

## 红外焦平面阵列非线性校正曲线测量方法

王飞\*, 戢运峰, 冯刚, 徐作冬, 邵碧波

(西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024)

**摘要:**针对红外焦平面阵列强度响应的非线性失真现象,本文提出了一种基于单波长激光器测定红外焦平面阵列非线性校正曲线的方法,设计出用于测量的实验装置,并通过实验研究获得了实测的非线性校正曲线。结果表明,该方法规避了红外焦平面阵列光谱响应不均匀性的影响,满足了装置器件在工程技术中通用性和实用性的需要,在简单易行的同时保证了较高的测量精度。

**关键词:**红外焦平面阵列;非线性;校正

**中图分类号:**TN215 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20140701.0144

## Method for measuring nonlinear calibrated curve of infrared focal plane arrays

WANG Fei\*, JI Yun-feng, FENG Gang, XU Zuo-dong, SHAO Bi-bo

(*State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of  
Nuclear Technology, Xi'an 710024, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: wf97@ustc.edu*

**Abstract:** As for the nonlinear effects of infrared focal plane arrays intensity response, a nonlinear calibration method is proposed based on single wavelength laser. Experimental equipment is designed for measuring, and the nonlinear calibration curve of the focal plane array is obtained through the measuring equipment. Experimental results show that this method avoids the influence of infrared focal plane arrays spectral response non-uniformity, and meets the requirement of generality and practicability of the device in the engineering technology, which ensures the high accuracy of measurement as well as simpleness.

**Key words:** infrared focal plane arrays; nonlinear; calibration

## 1 引言

运用成像法<sup>[1]</sup>进行红外激光的光斑参数测量要求所用的红外焦平面阵列具有良好的线性响应特性,但红外焦平面阵列对入射激光能量的光电响应特性往往不满足严格的线性变化规律,而是表现出一定的非线性响应特征,这主要包括两方面,即“死区”的存在和非线性饱和效应<sup>[2-5]</sup>,从而影响光斑参数测量结果的准确性。工作中使用红外焦平面阵列常用查表转换法进行非线性校正,即事先用实验方法测出所用红外焦平面阵列实际的响应曲线,使用时将实际响应输出值作为索引在响应曲线中查找出对应的标准值,用标准值代替该光照度下的实测值来校正。在实际应用中,常用实验方法测量红外焦平面阵列的实际响应曲线,取其经多项式拟合得到的曲线为该红外焦平面阵列的非线性校正曲线。

可见光焦平面阵列的实际响应曲线常用均匀光源配以光功率计的方法进行测量,积分球提供均匀光场<sup>[6]</sup>辐照焦平面阵列,光功率计同步记录辐照光场的强度变化,结合焦平面阵列的输出得到其实际响应曲线。由于红外焦平面阵列饱和阈值较低,而该波段内高灵敏度的微光功率监测探测器本底噪声及测量环境的影响较大<sup>[7-8]</sup>,用该方法测量可操作性较差。

红外焦平面阵列的实际响应曲线可通过黑体加滤波片的方式来测量<sup>[9]</sup>,辐照光功率可根据黑体参数计算得出<sup>[10-11]</sup>。但在实际工作中,更多时候待测激光束为单一波长的红外激光。由于红外焦平面阵列的光谱响应存在不均匀性,而黑体加滤波片组成的标定光源又难以提供理想的单波长光场,因此测量结果会具有较大的不确定度。

