

基于逐点扫描的探测器阵列靶标定系统

谭逢富^{1,2}, 黄志刚^{1*}, 张巴龙¹, 秦来安¹, 侯再红¹, 高穹³, 刘虎³

- (1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;
2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026; 3. 洛阳电子信息装备实验中心, 河南 洛阳 471000)

摘要: 为分析激光发射系统的性能, 需要测量激光光斑的绝对功率密度时空分布, 探测器阵列靶是有效手段之一。为实现定量分析, 需要对探测器阵列靶进行标定。探测器阵列靶单元数多, 标定难度大, 设计有效的标定系统十分重要。设计了一种新的标定系统, 该系统采用逐点扫描的方式, 具有适用性广、成本低、精度高等特点。并以某项目为例对标定系统的测量不确定度进行了测试分析, 结果表明: 可见光波段的测量不确定度为 2.99%, 近红外波段的测量不确定度为 3.62%, 中红外波段的测量不确定度为 6.17%。该标定系统是探测器阵列靶标定的有效手段, 值得借鉴。

关键词: 逐点扫描; 探测器阵列; 标定; 功率密度; 测量不确定度

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0213003

Detector array target calibration system based on point-by-point scanning

Tan Fengfu^{1,2}, Huang Zhigang^{1*}, Zhang Silong¹, Qin Laian¹, Hou Zaihong¹, Gao Qiong³, Liu Hu³

- (1. Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
3. Electronic Equipment Testing Center, Luoyang 471000, China)

Abstract: In order to analyze the performance of the laser emission system, it was necessary to measure the spatial-temporal distribution of the absolute power density of the laser spot. The detector array target was one of the effective methods. To achieve quantitative analysis, the detector array target needed to be calibrated. The number of detector array target units was large, and the calibration was difficult. It was very important to design an effective calibration system. This paper designed a new calibration system, which adopted the point-by-point scanning method. This way had the characteristics of wide applicability, low cost and high precision. In order to test the system, taking a project as an example, the measurement uncertainty of the calibration system was tested and analyzed. The results show that the measurement uncertainty in the visible light band is 2.99%, and the measurement uncertainty in the near-infrared band is 3.62%. The measurement uncertainty in the mid-infrared band is 6.17%. This calibration system was an effective way for target calibration of detector array, it was worth learning.

Key words: point-by-point scanning; detector array; calibration; power density; measurement uncertainty

收稿日期: 2019-11-05; 修订日期: 2019-12-10

基金项目: 国防科技创新特区项目

作者简介: 谭逢富(1982-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事激光参数测量技术方面的研究。Email: tanfengfu@163.com

0 引言

为定量分析激光发射系统的性能参数, 需要测量激光光斑的绝对功率密度时空分布, 以得到激光光斑的总功率、光斑尺寸、功率密度时空分布等多种参数, 为综合判断其光束质量提供依据^[1]。光电探测器阵列靶是一种用于测量激光束功率密度时空分布和总功率等参数的专用测量设备^[2]。探测器阵列靶一般由几十至几千个探测器单元通道组成, 包括抗激光损伤面板、衰减取样单元、探测器单元、信号调理采集单元、数据处理单元等组件^[3]; 探测器阵列靶将辐照在靶面上的光斑强度信息, 经各取样通道取样后转化为量化的数字信息, 再经数据处理复原出光斑的强度分布, 并计算出所需测量的各项激光参数。探测器阵列靶的标定就是寻找探测器各取样通道经数字化的响应 AD 值与辐照在探测器取样孔上的功率密度间的关系。主要有两个难点: 一是如何

测量出功率密度真值; 另一个是获得 AD 值与功率密度真值间的关系。为了确保探测器阵列靶的测量精度, 需要搭建标定系统, 利用标准辐射源对探测器阵列靶进行标定工作^[4-6]。目前, 对探测器阵列靶的标定存在难度大、成本高、效率低等问题, 特别是近红外及中红外波段的阵列靶标定。文中介绍了一种探测器阵列靶标定系统, 该系统具有适用性广、成本低、标定精度高等特点, 可以为今后探测器阵列靶的标定提供参考借鉴。

