

# 高能激光远场光斑测量靶标研究

胡进军, 柴利飞, 赵书林

中国电子科技集团公司第二十七研究所, 河南 郑州

收稿日期: 2026年3月5日; 录用日期: 2026年4月15日; 发布日期: 2026年4月22日

## 摘要

为实现对不同功率、不同远场距离激光束光斑分布的测量, 本文分析了影响远场光斑测量的关键因素, 给出了阵列式光电探测效应靶标的理论设计依据, 研制的效应靶标可以满足5~100 kW激光系统在10~100 km距离范围内的远场光斑测量需求。解决了不同功率高能激光束在不同距离处远场光斑动态测量的技术难题, 为激光光斑远场动态分布测量提供了一种有效的手段。

## 关键词

光电阵列式, 远场光斑, 测量动态范围

## A Target Research for Far-Filed Spot Measurement of High Power Laser

Jinjun Hu, Lifei Chai, Shulin Zhao

The 27th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou Henan

Received: March 5, 2026; accepted: April 15, 2026; published: April 22, 2026

## Abstract

To evaluate the distribution of laser beam spot with different powers under different far-filed distance, the key factors affecting the measurement were analyzed. A technical design basis for photoelectric detection effect target array was provided. The target developed in this research could satisfy the requirements of far-filed spot measurement of lasers whose power ranging from 5 kW to 100 kW within a distance range of 10 km to 100 km. This research solved the technical problems of dynamic far-filed spot measurement for high power lasers under different distance.

## Keywords

Photoelectric Array, Far-Filed Spot, Dynamic-Range Measurement

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

激光远场聚焦光斑的功率密度、时空分布及其质心漂移情况对评价光束质量及激光应用是非常重要的。光电阵列法通过光电阵列探测器采集激光光斑在阵列点的激光能量值。拟合出靶面激光光斑的时空分布。并采用相应光斑图像处理算法，可以解算出激光光斑质心漂移量。是远场激光光斑质量测量最常用的一种方法[1]。

文中对光电阵列式靶标设计所涉及到的关键因素进行了分析，主要包括探测靶面尺寸、探测单元间距、探测动态范围、探测单元占空比等，通过对影响激光参数测量的关键因素分析，为光电阵列式靶标设计提供理论依据。设计出一种高密度光电阵列式靶标，能够解决不同功率、不同远场距离的高能激光远场光斑大尺寸、大动态、高能量和高精度测量难题。

## 2. 探测靶面尺寸选择

探测靶面尺寸决定了接收到靶激光信息的多少，靶面尺寸过大会增大靶标的尺寸和重量，尺寸过小则会影响光斑参数的计算结果和精度。因此，本文从聚焦光斑分布特性、系统跟瞄精度、以及小尺寸靶标测量大光斑时的精度影响进行分析，得出阵列靶标的靶面尺寸需求。

### 2.1. 聚焦光斑特性

远场中激光传输不仅受大气、湍流等干扰，同时激光束发射时也会受到发射光学系统像差等因素的影响，导致到达靶面处的光斑并非理想的衍射光斑，而是更接近于高斯分布[2]，典型的远场光斑分布如图1所示。

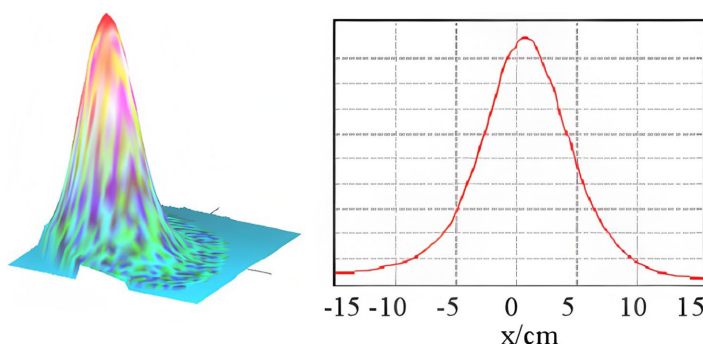


Figure 1. Typical far-field spot distribution

图 1. 典型远场光斑分布

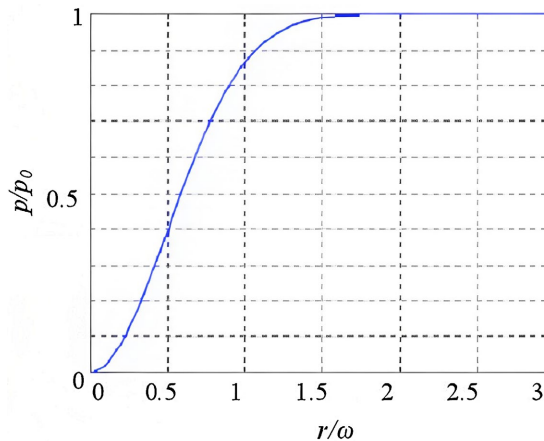
这时远场光斑光强分布表达式为：

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2}\right) \quad (1)$$

$\omega$  为聚焦光斑半径； $r$  为截面半径； $I_0$  为光斑中心光强； $I$  为截面半径  $r$  处光强。对光强分布公式进行积分，得到：

$$P = P_0 \left( 1 - \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2}\right) \right) \quad (2)$$

探测阵列靶标接收到的功率  $P$  占光斑总功率  $P_0$  的比例与靶面尺寸半径  $r$  相对于光斑半径  $\omega$  比值的  
关系如图 2 所示。



**Figure 2.** The relationship between the target surface received power and the target surface size  
**图 2.** 靶面接收功率与靶面尺寸关系

由图 2 可知，当探测阵列靶面口径  $r = \omega$  时，即靶面口径等于聚焦光斑口径时，靶面接收到的激光功率达到总功率的 86.4%。由于远场光斑分布理论上延伸到无穷远，而靶面尺寸不可能无限大，一般情况下靶面尺寸大于等于  $\omega$  时，即满足评价聚焦光斑大小的尺寸即可。