本文提出了一种基于单波长激光器测定红外焦平面阵列实际响应曲线的方法,并设计出可供测量响应曲线的实验装置,该装置考虑了器件在工程技术中通用性和实用性的需要。

## 2 测量装置

如前所述,红外焦平面阵列非线性校正曲线

通常由其实际响应曲线经多项式拟合得到,因此首先需要测量红外焦平面阵列的实际响应曲线。

测量装置的结构如图1所示,该装置主要由光源模块、线性基准模块、双积分球模块、红外焦平面阵列模块及数据处理模块组成。

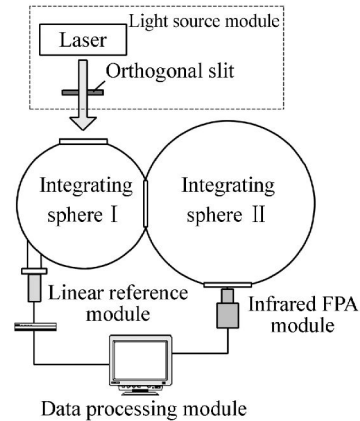


图1 测量装置的结构

Fig. 1 Structure diagram of experiment platform

### 2.1 光源模块

光源模块提供测量响应曲线所需的大范围连续可调的输入光功率,包括单波长光源和正交狭缝两部分。

常用的单波长红外光源的输出光功率的可调范围通常较小,难以满足测量需求。在光源出口放置一对正交的狭缝,可在不改变光源输出光功率的条件下,通过调整正交狭缝的宽度来控制光通量,进而实现大范围连续可调的光功率输出。

### 2.2 线性基准模块

线性基准模块实现输入光功率的线性测量,由具有良好线性度的红外光电探测器、放大电路及数据采集装置组成。

红外光电探测器的输出与入射光功率具有良好的线性关系,可作为红外焦平面阵列非线性响应标定的依据,测试并记录被测光照度。测量中,需根据标定波长选用相应的光电探测器。从通用性考虑,在近红外波段常选用钢镓砷(InGaAs)光电探测器,而中红外波段则选用碲镉汞(HgCdTe)光电探测器。放大电路选用仪表放大器配合精密电阻、恒流源构建,其非线性度小于0.1%。数据采集装置使用具有良好线性度的数据采集卡,其

采样噪声的统计平均值小于 1 mV。

### 2.3 双积分球模块

双积分球模块提供具有固定倍率且处于不同量级的均匀辐照输出。

红外光电探测器线性工作区间的光功率密度与红外焦平面阵列响应的饱和功率密度通常存在数个量级的差别,因此,需通过设计为二者同时提供具有固定倍率且处于不同量级的辐照光功率。因积分球不仅可以提供均匀的辐照输出,还因其设计参数的不同而具备不同的输出衰减倍率,故采用双积分球的结构即可达到设计要求。如图 1 所示,积分球 I 为功率测量积分球,用于为线性基准模块提供衰减后的均匀辐照,使模块中的红外光电探测器工作于其线性区间;积分球 II 用于对入射激光进行进一步衰减,为饱和功率很低的待校正红外焦平面阵列提供均匀辐照。随着入射光功率的变化,双积分球结构还可使不同出口的输出功率比值为定值,满足测量的线性要求。

### 2.4 其他模块

红外焦平面阵列模块主要由安装平台、待测红外焦平面阵列及配套的数据采集和控制部件组成。该模块提供对红外焦平面阵列工作参数的控制及响应输出值的采集。

数据处理模块实现对线性基准模块和待测红外焦平面阵列输出值的融合分析与拟合计算,得到红外焦平面阵列的实际响应曲线。

## 3 测量方法与数据处理

测量红外焦平面阵列的实际响应曲线时,首先调节光源模块的正交狭缝宽度,使待校正红外焦平面阵列中大部分像元的响应值略低于饱和值。在此照度下调整线性基准模块的放大倍数,使其输出值位于最大设定值附近。同步采集并记录线性基准模块输出和红外焦平面阵列输出。然后逐步减小正交狭缝宽度,保持基准模块放大倍数不变,采集并记录不同光功率辐照下输出数据。