1 标定系统组成及工作流程

1.1 单元组成及功能

为实现探测器阵列靶的标定, 设计了基于逐点扫描的探测器阵列靶标定系统, 如图 1 所示。该系统由标定激光器、滤光片、衰减片组合、光束整形装置、可变光阑、分光镜 1、分光镜 2、功率计、定标探测器模块, 以及两套二维扫描平台等组成。

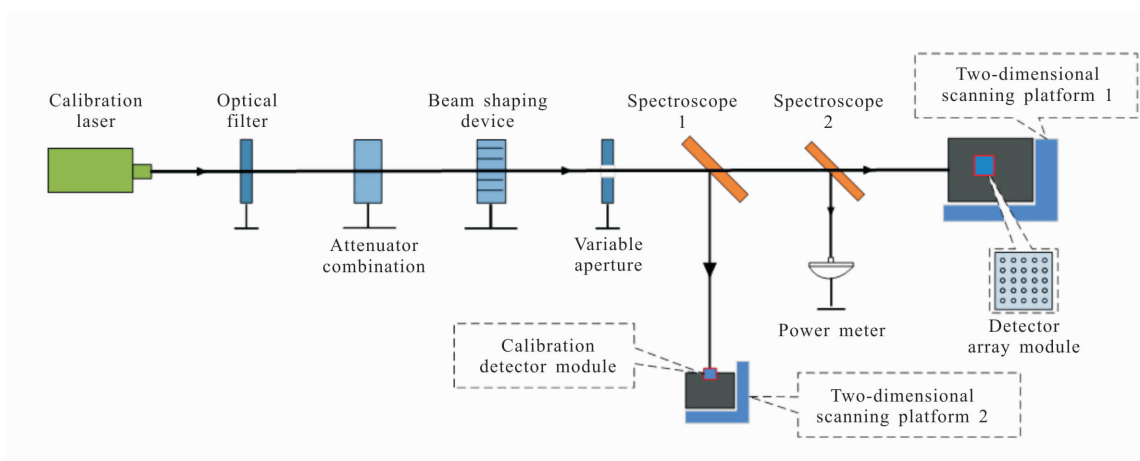


图 1 探测器阵列靶标定装置示意图

Fig.1 Detector array target calibration device schematic

标定激光器为系统提供标准辐射源, 要求出光的模式、功率稳定。一般来说标定激光器的波长与被测激光系统的波长要一致, 但对于一些特定波长, 市面上缺乏稳定的标定光源, 给高精度标定带来较大的技术难度, 对此可以采用间接式的标定方法。其实现方式是采用波长处于探测器响应范围内, 且容易实现稳定输出的激光器作为标定光源。根据所选探测器的响应率与波长关系曲线和所选衰减单元与波

长关系曲线, 计算获得标定光源波长与被测激光系统波长之间的换算系数, 实现间接标定。

滤光片的作用是滤除杂散光, 选择所需要标定波长的激光光束, 一般选用窄带滤光片。

衰减片组合的作用是对激光功率进行定量衰减, 从而获得合适的激光功率密度。阵列靶的标定, 一般要选择多个激光功率密度, 大小需覆盖整个被测系统的动态范围。为获得所需的激光功率密度,

一般采用 2~3 片衰减片组合来获得。

光束整形装置的作用是将标定激光器输出的高斯光束变为功率密度分布较均匀的平顶光束。标定激光器输出的光束一般为高斯光束,光束束宽很窄,光斑较小,而阵列靶的取样孔及探测器的光敏面比较小,难以通过目视的方式进行严格的对准。为保证标定的准确性,在标定的光学系统中,需加入光束整形装置,将高斯光束整形为光斑较大,且较均匀的平顶光束。该平顶光束的均匀性对最终的标定精度及标定效率有较大影响;平顶光束的均匀性越好,则标定精度更高,同时逐点扫描的速度可以更快,标定效率也更高。设计的光束整形装置如图 2 所示,激光光束经过扩束匀化器后,激光光斑变成直径较大的高斯光束,该光束再经后级光束匀化器进行光束整形,最终变为功率密度分布较均匀的平顶光束。