## 2.2. 跟瞄精度影响

激光系统本身有一定的跟瞄精度，一般为激光发射角的 1/5~1/3 倍。所需靶面尺寸要比光斑尺寸大 0.2~0.3 倍，这样才能保证激光光斑全部落在靶标的靶面上。一般激光发射角为  $10 \mu\text{rad}$ ，当跟瞄精度取中间值 1/4 时，所需要的靶面尺寸为：

$$D = 1.25 * \theta * L \quad (3)$$

$\theta$  为激光发射角， $L$  为作用距离。

则在 10 km 到 100 km 测量范围内，所需要的靶面尺寸见表 1：

**Table 1.** Comparison table of target size and test distance

**表 1.** 靶面尺寸与测试距离对照表

作用距离/km	10	20	30	40	50	60	70	80	100
靶面尺寸/mm	125	250	375	500	625	750	875	1000	1250

## 2.3. 靶面小于光斑影响

当靶面的尺寸受限，使得阵列探测靶标不能够完全探测空间的光强分布，导致靶标外的能量信息丢失，阵列靶标所接受的总能量小于实际激光束在靶面处的总能量，从而不能够较准确地反映激光束绝对空间的能量分布。虽然在高斯理论曲线的基础上，进行插值、最小二乘等数学算法，能够获取到靶面处的空间光强分布，但与全尺寸测量时存在着一定的误差[3]。

为了提高误差分析的可靠性，需要分别对聚焦光斑的全尺寸和半尺寸数据进行光强分布复原，并对计算得到的光斑激光功率、质心位置、光斑大小进行比较分析。

本文通过一组远场激光强度分布的模拟数据见表 2，进行仿真分析，评估靶面尺寸对测量的影响。

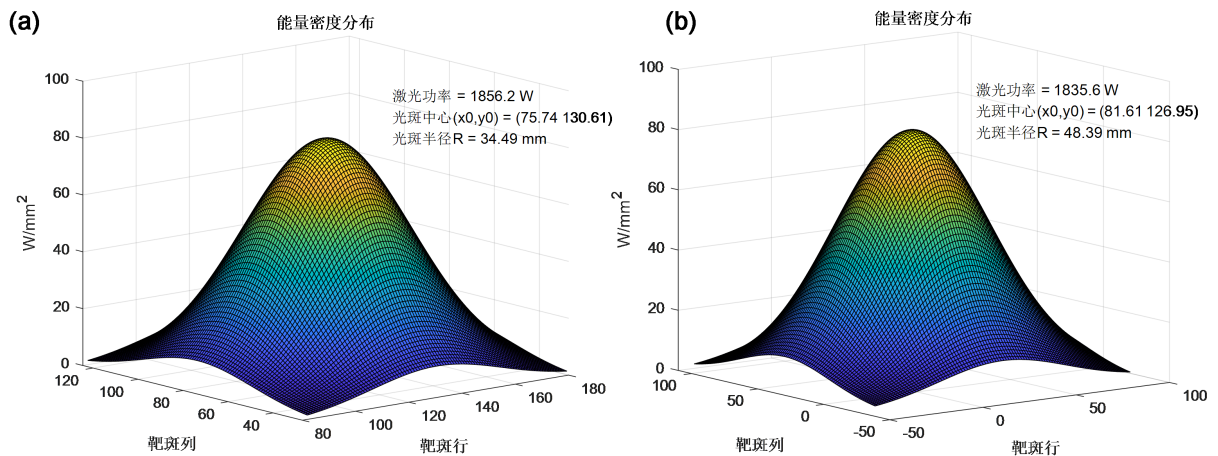
对数据进行高斯拟合等一系列算法处理，得到不同尺寸的靶标的光斑高斯分布、激光功率、质心位置、光斑尺寸等如图 3 所示。

对图 3 中的数据进行统计列表，误差是相对于真值进行计算的结果，见表 3 所示。

**Table 2.** Detection value of light intensity in a certain frame (unit: mW/cm<sup>2</sup>)

**表 2.** 某一帧光强探测数值(单位: mW/cm<sup>2</sup>)

行/列	列 1	列 2	列 3	列 4	列 5	列 6	列 7	列 8	列 9	列 10
行: 1	41	27	34	24	30	24	34	27	20	19
行: 2	28	31	59	56	45	45	37	30	31	29
行: 3	56	92	136	132	154	129	93	60	36	28
行: 4	146	377	965	1455	1616	975	325	113	59	37
行: 5	362	3433	9031	11,239	11,976	7121	1650	400	109	52
行: 6	2015	9674	35,825	45,491	50,858	19,304	6456	1055	187	47
行: 7	3098	15,707	46,562	75,103	83,037	31,738	9583	1209	230	61
行: 8	951	6424	21,166	37,521	33,036	16,546	3794	634	106	51
行: 9	317	1572	6309	6674	7217	4164	952	181	112	44
行: 10	87	282	459	1084	651	481	156	86	29	32



(a) 大尺寸靶面高斯拟合后的光强分布; (b) 小尺寸靶面高斯拟合后的光强分布。

**Figure 3.** Intensity distribution after gaussian fitting on targets of different sizes

**图 3.** 不同尺寸靶面高斯拟合后的强度分布

**Table 3.** Simulation calculation

**表 3.** 仿真计算对照表

靶标尺寸	激光能量	误差	光斑尺寸	误差
全尺寸	1856.2	7.2%	37.42	6.9%
半尺寸	1835.6	8.2%	39.90	14%

可见，当小靶面尺寸进行大光斑测量时，对激光功率的测量影响不大，对激光光斑大小的计算结果影响较大，会直接影响到靶激光光束质量的评价。

### 2.4. 小结

通过分析可知，靶面尺寸的大小主要由激光发射角和作用距离决定，应该遵循表 1 的计算结果。

当需要满足 100 km 测量需要时，靶标的外径尺寸需要达到 1.25 m，在综合考虑测量评估需求后，靶标可以设计为中心 540 mm × 540 mm 范围内可采用密集阵列布设，靶标边缘可采用米字型可拆卸可折叠阵列杆设计，如图 4 所示。