线性基准模块的输出为红外光电探测器测量信号经电路放大后的响应电压值  $V$ ,该值与辐照于探测器表面的激光功率密度  $I_1$  呈线性关系:

$$V = r_0 I_1, \quad (1)$$

式中,  $r_0$  为所用探测器的线性响应系数。

红外焦平面阵列的输出为各阵列单元在激光辐照下的像素响应灰度值。设阵列单元  $(i, j)$  在功率密度为  $I_2$  的红外激光辐照下响应灰度值为  $x_{i,j}$ , 则有

$$x_{i,j} = f_{i,j}(I_2), \quad (2)$$

式中,函数  $f_{i,j}$  为该阵列单元的非线性响应曲线。

在双积分球模块中,两积分球出口处的激光功率密度的比值为定制,设为  $a_0$ , 则有

$$I_2 = a_0 I_1 = \frac{a_0}{r_0} \times V. \quad (3)$$

由此,红外焦平面阵列单元  $(i, j)$  的非线性响应曲线可表示为:

$$x_{i,j} = f_{i,j}\left(\frac{a_0}{r_0} V\right) = F_{i,j}(V). \quad (4)$$

校正曲线  $F'_{i,j}$  为响应曲线  $F_{i,j}$  的反函数:

$$V = F'_{i,j}(x_{i,j})(V). \quad (5)$$

在进行数据处理时,  $F'_{i,j}$  可由测量数据直接拟合得到。

红外焦平面阵列非线性校正曲线的使用目的是对测量数据的非线性部分进行校正以使响应值与辐照光功率呈线性关系,从而在激光光斑测量中真实反映所测激光束的强度分布情况。同时,红外焦平面阵列通常具有一定的线性响应区间。因此,在拟合误差的范围内,在红外焦平面阵列的线性响应区间,非线性校正曲线的输出应与输入响应值保持一致。由此,实际使用的校正曲线应对式(5)中的线性基准模块输出值  $V$  进行一定的线性变换。

$$V'_{i,j} = a_{i,j} V, \quad (6)$$

式中,  $a_{i,j}$  为阵列单元  $(i, j)$  的线性变换系数,  $V'_{i,j}$  为变换后的输出值。

线性变换系数  $a_{i,j}$  可由红外焦平面阵列线性响应区间内的测量数据来确定,如式(7)所示:

$$a_{i,j} = \frac{\sum_{k=1}^N x_{i,j}(k)/V(k)}{n}, \quad (7)$$

式中,  $k$  为数据帧编号,  $n$  为线性响应区间内的测量数据个数。由此,实际使用的校正曲线  $C_{i,j}$  可表示为:

$$V'_{i,j} = C_{i,j}(x_{i,j}). \quad (8)$$

数据处理时,在使用式(6)对线性基准模块

输出值进行线性变换后,对各阵列探测单元的测量数据分别进行拟合即可得到其非线性校正曲线。拟合时,根据测量数据的分布特征,可采用一阶分段函数拟合或多项式拟合等方法对数据进行曲线拟合。

#### 4 实验研究

选取某型近红外焦平面阵列进行测量,其材料为 InGaAs,采集电路为 14 位 AD。选用波长为 1 064 nm、最大输出功率为 10 W 的光纤激光器为实验光源,线性基准模块采用 InGaAs 光电探测器,取阵列中某一单元为研究对象,测得的数据点分布如图 2 所示。

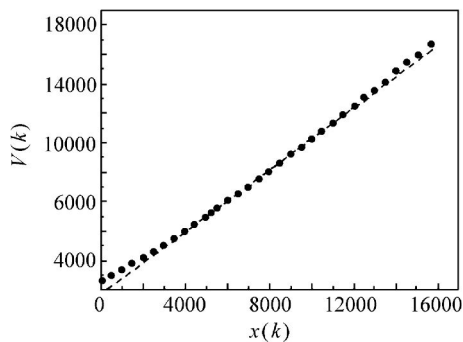


图2 某近红外焦平面阵列单元测量数据分布图  
Fig. 2 Response curve of a near infrared focal plane array unit

从分布趋势可以看出,该阵列单元响应区间的低值段存在着较显著的非线性现象,而高值段

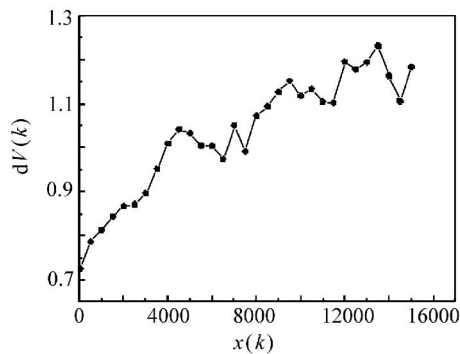


图3 阵列单元采集数据的一阶导数图  
Fig. 3 First order derivative curve of the acquired data of array unit

