差。经多次实验统计发现同心放射状的平均误差较小^[6]。实验中采用的探头数量为 5 个。

测量时连续采集光斑图像序列及对应的能量数据。为有效消除时域误差及大气干扰对光斑造成的影响,将前 M 帧图像进行帧平均,并对每个探点数据叠加再取平均。取另外的 M 帧图像及数据作为实验验证数据。

实验采集的激光单幅光斑图像如图 3(a)所示;图 3(b)为其三维显示图;图 3(c)为其质心处的 X, Y 方向投影截面图。前 50 帧图像帧平均得到的结果如图 4 所示。图像中方框标记点为能量探头在图像上的成像位置。取其灰度值与能量值,并进行拟合,具体数据与结果如表 1 所示,得到的能量和灰度映射关系,如图 5 所示。

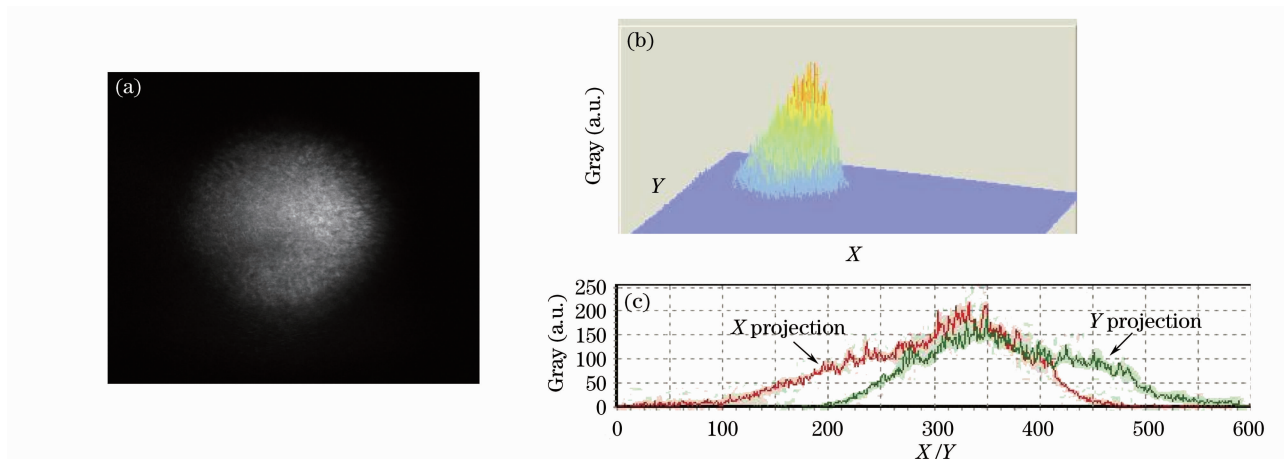


图 3 单帧光斑图像。(a)光斑图像,(b)光斑图像三维图,(c)质心处 X, Y 方向投影

Fig. 3 Single laser spot image. (a) laser spot image, (b) 3-D image for spot, (c) X, Y projection in centroid position

运用最小二乘法对前 50 帧能量密度数据进行拟合,得到该次实验条件下能量密度与灰度映射关系为 $J=0.6505G+9.8629$ 。将后 50 帧的探点位置处的灰度代入映射关系式,计算得到探头各点能量拟合值,将其与能量实际值作比较,结果如表 1 所示。计算能量实际值和拟合值的均方差得到能量密度映射关系误差,经校验,能量密度映射误差为 9.77%,能够较好地反映激光能量密度的真实分布。