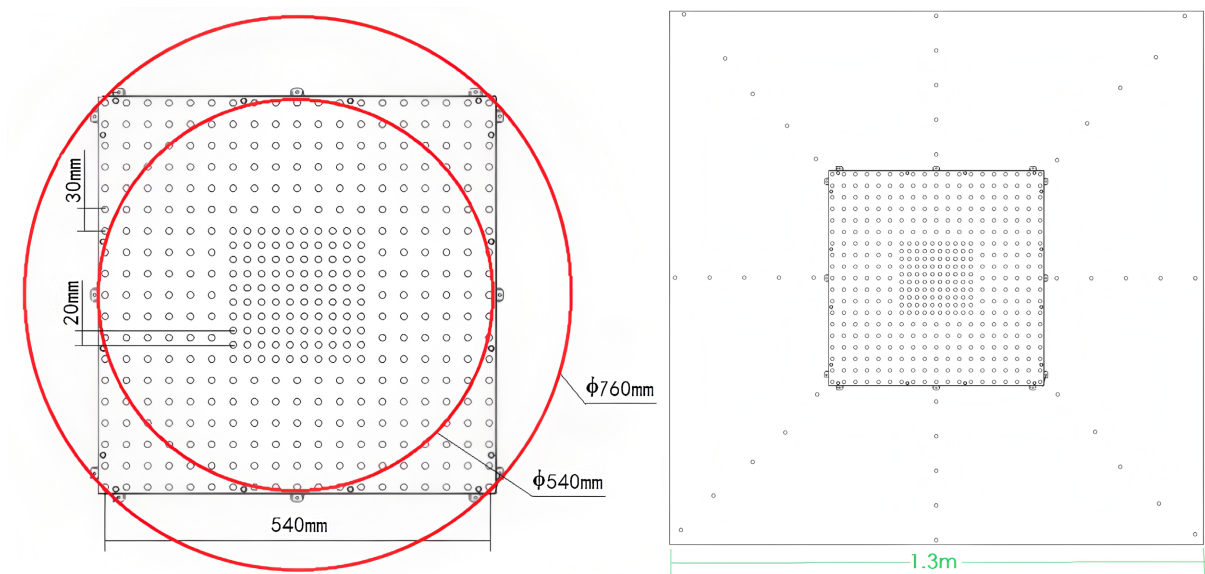


Figure 4. Center target surface and edge extension dimensions  
图 4. 中心靶面和边缘扩展靶面尺寸图

### 3. 探测单元间距选择

探测阵列靶标对聚焦光斑进行的是离散空间取样，探测单元间距不同，得到的取样光斑不同。探测单元间距越小，光斑取样点数就越多，取样光斑越接近真实光斑。如图 5 所示，从左上角至右下角，对于一个尺寸为 40 mm 高斯分布型聚焦光斑，当探测单元间距由 1 mm 增加至 20 mm 时，得到的取样光斑信息越少，可见，探测单元间距越小，测量得到的光斑细节就越多，就越能反映出真实光斑的形态。

模拟仿真聚焦光斑参数需要如下的几个公式。

激光功率表达公式：

$$P = \iint I(x, y) dx dy \approx \iint_{\sigma} I(x, y) dx dy \approx \sum_{n=1}^m P_n \quad (4)$$

光斑质心位置公式：

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{1}{P} \iint xI(x, y) dx dy \approx \frac{1}{P} \iint_{\sigma} xI(x, y) dx dy \approx \frac{1}{P} \sum_{n=1}^m x_n P_n \\ \bar{y} = \frac{1}{P} \iint yI(x, y) dx dy \approx \frac{1}{P} \iint_{\sigma} yI(x, y) dx dy \approx \frac{1}{P} \sum_{n=1}^m y_n P_n \end{cases} \quad (5)$$