未见明显的饱和趋势。用前向差分法求点列的一阶导数,结果如图 3 所示。图中的数据分布没有明显的平顶和阶段跳变,不适合用一阶分段函数来拟合。由于点列一阶导数的分布近似二次曲线,因此可用三阶多项式对点列进行拟合,其拟合公式为:

$$V = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3, \quad (9)$$

式中,  $a_0 = 534.7955$ ,  $a_1 = 0.76945$ ,  $a_2 = 2.47323 \times 10^{-5}$ ,  $a_3 = -4.89011 \times 10^{-10}$ , 拟合数据的最大相对误差低于 3%。在进行光斑测量时,将该阵列单元的实测值作为输入值,即可由式(9)所示的校正曲线求解对应的校正值。测量数据校正前后的分布情况对比如图 4 所示。

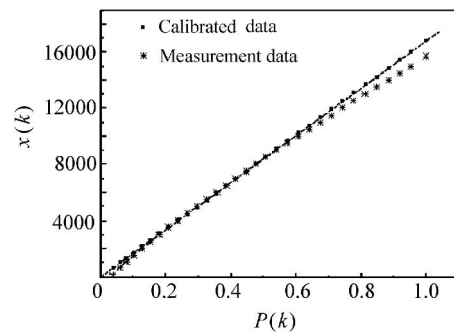


图4 校正前后对比

Fig. 4 Comparison curves of before and after nonlinear calibration

图中的输入功率  $P(k)$  为按最大功率归一化的功率值。对比较正前的数据分布可以看出,校正后的红外焦平面阵列响应值与输入功率成明显的一阶线性关系,有效地改善了测量数据的非线性失真。

利用各阵列单元的非线性校正曲线对测量的光斑数据进行校正,可较好地还原光斑的分布。在实际校正过程中,由于焦平面阵列光电响应“死区”的存在,校正曲线通常不通过(0,0)点,对零值附近的响应数据还需做进一步的处理。

#### 5 结论

通过使用红外焦平面阵列的非线性校正曲线,可有效地改善阵列单元响应曲线的非线性失

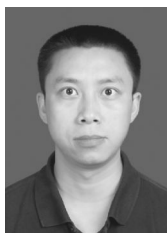
真,从而有利于提高基于红外焦平面阵列进行光斑参数测量的精度。本文提出的基于单波长激光器测定红外焦平面阵列实际响应曲线的方法,不仅可以消除标定过程中因红外焦平面阵列光谱响应不均匀性带来的标定误差,还可在未知辐照光