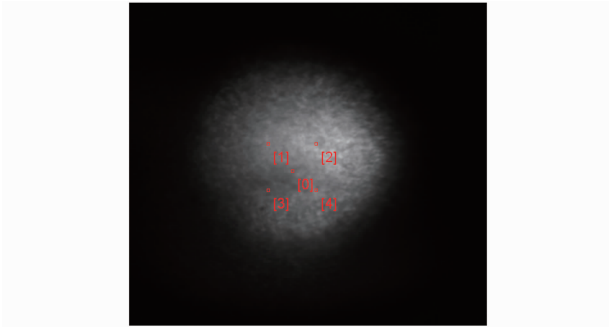


图 4 50 帧平均图像

Fig. 4 Average laser spot image of 50 frames

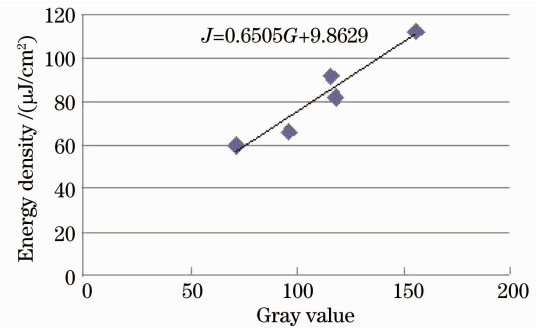


图 5 能量密度和灰度映射关系曲线

Fig. 5 Relationship between energy density and gray value

表 1 能量密度计算数据

Table 1 Data for energy density calculation

Average data of the front 50 frame			Average data of the latter 50 frame			
Code	Gray value	Energy data / ($\mu\text{J}/\text{cm}^2$)	Code	Gray value	Energy data / ($\mu\text{J}/\text{cm}^2$)	Energy calculated value / ($\mu\text{J}/\text{cm}^2$)
0	96	66.24611	0	101	67.38241	75.5634
1	116	91.93269	1	115	92.79834	84.6704
2	156	112.06535	2	162	124.97263	115.2439
3	72	59.91056	3	68	48.02552	54.0969
4	118	82.12584	4	120	93.24573	87.9229

5 结 论

构建了基于 CCD 成像法的远场激光能量密度测试系统,该系统模块化设计,便于扩展与升级。在激光能量密度模型的基础上,进行了特定条件下的简化,提高了激光能量密度模型的实用性。实验结果表明,该测量系统可以精确计算出远场激光光斑的能量密度分布,测量误差小,满足实际测量要求。

参 考 文 献

- 1 Wang Xingshu, Qin Shiqiao, Hu Chunsheng *et al.*. Design and implement of long distance laser spot survey system based on photoelectric-detector array[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2006, **17**(8): 974~977
王省书, 秦石乔, 胡春生 等. 点阵式远场激光光斑监测系统的设计与实现[J]. *光电子·激光*, 2006, **17**(8): 974~977
- 2 J. F. Lapointe, G. Godin. On-screen laser spot detection for large display interaction [C]. HAVE'2005-IEEE International Workshop on Haptic Audio Environments, 2005. 10
- 3 Zhang Baodong, Qin Shiqiao, Jia Jinhong *et al.*. Measurement model and uncertainty analysis of pulsed laser far field energy density based on CCD imaging[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(9): 1417~1420
张宝东, 秦石乔, 贾进宏 等. 成像法测量脉冲激光远场能量密度的模型及不确定度分析[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(9): 1417~1420
- 4 Hu Yu, Xu Changwu. The real-time two-dimensional testing system for the far laser beam through atmosphere [J]. *Laser and Infrared*, 2001, **31**(6): 330~331
胡 渝, 许昌武. 激光通过大气随机信道远场二维强度分布实时测试系统[J]. *激光与红外*, 2001, **31**(6): 330~331
- 5 Li Yongliang, Jiang Huilin. Detection methods of far-field energy density of the high power pulse laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5): 1274~1276
李永亮, 姜会林. 高功率脉冲激光的远场能量密度分布测试方法研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(5): 1274~1276
- 6 Duan Jin, Wu Jun, Duanmu Fanyi *et al.*. Method for measuring laser energy density distribution[J]. *J. Jilin University (Science Edition)*, 2009, **47**(2): 311~316
段 锦, 吴 君, 端木繁一 等. 激光能量密度分布的测量方法[J]. *吉林大学学报(理学版)*, 2009, **47**(2): 311~316
- 7 J. W. Cui, J. B. Tan, L. Ao *et al.*. Optimized algorithm of laser spot center location in strong noise [J]. *J. Phys. Conference Series*, V13, 2005. 3
- 8 J. Duan, C. Kong, W. Jing *et al.*. Laser spot detection and characteristic analysis in space optical communication [C]. The Second International Conference on Space Information Technology, 6795-12, 2007. 11