环围半径计算公式：

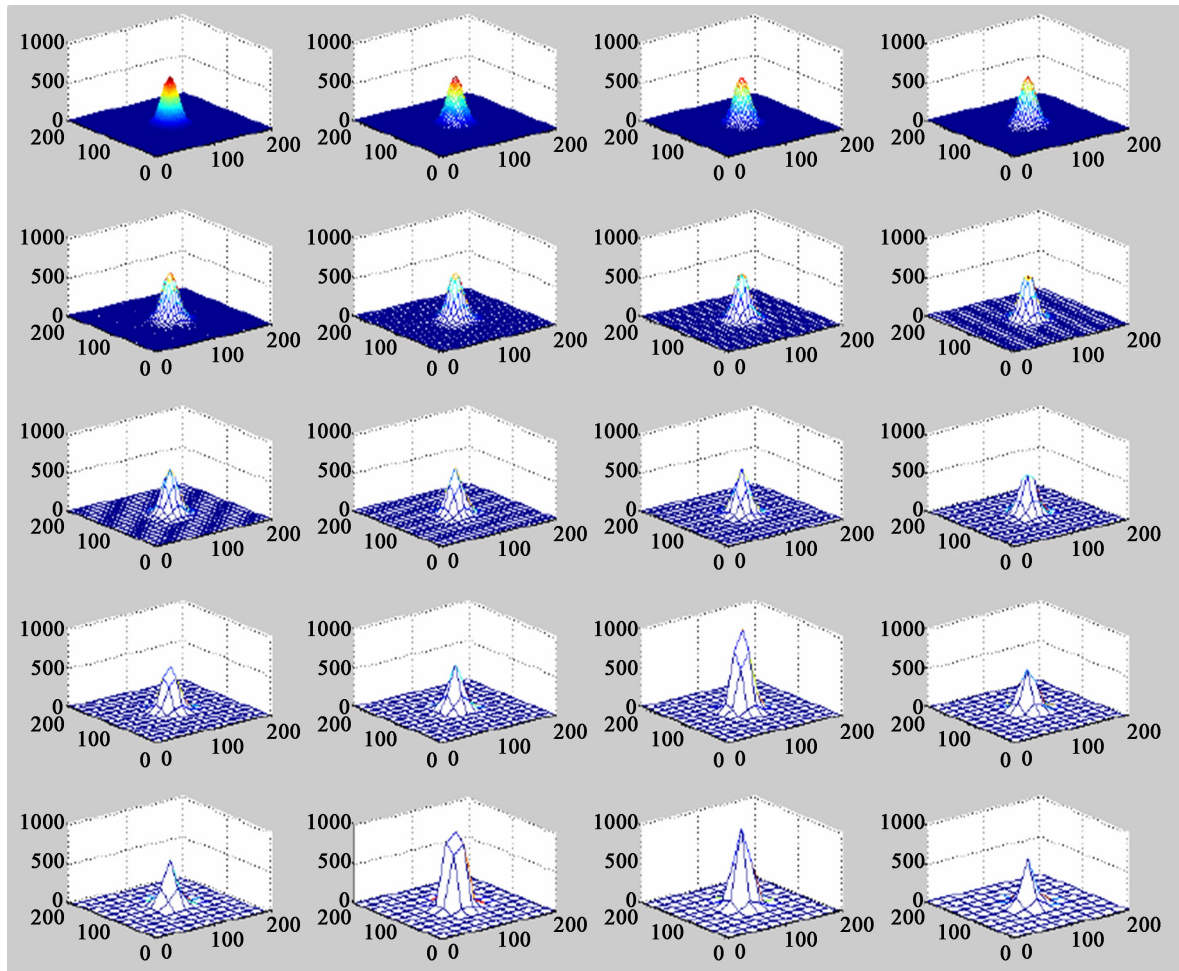


Figure 5. Sampling of light spot intensity when the detection unit distance changes

图 5. 探测单元间距改变时光斑强度取样示意图

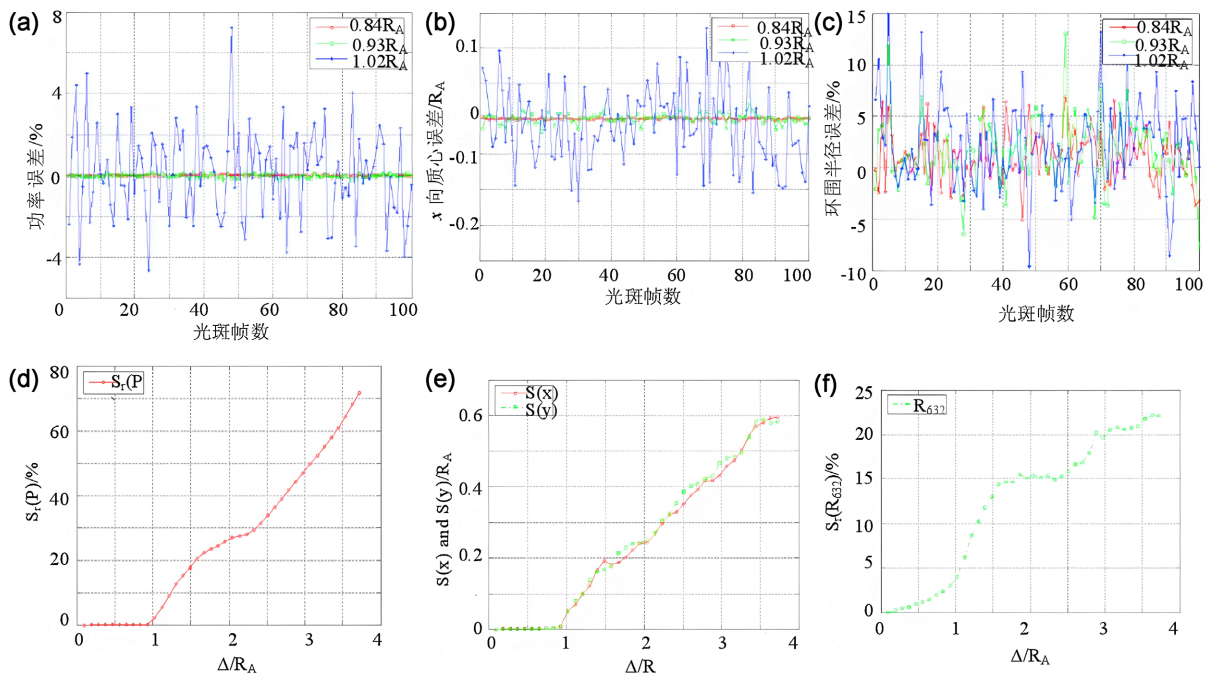
$$R_k = \sqrt{\frac{S_k}{\pi}} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{m_k} \sigma_n} \quad (6)$$

式中,  $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \dots + \sigma_m$ , 表示靶板有效探测口径;  $\sigma_n$  为第  $n$  个探测单元面积, 为常量;  $P_n$  表示探测单元  $\sigma_n$  上探测到的功率。

利用光学仿真软件 Glad 来对激光束进行模拟, 获得远场聚焦光斑, 使用 Matlab 对模拟光斑进行取样, 来评估取样分辨率对光斑参数计算的影响。主要步骤如下:

- (1) 根据预估被测聚焦光斑情况(衍射极限), 按照一定的条件(口径、传输距离)使用 Glad 光学仿真软件来构造瞬时光斑数据;
- (2) 使用 Matlab 来对上述数据进行取样, 得到经取样后的光斑数据;
- (3) 对取样光斑按照激光功率公式、质心位置公式、环围半径公式进行参数计算, 得到该取样间距下的参数结果;
- (4) 改变取样间距, 重复步骤(2), (3);
- (5) 分析分辨率改变对瞬时光斑、积分光斑参数计算结果的影响。

改变分辨率, 对瞬时功率、质心、环围尺寸进行了计算, 结果如图 6 所示。



**Figure 6.** Simulation results of transient spot parameters as a function of resolution  
**图 6.** 瞬时光斑参数随分辨率改变模拟计算结果

图 6(a)三种分辨率情况 100 帧瞬时光斑功率误差曲线；图 6(b)三种分辨率情况 100 帧瞬时光斑质心误差曲线；图 6(c)三种分辨率情况 100 帧瞬时光斑环围尺寸误差曲线；图 6(d)瞬时光斑功率标准差  $s_r(P)$  随分辨率曲线；图 6(e)瞬时光斑质心标准差  $s(x)$ 、 $s(y)$  随分辨率曲线；图 6(f)瞬时光斑环围尺寸标准差  $s_r(R)$  随分辨率曲线。

