

# DMD 红外场景产生器非均匀性校正方法研究

肖文健, 许振领, 周旋风

(电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 河南 洛阳 471003)

**摘要:** 非均匀性是影响数字微镜器件 (Digital Micro-mirror Device, DMD) 红外场景产生器投射红外场景质量的主要因素之一, DMD 红外场景产生器必须经过非均匀性校正才能满足复杂环境下红外成像设备内场仿真试验的应用要求。给出了 DMD 红外场景产生器的非均匀性校正流程; 提出了一种更适用于现有测试条件的变尺度稀疏网格非均匀性测量方法; 采用线性化和分段校正进行离线数据处理; 采用“在线查表法”进行实时非均匀性校正。仿真结果表明: 经过变尺度稀疏网格测试法及非均匀性实时校正算法, 可将非均匀性降低至 0.5% 左右, 显著提高了 DMD 红外场景产生器的红外场景仿真质量。

**关键词:** 红外场景产生器; 数字微镜器件; 非均匀校正; 变尺度稀疏网格

中图分类号: TN216 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2020)01-0021-05

## Nonuniformity Correction of Infrared Scene Simulator Based on DMD

XIAO Wenjian, XU Zhenling, ZHOU Xuanfeng

(State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System,  
Luoyang 471003, China)

**Abstract:** The nonuniformity of an infrared scene simulator based on a digital micro-mirror device(DMD) is one of the major factors affecting its performance, and it must be corrected to satisfy the application requirements of the simulation testing of infrared imaging equipment in complex environments. The nonuniformity correction flow of an infrared scene simulator based on a DMD was investigated in detail. A method for measuring the nonuniformity of a variable scale sparse grid was used to fit the test conditions better. Offline data processing based on linearization and segmentation correction was introduced, and real-time nonuniformity correction based on online table lookup was adopted. The simulation shows that the nonuniformity can be reduced to approximately 0.5% by the variable scale sparse grid measurement and real-time nonuniformity correction. The infrared scene quality of the infrared scene simulator based on a DMD improved significantly.

**Key words:** infrared scene simulator, DMD, nonuniformity correction, variable scale sparse grid

## 0 引言

红外场景产生器是红外成像系统内场半实物仿真测试的重要组成部分, 其可将计算机仿真的灰度图像实时转换为红外成像系统能敏感的红外辐射信号, 用来模拟各类目标、背景以及干扰的红外辐射<sup>[1]</sup>。数字微镜器件 (Digital Micro-mirror Device, DMD) 以其分辨率高、帧频高、动态范围大等优势广泛应用于各类红外场景产生器中<sup>[2]</sup>。对于理想的 DMD 红外场景产生器, 在相同的输入下所有微镜单元应产生一致

的红外辐射响应。而实际由于光源、光学系统以及 DMD 器件响应一致性等因素的影响, 各个微镜单元的红外辐射响应却并不相同, 即表现为红外场景产生器辐射的非均匀性。根据前期调研结果, DMD 红外场景产生器当前在国内工业部门的半实物仿真测试中主要用来模拟目标的运动特性, 而对目标和背景红外辐射特性的模拟精度要求相对不高, 并且鲜有对于人为主动干扰的模拟。DMD 红外场景产生器非均匀性对于工业部门红外成像系统半实物仿真测试的影响可以忽略不计, 因此在非均匀性校正 (Nonuniformity

收稿日期: 2019-10-23; 修订日期: 2020-03-12.

作者简介: 肖文健 (1989-), 男, 河北张家口人, 博士, 助理研究员, 主要从事光电对抗方面的研究。E-mail:xiao\_wen\_jian@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金 (11904398)。

Correction, NUC) 方面的研究比较少<sup>[3-5]</sup>。

对于复杂光电环境下红外成像系统对抗的内场仿真测试试验, 红外场景产生器不仅要模拟目标的运动特性, 更需要精确模拟目标、背景的红外辐射特性以及自然、人为干扰效应和大气传输效应。此时, DMD 红外场景产生器的非均匀性则成为影响其红外场景仿真质量而不容忽视的一个的重要因素。

为了提高内场仿真试验中红外辐射场景模拟的逼真度, 本文在深入研究当前广泛使用的非均匀性校正方法基础上, 针对 DMD 分辨率相对电阻阵列较大的特点, 根据非均匀性测量信号的信噪比调整稀疏网格大小, 提出一种适用于 DMD 红外场景产生器的非均匀性测量和校正方法。该方法可有效改善 DMD 红外场景产生器的非均匀性, 提高红外场景模拟精度, 对 DMD 红外场景产生器在红外场景动态仿真方面的应用具有一定参考价值。