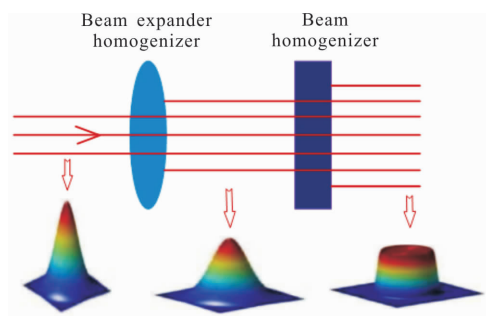


图 2 光束整形装置示意图

Fig.2 Beam shaping device schematic

分光镜 1 的作用是将主光束按照固定比例分成两路,其中一路光束由定标探测器模块接收,另一路光束由阵列靶上待标定探测器单元接收。这里需要注意的是定标探测器模块和待标定探测器单元到分光镜 1 的距离必须相同,形成共轭,这样才能保证它们所接收到的激光光斑分布一致。

定标探测器模块的作用是与功率计配合使用获得标定光源的真实功率密度,以及在标定过程中监测及分析标定光源的稳定性。定标探测器模块是一个参照和标准,一般需要经过有资质的检测机构检定。

二维扫描平台的作用是搭载探测器模块在水平和垂直两个方向上运动。由于探测器通道取样孔及探测器的光敏面比较小,为保证标定的准确性,二维扫描平台应满足以下功能。具有较高的直线度及运行精度;具有手动调整功能,实现对位置的精确调

整,达到标定要求;实现水平及垂直轴两个方向的运动,对探测器模块上所有探测器单元能够按照运行轨迹逐点扫描;控制软件对上传的探测器模块数据进行收集、存储及处理。

1.2 工作流程

首先,搭建系统,调整光路获得满足需求的光斑。根据需要标定的探测器阵列靶测量波长及功率密度范围,选择标定激光器、滤光片、衰减组合、光束整形装置等器件,并按照图 1 搭建标定系统。通过光束整形装置和光阑获得功率密度分布比较均匀、大小合适的光斑,调节衰减片组合,获得功率密度符合标定要求的光斑。

其次,获得标定光源的真实功率密度。分光镜将主光束按照分光比例分成两路,其中一路由定标探测器模块接收,定标探测器模块安装在一套二维扫描平台上,探测器取样孔正对标定光束,二维扫描平台按照程序设定的单点扫描轨迹,将定标探测器模块取样孔围绕光斑做二维扫描,扫描过程需遍历整个光斑,用于获得光斑的功率密度相对分布,配合激光功率计可计算出真实功率密度,单点扫描轨迹如图 3 所示。

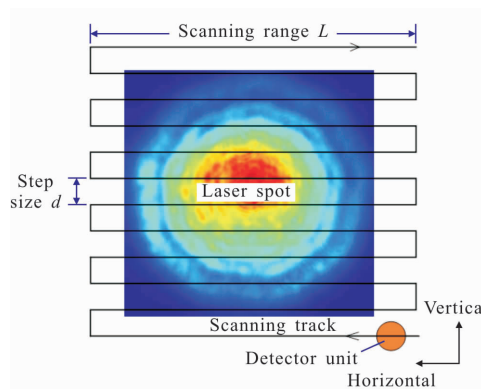


图 3 单点扫描轨迹示意图

Fig.3 Schematic diagram of single point scanning track

最后,对探测器阵列靶上各个探测器单元逐一标定,获得各个探测器单元与真实功率密度间的关系。经分光镜分出的另一路光束由阵列靶上待标定探测器单元接收,二维扫描平台带动待标定探测器单元按照设定的程序围绕光斑做二维逐点扫描。图 4 给出的是以 6×6 阵列靶模块为例的扫描轨迹示意图,而靶上单个探测器单元的扫描方式与定标探测