图 6 中， $RA$  表示 1 倍衍射极限半径， $\Delta$  表示空间分辨率。图(a)、(b)、(c)分别表示分辨率为  $0.84RA$ 、 $0.93RA$ 、 $1.02RA$  时，模拟产生的 100 帧光斑相对于最小分辨率( $0.1RA$ )的功率误差、质心位置误差及环围尺寸误差。图 6(d)~(f)中结果计算过程如下：对于横坐标上任一分辨率，100 帧瞬时光斑均有相应的功率、质心位置以及环围尺寸值，将这些值分别减去在最小分辨率( $0.1RA$  分辨率，模拟计算中将其作为基准)下对应的功率、质心位置及环围尺寸值得到 99 个差值，然后求这些差值的标准差，该曲线反映随分辨率的增加，功率、质心位置及环围尺寸的偏差程度。

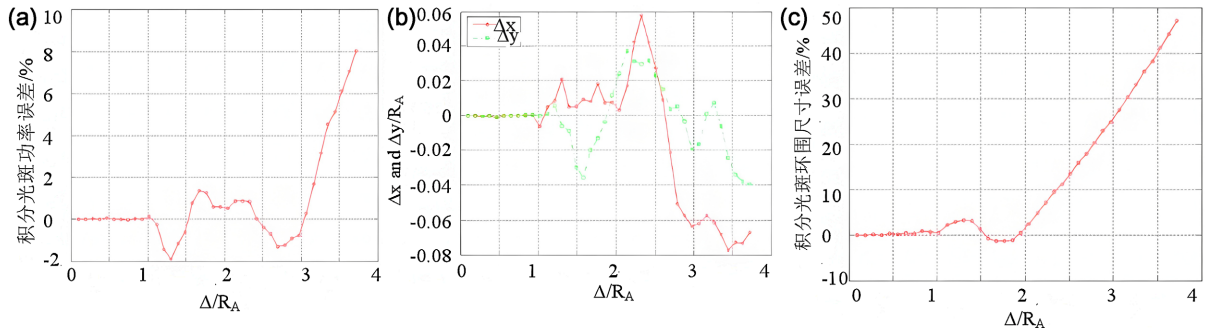
可见，当分辨率小于  $0.9RA$  时，功率及质心位置标准差很小，可以忽略，即对聚焦光斑质心的测量，探测阵列靶面分辨率的要求并不高，只需要不大于  $0.9RA$  即可；当分辨率小于  $0.9RA$  时，环围尺寸标准差约 4%，表明瞬时光斑环围尺寸的测量对靶面分辨率的要求较高。图 6(d)~(f)结果与图 6(a)~(c)结果也基本一致。

改变分辨率，按照光功率公式、质心位置公式、环围半径公式对取样积分光斑的功率和质心位置以及环围尺寸进行了计算，结果如图 7 所示。

图 7(a)积分光斑功率误差随分辨率曲线；图 7(b)积分光斑质心位置误差随分辨率曲线；图 7(c)积分光斑环围尺寸误差随分辨率曲线。

图 7(a)表示积分光斑中，各种分辨率情况下功率相对于  $0.1RA$  分辨率的功率的差值，当分辨率小于  $0.9RA$  时可忽略，当分辨率小于 3 倍  $RA$  时，功率误差小于 2%，可见对于积分光斑的功率测量，分辨率的要求并不高；图 7(b)表示积分光斑中，各分辨率情况下光斑质心位置相对于  $0.1RA$  分辨率的质心位置

的差值, 可见当分辨力小于  $1RA$  时可忽略, 当分辨力小于  $2$  倍  $RA$  时, 误差在  $0.04RA$  以内; 图 7(c) 表示积分光斑中, 各种分辨力情况下光斑环围尺寸相对于  $0.1RA$  分辨力的差值, 可见当分辨力小于  $1RA$  时可忽略, 当分辨力小于  $2$  倍  $RA$  时, 误差在  $3\%$  以内。



**Figure 7.** Simulation results for integrated spot parameters as a function of resolution  
**图 7.** 积分光斑参数随分辨力改变模拟计算结果

综上所述, 探测单元间距小于  $0.9$  倍的聚焦光斑半径时, 测量误差可忽略不计, 能够满足测量的需要。

针对本系统靶标指标论证需要, 在  $10\text{ km}$  到  $100\text{ km}$  测量范围内, 某一作用距离上刚好满足激光参数测量需求时, 探测单元间距见表 4:

**Table 4.** Detection unit spacing vs. test distance comparison table  
**表 4.** 探测单元间距与测试距离对照表

作用距离/km	10	20	30	40	50	60	70	80	100
探测单元间距/mm	45	90	135	180	225	270	315	360	450

所以, 探测单元间距应小于最小测量距离  $10\text{ km}$  时的要求, 即探测单元间小于  $45\text{ mm}$  即可以满足测量需求。考虑到后续近距离测量需求和跟瞄精度设计冗余, 同时兼顾电子元器件布设及走线所占的空间, 同时也为了获得跟更多的光斑信息, 靶标探测单元间距设定为: 中心  $20\text{ mm}$ , 边缘  $30\text{ mm}$ , 扩展后阵列杆上探测单元轴向间距  $100\text{ mm}$  比较合理。

#### 4. 探测动态范围选择

设单元探测器测量动态范围为  $k$  倍, 当探测器能探测到入射激光的峰值强度而不出现饱和, 动态范围仅影响低强度的光强信息探测时, 根据到靶聚焦光斑的强度分布公式, 可测量到的低端激光强度为:

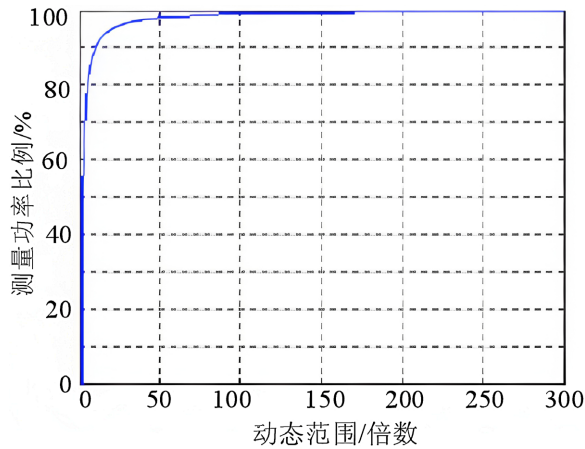
$$I_{low} = \frac{I_0}{k} = I_0 \exp\left(-\frac{2r_{low}^2}{\omega^2}\right) \quad (7)$$