## 1 变尺度稀疏网格非均匀性测量

对每个辐射元的辐射响应特性进行精确测量是非均匀性校正的前提。目前国内外对电阻阵列非均匀性测量方法的研究较多并且大多只针对电阻阵列器件自身。本文将在深入研究电阻阵列非均匀性测量方法的基础上, 充分考虑 DMD 特性, 提出一种适用于 DMD 的非均匀性测量方法。同时考虑到 DMD 配套不同光学系统, 其非均匀性表现是不同的, 因此本文将对 DMD 红外场景产生器整个系统的非均匀性进行测量。

### 1.1 传统稀疏网格测量方法

当前关于电阻阵列非均匀性测量的方法主要有“稀疏网格”法和“Flood”法两种, 区别主要是非均匀性信息的采集方法和数据处理方法上的不同。稀疏网格法是将电阻阵列划分成网格再对网格中每个辐射元进行逐个测量, 而 Flood 法是把电阻阵列作为一个整体进行测量。测量过程中, Flood 法需要精确调校电阻阵列辐射元与热像仪像元之间的映射比, 而稀疏网格法则不需要考虑电阻阵列辐射元与热像仪像元之间的映射比, 更加简便易用<sup>[6-11]</sup>。考虑到 DMD 的辐射元数量远高于电阻阵列, 同时也高于大部分红外成像设备, 难以准确建立 DMD 微镜单元与热像仪像元之间的映射比, 因此本文主要对稀疏网格法进行研究。

传统稀疏网格法的测量原理如下<sup>[12]</sup>: 首先在 DMD 上划分虚拟的网格, 网格大小的选取以相邻网格中同一位置微镜单元的辐射能量在探测焦平面不发生混叠为准。然后依次点亮网格图像, 对 DMD 每个微镜单元的输出响应进行测量。DMD 的每一幅网

格图像都是通过点亮各网格内的某一特定位置上的单个微镜单元产生的。点亮每个网格中第一行第一列的微镜单元, 构成第一幅网格图像。对第一幅网格图像测量完毕后, 熄灭其中的微镜单元, 然后点亮每个网格中第一行第二列的微镜单元, 构成第二幅网格图像。依次点亮每个网格中的单个微镜单元, 产生一幅幅网格图像, 依次对网格图像进行测量, 直到对整个 DMD 测量完毕。依次点亮网格图像的过程可称为网格图像的“移位”。DMD 网格图像产生和移位过程如图 1 所示, 图中为一个假想的 4×4 DMD, 每个小方格表示一个微镜单元, 填充黑色部分表示被点亮的微镜单元。将该 DMD 划分为 4 个网格, 每个网格的大小为 2×2, 测量整个 DMD 共需要投射 4 幅网格图像。

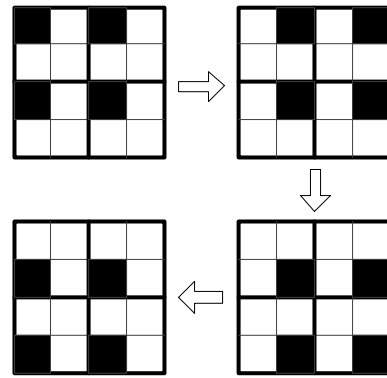


图 1 稀疏网格测量示意图

Fig.1 Measurement diagram of sparse grid

### 1.2 变尺度稀疏网格测量方法

稀疏网格法最大的优点在于能够对 DMD 每一个微镜单元的输出响应进行单独测量, 各个微镜单元之间的辐射没有耦合。不过在对单个微镜单元的输出响应进行测量时, 由于微镜单元的面积很小, 辐射亮度有限。因此在驱动占空较大的高辐射区间即信噪比较高时, 测量精度较高, 而在驱动占空比较小的低辐射区间即信噪比较低时, 很容易受到背景红外辐射和随机噪声的干扰, 甚至被淹没掉, 所以该方法对测量设备和测试环境的要求很高。为了克服单个微镜单元在低辐射区间容易受到背景红外辐射和随机噪声干扰的难题, 本文结合现有测试条件对传统稀疏网格法做了改进, 提出一种变尺度的稀疏网格测量方法。

当 DMD 辐射亮度较低时, 由于红外成像系统探测能力有限, 因此在一定区域范围内 ( $m \times m$ ) 的微镜单元的非均匀性可以近似忽略, 并且  $m$  值随着 DMD 辐射亮度的降低而增大。根据该测试现象, 与传统稀疏网格法在测量过程中只点亮各网格内单个微镜单元不同, 本文将网格内  $m \times m$  区间范围内的微镜单元同时点亮然后移位, 如图 2 所示。图中为一个