功率具体值的条件下直接测量得到校正曲线。该方法不必使用高灵敏度的光功率计,测量装置的器件具有通用性,在简单易行的同时保证了较高的测量精度。

### 参考文献:

- [1] 戴运峰,谢永杰,段刘华,等. 复合热像法定量测量红外激光辐照度分布[J]. 红外与激光工程,2008,37(1):86-88.  
JI Y F, XIE Y J, DUAN L H, *et al.*. Laser irradiating distribution measurement based on diffuse reflectance and calorimetry technology[J]. *Infrared and Laser Eng.*, 2008, 37(1): 86-88. (in Chinese)
- [2] 李恩德,段海峰,杨泽平,等. 电荷耦合器件光电响应特性标定研究[J]. 强激光与粒子束,2006,18(2):227-229.  
LI E D, DUAN H F, YANG Z P, *et al.*. Method of calibrating CCD optics-electron characteristic[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(2): 227-229. (in Chinese)
- [3] 曹扬,金伟其,刘崇亮,等. 红外焦平面阵列的自适应非均匀性校正及硬件实现[J]. 光学精密工程,2011,19(12):2985-2991.  
CAO Y, JIN W Q, LIU CH L, *et al.*. Adaptive nonuniformity correction and hardware implementation of IRFPA[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 2985-2991. (in Chinese)
- [4] 李博翰,于晓梅. 电容读出式非制冷红外焦平面阵列设计[J]. 光学精密工程,2011,19(4):762-767.  
LI B H, YU X M. Design of capacitive-read infrared FPA[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 762-767. (in Chinese)
- [5] 代少升,张新立. 利用单片可编程系统对红外焦平面阵列进行实时非均匀性校正[J]. 光学精密工程,2009,17(4):854-858.  
DAI SH SH, ZHANG X L. Real-time nonuniformity correction of infrared focal plane arrays by system on programmable chip[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(4): 854-858. (in Chinese)
- [6] 刘明华,余模智,何平安,等. 线阵 CCD 采集系统的非线性度测量[J]. 武汉测绘科技大学学报,1996,21(4):399-402.  
LIU M H, YU M ZH, HE P A, *et al.*. The research of measuring nonlinear scale of linear CCD sampling and collecting system[J]. *J. Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*, 1996, 21(4): 399-402. (in Chinese)
- [7] 侯婷,顾国华,陈钱. 基于 FPGA 的红外焦平面成像条纹噪声逐帧抑制算法的研究[J]. 光学与光电技术,2012,10(6):77-81.  
HOU T, GU G H, CHEN Q. Strip noise suppression algorithm of infrared focal plane imaging frame by frame based on FPGA[J]. *Opt. Optoelectronic Technology*, 2012, 10(6): 77-81. (in Chinese)
- [8] 黄竹邻,柳刚,何兆湘,等. 基于反中值滤波的红外焦平面自适应非均匀性校正方法[J]. 光学与光电技术,2005,3(3):62-64.  
HUANG ZH L, LIU G, HE ZH X, *et al.*. Adaptive nonuniformity correction based on inverted median filtering of infrared focal plane[J]. *Opt. Optoelectronic Technology*, 2005, 3(3): 62-64. (in Chinese)
- [9] 代少升. 红外焦平面阵列非均匀性非线性校正新方法[J]. 光电工程,2008,35(4):121-125.  
DAI SH SH. New method of IRFPA nonuniformity correction with nonlinear response[J]. *Opto-Electronic Eng.*, 2008, 35(4): 121-125. (in Chinese)
- [10] 李宁,杨词银,曹立华,等. 3~5  $\mu\text{m}$  红外焦平面阵列的辐射定标[J]. 光学精密工程,2011,19(10):2319-2325.  
LI N, YANG C Y, CAO L H, *et al.*. Radiance calibration for 3~5  $\mu\text{m}$  infrared focal plane array[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10): 2319-2325. (in Chinese)
- [11] 张云峰. 基于加权最小二乘法的红外辐射定标[J]. 液晶与显示,2012,27(6):832-836.  
ZHANG Y F. Radiance calibration based on weighted least square method[J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(6): 832-836. (in Chinese)

## 作者简介:



王 飞(1978—),男,四川乐山人,硕士,助理研究员,2002年于中国科学技术大学获得学士学位,2005年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事强激光诊断与测试技术方面的研究。E-mail: wf97@ustc.edu



徐作冬(1982—),男,安徽淮南人,硕士,工程师,2005年、2008年于中国科学技术大学分别获得学士、硕士学位,主要从事激光测量等方面的研究。E-mail: zuodong@ustc.edu



戢运峰(1977—),男,湖北十堰人,硕士,副研究员,1998年于国防科学技术大学获得学士学位,2001年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事强激光诊断与测试技术方面的研究。E-mail: YF.Jacky@gmail.com



邵碧波(1962—),女,浙江杭州人,高级实验师,1986年于国防科技大学获得学士学位,主要从事激光参数测量方面的工作。E-mail: shao\_bb@126.com



冯 刚(1981—),男,湖北京山人,工程师,2004年于武汉大学获得学士学位,2007年于西北核技术研究所获硕士学位,主要从事信号与信息处理方面的工作。E-mail: fenggang9731@yeah.net