根据上述公式可得到:

$$P_{low} = P_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{2r_{low}^2}{\omega^2}\right)\right) = P_0 \left(1 - \frac{1}{k}\right) \quad (8)$$

式中,  $k$ : 动态范围  $k$  倍;  $I_0$ : 高斯分布峰值光强;  $\omega$ : 光斑半径;  $r_{low}$ : 光强为  $I_0/k$  时的截面半径;  $I_{low}$ : 截面半径  $r_{low}$  位置处光强;  $P_{low}$ : 截面半径  $r_{low}$  位置处包含的激光功率;  $P_0$ : 激光总功率。

探测单元接收到的激光功率与其动态范围的关系如图 8 所示。



**Figure 8.** The relationship between detector detection power and detector measurement dynamic range  
**图 8.** 探测器探测功率与探测器测量动态范围关系

当探测器动态范围为 10 倍时，探测到的激光功率达到全光斑的 90%，大于了激光总能量的 86.4%，能够满足激光参数测量需求。也就是说在某一位置处如果探测单元的动态范围为 10 dB 时，就能够测量出光斑峰值和 1/e<sup>2</sup> 处的光强，即光斑半径处的光强信息[4]。

但实际测量中，不同的激光能量和作用距离的光强分布不同，这就无形增加了测量动态范围，以激光能量 5 kW、30 kW 和 100 kW 三种系统为例，激光发射系统聚焦角度为 10 μrad 时，距离在 10 km 到 100 km 范围内，到靶的边缘、平均、峰值功率密度见表 5 (峰值功率密度为平均功率密度 2.5 倍)。

**Table 5.** Far-field focused spot power density table (unit: mW/cm<sup>2</sup>)  
**表 5.** 远场聚焦光斑功率密度表(单位: mW/cm<sup>2</sup>)

距离/光斑大小	10 km/100 mm			20 km/200 mm			30 km/300 mm		
激光能量	边缘	平均	峰值	边缘	平均	峰值	边缘	平均	峰值
5 kW	15.9	63.7	159.2	3.98	15.9	39.8	1.77	7.1	17.7
30 kW	95.5	382.2	955.4	23.9	95.5	239	10.6	42.5	106.2
100 kW	318.5	1273.9	3184.7	79.6	318	796	35.4	142	354
距离/光斑大小	40 km/400 mm			50 km/500 mm			60 km/600 mm		
激光能量	边缘	平均	峰值	边缘	平均	峰值	边缘	平均	峰值
5 kW	0.99	3.98	9.95	0.64	2.55	6.4	0.44	1.77	4.42
30 kW	5.97	23.9	59.7	3.82	15.3	38.2	2.65	10.6	26.5
100 kW	19.9	79.6	199	12.7	50.9	127	8.85	35.4	88.5
距离/光斑大小	70 km/700 mm			80 km/800 mm			100 km/1000 mm		
激光能量	边缘	平均	峰值	边缘	平均	峰值	边缘	平均	峰值
5 kW	0.325	1.3	3.25	0.25	1	2.5	0.16	0.64	1.6
30 kW	1.95	7.8	19.5	1.5	6	15	0.96	3.82	9.6
100 kW	6.5	26	65	5	20	50	3.2	12.7	32

从表 5 中能够得到，要想对不同能量的激光进行不同作用距离上的聚焦光斑参数测量(最大值为 3184、最小值为 0.16)，靶标的最大测量动态范围需求要达到 43 dB。

## 5. 探测单元占空比选择

当探测单元间距确定后,探测单元的大小决定了接收光能量的多少。实际上探测单元占空比远小于100%,如探测单元取样尺寸 $\Phi 1\text{ mm}$ ,间距 $10\text{ mm}$ ,则占空比仅0.79%。由于聚焦光斑的高斯分布,所以在探测单元上的分布是起伏的,同样探测单元接收到的光信息不能代表整个探测单元的光信息,这样会对激光参数的测量带来影响,该影响量的大小也很难用数学表达式去描述,这里仍采用模拟仿真的方法对其进行分析。

分析过程是,首先利用光学仿真软件得到一远场聚焦光斑,再用 Matlab 对模拟光斑进行取样,同时用最小二乘法对取样数据进行仿真计算,得到所需的激光测量参数,主要包括到靶的激光功率、光斑质心位置、光斑大小等。改变占空比,也就是探测单元大小,重新得到一组激光测量参数。对每组得到的激光参数进行误差统计计算,结果如图9所示。图中误差是相对于探测单元占空比为1时计算得到的。

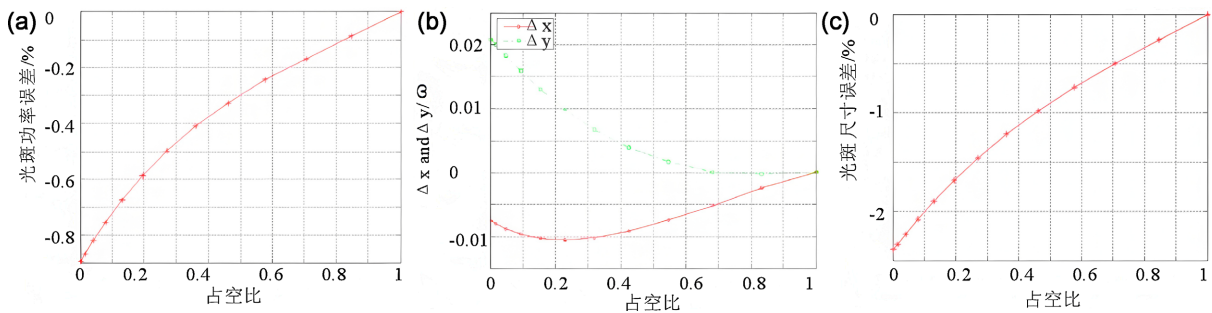


Figure 9. The relationship between spot power, centroid, size, and unit duty cycle