器模块扫描方式一样,如图 4 所示。

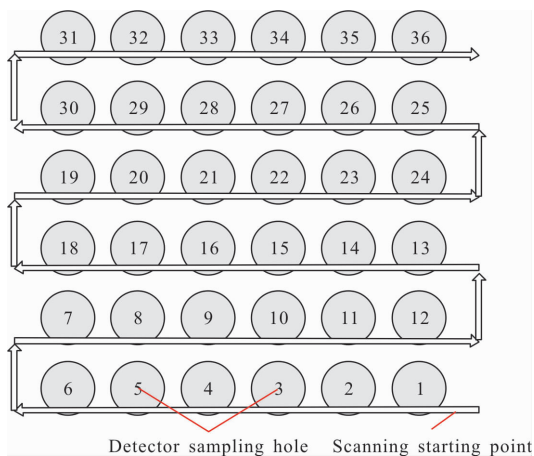


图 4 探测器阵列靶扫描轨迹示意图

Fig.4 Schematic diagram of detector array target scanning track

2 功率密度真值的测量

功率密度真值的测量是标定过程中的一个难点,而功率密度真值的测量是标定系统必须具备的基本功能。传统的方式是通过相机等面阵探测器获取,虽然采用相机获取的方式更直接,且分辨率更高,但是相机的成本较高,特别是近红外和中红外相机;另外,近红外和中红外相机存在显著响应非线性问题,对标定精度有较大影响。本标定系统的特点是通过逐点扫描的方式获取功率密度的真值,其步骤及方法如下。

Step 1: 定标探测器模块从标定光斑的右下角开始,按照图 3 所示的单点扫描轨迹,以一定的水平方向速度 v 和垂直方向步长 d 进行二维扫描,直至扫描结束,经二维扫描采集到的定标探测器单元响应 AD 值如图 5 所示,图中横坐标为逐点扫描的点数,

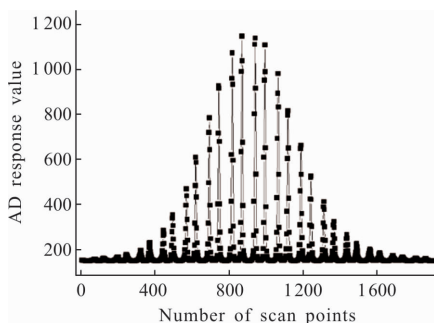


图 5 探测器单元响应 AD 值图

Fig.5 Detector unit responds to AD value

纵坐标为探测器输出的响应 AD 值。找出扫描过程中最大的 AD 值 AD_{max} , 该 AD_{max} 对应于标定光斑中功率密度最大区域内的功率值 P_{max} , 该区域的面积为定标探测器靶面的有效面积 S 。

Step 2: 计算出取样孔有效面积 S 区域内的功率值 P_{max} 与整个标定光斑总功率 P_{sum} 的比例系数 M , 该比例系数 M 可以间接的通过 AD_{max} 与整个扫描过程中采集到的 AD 值总和 AD_{sum} 的比例关系计算获得, 获取方式如下:

通过扫描寻找最大值的过程中, 扫描的步长 d 越小, 水平方向速度 v 越慢, 采样频率 f 越高, 则找到最大功率值 P_{max} 越准确。因此, 在实际的标定过程中, 在垂直方向上, 一般要求步长 d 小于定标探测器取样孔直径 D , 而当步长 d 小于取样孔直径 D 时, 扫描过程中就会在垂直方向上产生叠加, 造成重复取样, 重复次数为 D/d ; 在水平方向上, 一般要求取样孔直径 D 与采样频率 f 的乘积大于水平方向速度 v , 同样, 在扫描过程中水平方向上也会产生叠加, 造成重复采样, 重复次数为 Df/v 。当沿着图 4 所示的扫描轨迹完成一次扫描过程, 采集到的 AD 值总和 AD_{sum} , 实际上对应的是整个标定光斑总功率 P_{sum} 在垂直方向 D/d 次叠加, 同时在水平方向 Df/v 次叠加后的总和。另外, 取样孔为圆形, 需要做正方形到圆形的换算, 换算系数为 $\Pi/4$ 。总的重复采样系数 N 计算公式为:

$$N = \frac{D^2 f}{dv} \cdot \frac{\pi}{4} \quad (1)$$

比例系数 M 的计算公式为:

$$M = \frac{P_{max}}{P_{sum}} = \frac{AD_{max} N}{AD_{sum}} \quad (2)$$

Step 3: 在逐点扫描采集标定光斑分布的同时, 通过功率计采集光斑总功率 P_{sum} , 真实功率密度 ρ 的计算公式为:

$$\rho = \frac{M \cdot P_{sum}}{S} \quad (3)$$

在功率密度真值获取的过程中, 有几点注意事项。首先, 如图 5 所示, 这是由中红外定标探测器模块对标定光斑经逐点扫描采集到的 AD 响应值曲线, 其轮廓近似高斯分布, 虽含有一个确定的峰值, 但在取 AD_{max} 时, 为了防止干扰, 可以用最大的 3~5 个值取平均作为 AD_{max} ; 其次, 图 5 中曲线底部不为零, 而是一个相对稳定的响应值, 它是在没有激光入射到

探测器靶面时,由探测器暗电流及背景噪声产生的背景响应值,在求取 AD_{\max} 和 AD_{sum} 时需要剪除该背景值;另外,为了保证采集到的 AD_{\max} 准确,扫描步长 d 要小,水平方向速度 v 要慢,采样频率 f 要高;最后,为了保证采集到的 AD_{sum} 准确,扫描轨迹必须完全覆盖整个标定光斑,在垂直和水平方向上,扫描覆盖范围均须大于标定光斑的边缘最少一个取样孔直径 D 。

3 标定方法与数学建模

采用逐点扫描的方式对探测器单元进行标定,实际上是通过扫描的方式寻找探测器响应的峰值与标定光源功率密度峰值区域的功率密度真值之间的关系,建立一个输出响应值与输入的激光功率密度值之间的数学模型。为建立数学模型,需要在阵列靶测量的功率密度范围内选取几个典型的功率密度值,测量出这几个典型功率密度下,探测器单元的响应值,并建立数据库,再对数据进行分析处理。可以采用最小二乘法进行拟合^[7],拟合出一个能够表述输出响应值与输入功率密度之间关系的数学表达式。

一般来说,对于不同的探测器类型可以用三种数学模型来表达。第一种数学模型是线性模型,该模型一般在探测器响应曲线线性度较好,探测器处于线性响应区内时采用,线性模型的数学表述如下:

$$P=k_1U+b \quad (4)$$

式中: P 为输入的功率密度; U 为探测器输出响应值; k_1 、 b 为线性模型的标定系数。

第二种数学模型是折线模型,该模型一般在探测器响应曲线线性度不太好,响应曲线接近折线时采用,折线模型的数学表述如下:

$$P=\begin{cases} k_1U+b_1 & 0\leq U\leq U_0 \\ k_2U+b_2 & U>U_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: U_0 为探测器响应转折点的值; k_1 、 k_2 、 b_1 、 b_2 为折线模型的标定系数。

第三种数学模型是二次曲线模型,该模型一般在探测器响应曲线非线性时采用,二次曲线模型的数学表述如下:

$$P=k_1U^2+k_2U+b \quad (6)$$

式中: k_1 、 k_2 、 b 为二次曲线模型的标定系数。

4 标定系统不确定度分析

对标定系统进行分析,得出标定系统的测量不

确定度主要由定标探测器线性度、标定光源不稳定性、功率计测量精度、定标探测器响应峰值测量不确定度、探测器单元响应峰值测量不确定度等几个方面决定。

在某项目中,研制了三款探测器阵列靶,分别用于可见光、近红外、中红外三个波段,所采用的探测器分别是 Si、InGaAs、HgCdTe,探测器靶面有效面积分别为 1.1、0.196、1 mm²。为完成对三款阵列靶的标定,分别搭建了可见光、近红外和中红外标定系统,所采用的标定光源波长分别是可见光 532 nm,近红外 1 064 nm,中红外 3 950 nm。