图9. 光斑功率、质心、尺寸随单元占空比改变误差计算结果

由图分析可知,激光功率偏差,占空比对激光功率的影响并不大,约1%;聚焦光斑质心位置的偏差,质心位置计算结果偏差最大约 $0.02\omega$ ;光斑尺寸偏差,结果影响最大约2.5%。

可见,占空比对激光参数测量影响误差很小,可忽略不计。所以,靶标设计要求中对占空比可不作考虑。

## 6. 精跟测量精度分析

激光光斑质心测量主要是根据各探测阵列单元解算的功率密度和探测单元布局。解算出激光光斑中心位置。

普通质心算法公式如下:

$$x'_o = \frac{\sum_{i,j} x_i I_{i,j}}{\sum_{i,j} I_{i,j}} \quad y'_o = \frac{\sum_{i,j} y_i I_{i,j}}{\sum_{i,j} I_{i,j}} \quad (9)$$

其中 $I_{i,j}$ 为坐标为 $(x_i, y_i)$ 所接收到的光功率。

该算法适用于没有背景噪声、背景噪声一致或信噪比较高的情况。

考虑到激光光斑为高斯分布,则距离光斑中心越远的单元点对质心判断的影响越小,因此选取距离的倒数作为加权函数,就可以减弱远离光斑中心探测点的噪声对质心探测的干扰,提高质心的探测精度。

$$x'_o = \frac{\sum_{i,j} x_i I_{i,j} W_{i,j}}{\sum_{i,j} I_{i,j} W_{i,j}} \quad y'_o = \frac{\sum_{i,j} y_i I_{i,j} W_{i,j}}{\sum_{i,j} I_{i,j} W_{i,j}} \quad W_{i,j} = \frac{1}{r_{i,j}} = \frac{1}{\sqrt{(x'_o - x_o)^2 + (y'_o - y_o)^2}} \quad (10)$$

其中,其中 $(x'_o, y'_o)$ 为计算得出的光斑质心; $I_{i,j}$ 为坐标为 $x$ 方向第 $i$ 个, $y$ 方向第 $j$ 个单元接收到的光功

率； $(x_i, y_i)$  为该单元的坐标。 $(x_o, y_o)$  该公式中默认的光斑中心坐标为  $(0, 0)$ 。

当光斑不近似高斯分布时，该算法依然有较高的精确度，能有效将光斑与背景分离，从而消除噪声干扰。

针对该系统中探测阵列排列为点阵式，探测单元间距离为  $d$ ，横向探测器数为  $2a$ ，纵向探测器数为  $2b$ ，则上述的距离质心算法变化为：

$$x'_o = \frac{\sum_i^a \sum_j^b i d I_{i,j} W_{i,j}}{\sum_i^a \sum_j^b I_{i,j} W_{i,j}} \quad y'_o = \frac{\sum_i^a \sum_j^b j d I_{i,j} W_{i,j}}{\sum_i^a \sum_j^b I_{i,j} W_{i,j}} \quad W_{i,j} = \frac{1}{r_{i,j}} = \frac{1}{d\sqrt{i^2 + j^2}} \quad (11)$$

则质心偏移量为：

$$\Delta r = \sqrt{(x'_o - x_o)^2 + (y'_o - y_o)^2} \quad (12)$$

其中  $(x'_o, y'_o)$  为计算得出的光斑质心， $(x_o, y_o)$  为之前的光斑中心[5]。

由上述光斑质心偏移量计算公式可知，光斑质心的偏移量与探测单元间距和探测单元功率密度测量精度有关。当探测阵列采用如图 4 的布局方式时，计算得出相应偏移量误差和精跟测量精度如表 6 所示：

**Table 6.** Calculation results of offset error and precision root measurement accuracy

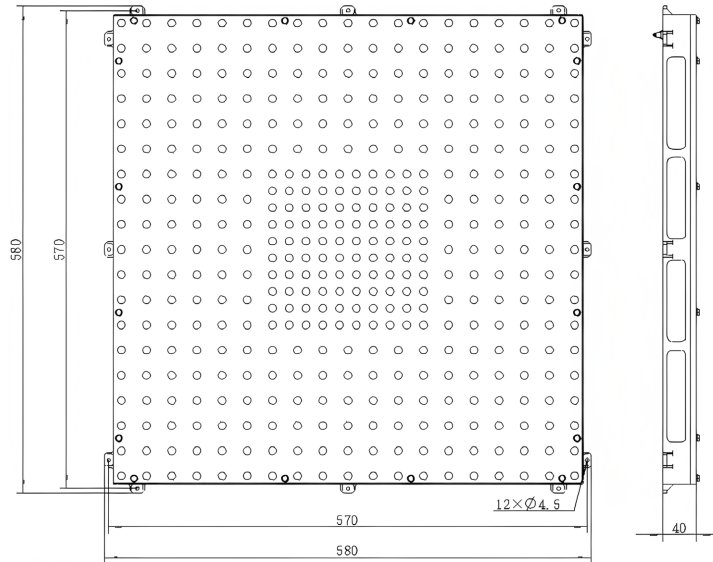
**表 6.** 偏移误差和精跟测量精度计算结果表

序号	探测阵列布局	测量不确定度	探测单元间距 $d$ (mm)	质心偏移量误差(mm)	测量精度 $\mu\text{rad}$
1	$\Phi 200$ mm 内: 20 mm;	$\leq 10\%$	$D_2 = 20$	$\leq 2.83$	$\leq 1.5$

## 7. 系统设计

### 7.1. 结构设计

中心靶标的整体尺寸为  $580 \text{ mm} \times 580 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ ，如图 10 所示。装置通过四个安装孔与平台进行安装，通讯、供电及调试口通过外部链接器进行连接。



**Figure 10.** Measurement target structure diagram

**图 10.** 测量靶标结构图

靶板平面中心排布 10 (行) × 10 (列) 共 100 个探测孔, 间距为 20 mm, 边缘按照间隔 30 mm 布局共 312 个探测孔。靶面的材料为铝合金, 表面进行喷砂处理, 并喷涂抗强光损伤涂层。

## 7.2. 光学设计

由于测量激光到靶最大功率密度太大, 如果直接探测会造成探测器饱和。为了保证探测能量在线性探测区间内, 结构设计上通过在接收窗口上安装 30 dB 衰减片, 如图 11 所示, 对能量进行一定衰减后进行探测。

光学衰减片参数选择:

工作波长: 1050~1085 nm;

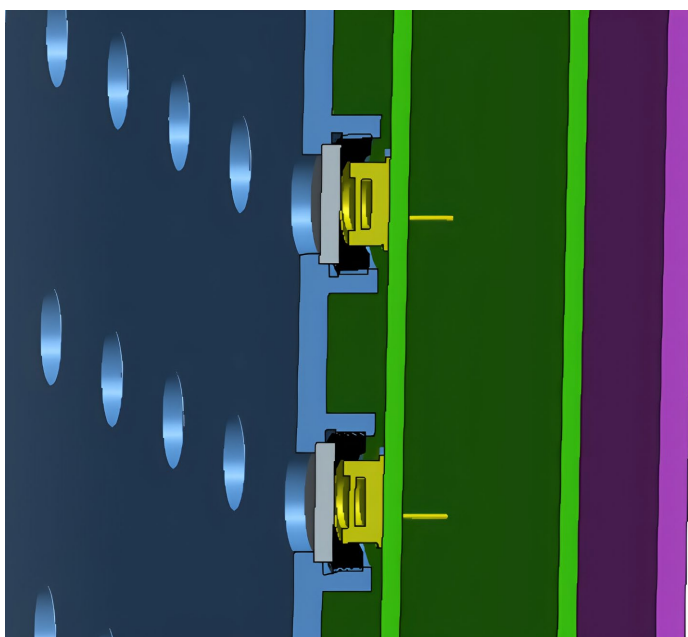
工作原理: 反射式;

基片材料: 石英玻璃;

衰减数值: 30 dB;

抗损伤阈值:  $\geq 1000 \text{ W/cm}^2$ 。

靶标上的光学窗口由安装孔、衰减片和衰减片压圈组成。为了防止测试系统被原光路返回的激光造成损伤, 试验时需要调整靶面, 使激光以一定入射角度进行照射。



**Figure 11.** Schematic diagram of the relative positioning between the attenuator and the detection unit  
**图 11.** 衰减片与探测单元相对位置效果图

## 7.3. 探测电路设计

光电探测器选取 InGaAs-PIN 型光电探测器, 探测电路由激光探测器、滤波电路、放大接收电路和温度探测电路组成。探测器接收经过衰减后的激光信号, 经过滤波电路和放大电路后输出直流电平信号, 传输至数据采集单元进行采集处理。

## 7.4. 电路设计

数据处理电路硬件电路主要由 CPU 电路、FPGA 电路、电平转换电路、AD 采集电路、CAN 总线电

路、外部存储电路等组成，原理框图如图 12 所示：

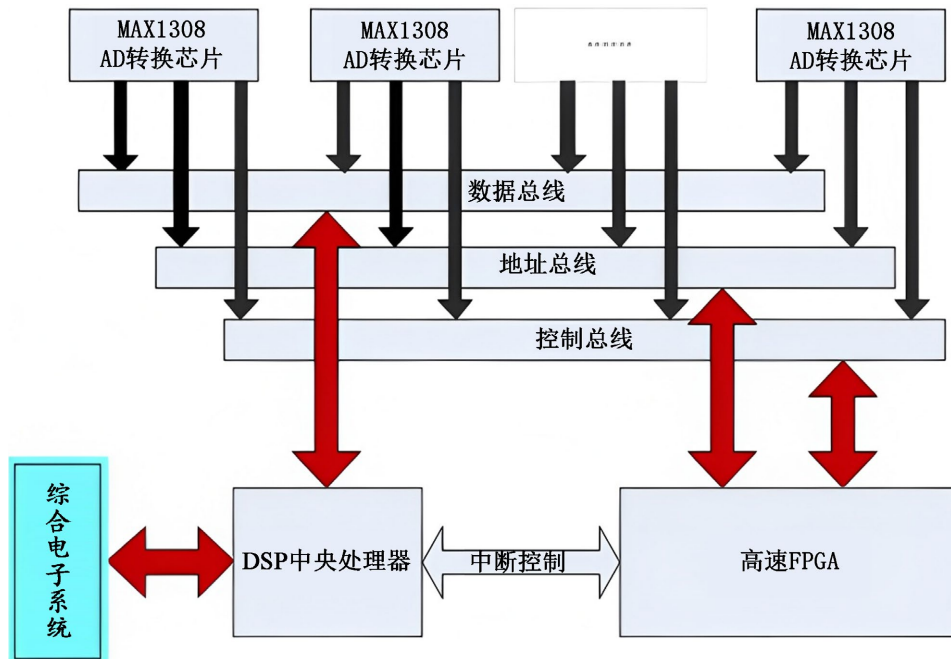


Figure 12. Circuit principle block diagram  
图 12. 处理电路原理框图

## 8. 结论

通过对远场高能激光探测靶面尺寸、探测单元间距、探测动态范围、探测单元占空比等关键因素分析，确认了远场高能激光靶标关键参数。提高了靶标探测能力和探测精度，为解决不同功率、不同远场距离的高能激光远场光斑大尺寸、大动态、高能量和高精度测量难题，提供了可行性方案。

## 参考文献

- [1] 雷匄, 李强, 左铁钊. 大功率激光束参数的测量方法[J]. 光电子激光, 2000, 11(4): 372-374.
- [2] 朱震, 王永州, 易亚星, 张文攀, 冯亮. 一种新型的激光远场光斑直接测量技术[J]. 光电工程, 2005, 32(11): 49-53.
- [3] 黄继鹏, 王延杰. 孙宏海. 激光光斑位置精确测量系统[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 841-849.
- [4] 黄伟, 马松山, 李晓芹, 郭绍禹. 复合式激光远场光斑分布定量测量技术研究[J]. 激光与红外, 2018, 48(8): 1031-1035.
- [5] 程乙轮, 何枫. 谭逢富, 王振东, 秦来安, 靖旭, 张巳龙, 侯再红. 探测器阵列靶的激光光斑图像复原方法研究[J]. 激光与红外, 2020, 50(6): 749-754.