4.1 定标探测器的线性度

定标探测器的线性度决定了光斑相对分布的准确性,进而决定了功率密度的真值测量准确度。分别对三个波段定标探测器的响应线性度进行了测试和评估^[8],测试装置与图 1 类似,由功率计测量激光器输出功率,由定标探测器测量实时的 AD 响应值。测试过程中,在获取不同的输出功率时,为保证激光器的模式及光斑分布稳定,采用不改变激光器输出功率,仅通过更换不同衰减倍率的衰减片来获得不同的功率,同时整个测试过程中定标探测器位置必须固定不动。经测试,可见光波段定标探测器的测试结果如图 6 所示,近红外波段定标探测器的测试结果如图 7 所示,中红外波段定标探测器的测试结果如图 8 所示。图中横坐标为标定光源输出的功率,纵坐标为定标探测器输出的 AD 响应值,图中圆点为测试的数据,直线为对数据的线性拟合。

定标探测器线性度的测试数据记录为:

$$(P_i, D_i) \quad i=1, 2, \dots, M \quad (7)$$

用记录数据做线性拟合得到的表达式为:

$$D=kP+b \quad (8)$$

定义定标探测器线性度偏差计算公式为:

$$E_D=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (D_i-kP_i-b)^2}{\sum_{i=1}^M (kP_i+b)^2}} \quad (9)$$

根据测试数据计算,可见光、近红外和中红外定标探测器的线性度偏差分别为:

可见光: $E_{D_v}=1.53\%$

近红外: $E_{D_n}=2.32\%$

中红外: $E_{D_m}=3.45\%$

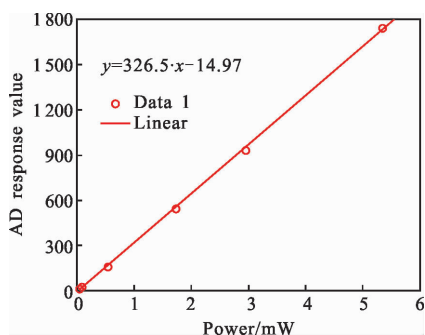


图 6 可见光定标探测器响应曲线

Fig.6 Visible light calibration detector response curve

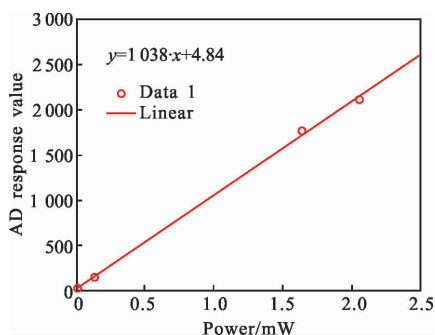


图 7 近红外定标探测器响应曲线

Fig.7 Near-infrared calibration detector response curve

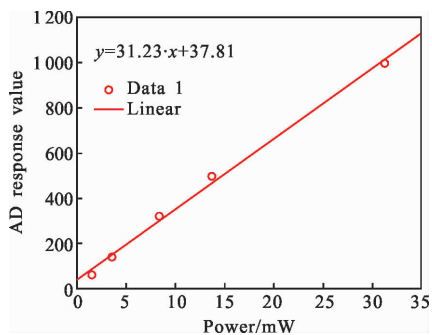


图 8 中红外定标探测器响应曲线

Fig.8 Mid-infrared calibration detector response curve

4.2 标定光源的不稳定度

在探测器阵列靶标定过程中,采用逐点扫描的方式,每完成一个探测器单元的扫描大约需要 1 min,对整个阵列靶几十至几千个探测器单元的标定是一个漫长的过程,在整个标定过程中,要求标定光源输出功率及模式稳定。标定光源的稳定性对标定的精度具有较大影响^[5],因此在标定过程中需要对标定光源实时监测。如前所述,定标探测器的另一个功能

就是监测和分析标定光源的稳定性,在对探测器单元标定的过程中,使定标探测器对准标定光斑的某一固定位置,每隔 10 min 记录一组定探测器输出的响应值数据,每组记录 1 min,然后对数据进行统计分析,计算出均值 P_{Σ} 和标准差 P_{σ} ,定义标定光源的不稳定度为:

$$E_L = P_{\sigma} / P_{\Sigma} \quad (10)$$

根据测试数据计算,可见光、近红外和中红外标定光源的不稳定度分别为:

可见光: $E_{L_v} = 0.56\%$

近红外: $E_{L_n} = 0.72\%$

中红外: $E_{L_m} = 2.25\%$

4.3 功率计的精度

功率计的测量精度决定了由光斑相对分布计算绝对分布的精度,进而决定了功率密度的真值测量准确度。测试中使用的功率计为 Ophir 公司生产的 NOVAM/3A 型功率计,经中国兵器工业某所(国家光学一级计量站)标定,其测量误差 E_p 为 1.70%。

4.4 响应峰值测量不确定度

响应峰值测量不确定度包括定标探测器和探测器单元响应峰值测量的不确定度。这两个不确定度形成的机理是一致的,与光束整形装置输出的光束均匀性以及逐点扫描的扫描步长 d ,水平方向速度 v ,采样频率 f 参数有关。响应峰值测量不确定度的测试方式是使用实际标定过程中的扫描参数,重复进行多次测试,记录下每次扫描过程中的响应峰值数据,然后对数据进行统计分析,计算出均值 M_{Σ} 和标准差 M_{σ} 。主要测试参数为取样孔直径 3 mm,扫描步长 0.1 mm,水平方向速度 5 mm/s,采样频率 50 Hz。定义定标探测器响应峰值测量不确定度为 E_{M1} ,探测器单元响应峰值测量不确定度为 E_{M2} ,计算公式如下:

$$E_{M1} = M_{\sigma} / M_{\Sigma} \quad E_{M1} = E_{M2} \quad (11)$$

根据测试数据计算,可见光、近红外和中红外的响应峰值测量不确定度分别为:

可见光: $E_{M1_v} = 1.30\%$

近红外: $E_{M1_n} = 1.47\%$

中红外: $E_{M1_m} = 3.02\%$

根据上述几项影响因素的测试分析,定义标定系统的测量不确定度为:

$$E_0 = \sqrt{E_D^2 + E_p^2 + E_L^2 + E_{M1}^2 + E_{M2}^2} \quad (12)$$

根据计算公式(12),得出项目中使用的可见光、近

红外和中红外三套标定系统的测量不确定度分别为:

可见光: $E_{0v}=2.99\%$

近红外: $E_{0n}=3.62\%$

中红外: $E_{0m}=6.17\%$

5 结束语

搭建了基于逐点扫描的探测器阵列靶标定系统,介绍了各组成部分的功能定义,阐述了功率密度真值的测量及标定方法建模,分析了影响系统测量不确定度的相关因素,给出了系统的最终测量不确定度。系统有别于传统方法中利用相机等面阵探测器获取功率密度真值的方法,通过逐点扫描的方式获取功率密度的真值。该标定系统具有分辨率高、成本低,适用范围广等优势。该标定系统可以作为探测器阵列靶标定的有效手段,为今后探测器阵列靶的标定提供借鉴。

参考文献:

- [1] Su Yi, Wan Min. High Energy Laser System [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004. (in Chinese)
- [2] Wang Yunping. Laser facula measurement technology using detector array [J]. *Laser Journal*, 2007, 28(4): 22–23. (in Chinese)
- [3] Wang Zhenbao, Feng Guobin, Yang Pengling, et al. Detector array for measuring spatio-temporal distribution of near infrared laser power density [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 935–938. (in Chinese)
- [4] Sun Zhiyuan, Chang Songtao, Zhu Wei, et al. Simplifying method of radiance calibration for MWIR detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2132–2137. (in Chinese)
- [5] Chen Haidong, Zhao Kun, Shi Xueshun, et al. Laser source used for measurement absolute spectral responsivity of long-wave infrared detectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(12): 1205002. (in Chinese)
- [6] Zhang Lei, Lin Zhiqiang. Calibration technique of spectral radiation for an infrared trap detector [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2018, 37(5): 572–577. (in Chinese)
- [7] Mo Xiaoqin. Linear and nonlinear fitting based on least squares method [J]. *Wireless Internet Technology*, 2019, 4(2): 128–129. (in Chinese)
- [8] Ji Yulong, Mao Jingxiang, Li Wenxia, et al. Research on spectral response test system of digitalization infrared detector [J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(10): 897–902. (in Chinese)