假想的  $8 \times 8$  DMD, 每个小方格表示一个微镜单元。设定网格大小为  $4 \times 4$ , 将该 DMD 划分为 4 个网格。在对某一辐射亮度测量过程中, 以 4 个微镜单元为一组, 即在网格中  $2 \times 2$  区间范围内微镜单元的响应差别可以忽略不计。测量时, 首先点亮每个子网格内的第一组微镜单元, 取这 4 个微镜单元响应输出的平均值, 将此平均值作为各个子网格内第一组 4 个微镜单元的响应输出。然后按此方法依次对每个子网格内其它若干组微镜单元的响应输出进行测量, 直到对整个 DMD 的所有微镜单元响应输出测量完毕。

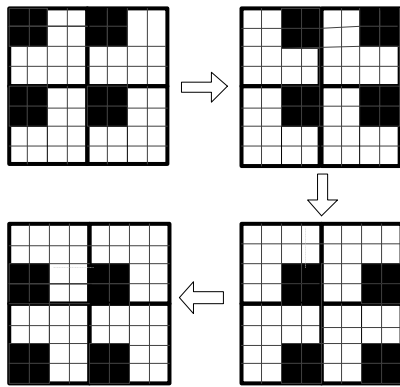


图2 变尺度稀疏网格测量示意图

Fig.2 Measurement diagram of variable scale sparse grid

在整个辐射亮度范围测量过程中, 以  $m \times m$  区间范围内微镜单元响应的平均值作为其中每个微镜单元的响应, 并且  $m$  的取值大小会随着辐射亮度的变化而相应调整。当微镜单元辐射亮度较小时, 由于测量信号的信噪比较低, 此时  $m$  的取值相对较大; 测量过程中随着微镜单元辐射亮度逐渐增大,  $m$  的取值随之逐渐减小; 当微镜单元辐射亮度增大到一定范围时, 由于测量信号的信噪比较高, 可将  $m$  的设置 1, 此时测量方法与传统的稀疏网格相同。这样通过调整  $m$  值大小可以保证在 DMD 整个辐射亮度范围内都有较好的测量结果。

理论上当 DMD 辐射亮度较小时, 忽略同一区间范围内各微镜单元之间的非均匀性, 对“面”测量取平均值会带来方法误差, 测量精度必然会比对“点”测量要低。然而在实际测量中发现, 受测量设备灵敏度所限, 当 DMD 辐射亮度较小时, 对“面”测量取平均值的精度反而要优于直接对“点”测量的精度。因此, 本文所提出的变尺度稀疏网格测量方法非常适合现有测量条件下对 DMD 红外场景产生器非均匀性的测量。

## 2 非均匀性校正

DMD 红外场景产生器非均匀性校正的基本思路

是首先对非均匀性测量数据进行离线处理, 生成非均匀性校正所需的校正参数查找表 (Look up table, LUT); 然后再根据非均匀性校正参数对 DMD 红外场景产生器的输入量进行在线修正, 以此实现对 DMD 红外场景产生器非均匀性的实时校正。

为了降低非均匀校正难度, 首先对微镜单元响应特性进行线性化处理。根据微镜单元平均响应特性数据拟合曲线并作为所有微镜单元的标准响应曲线, 然后求其反函数作为每个微镜单元的线性化函数。这样, 每个微镜单元的输入经过线性化函数运算后再作用于微镜上, 即可使得微镜单元的输入与输出近似为线性关系。为了保证线性化运算的实时性, 选择选取适当的断点数量将线性化函数分段线性化, 如图 3 所示。

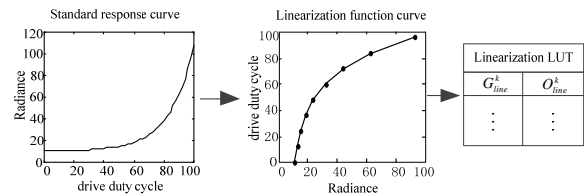


图3 线性化查找表生成原理图

Fig.3 The schematic of linearization LUT generation

假设选取  $h$  个断点将其分为  $h-1$  个直线段, 线性化函数每个直线段都对应一组由增益  $G_{\text{line}}^k$  和偏置  $O_{\text{line}}^k$  组成的修正数据, 其中:

$$\begin{cases} G_{\text{line}}^k = \frac{d^{k+1} - d^k}{\bar{l}^{k+1} - \bar{l}^k} \\ O_{\text{line}}^k = \frac{d^k \cdot \bar{l}^{k+1} - d^{k+1} \cdot \bar{l}^k}{\bar{l}^{k+1} - \bar{l}^k} \end{cases} \quad k = 1, \dots, h-1 \quad (1)$$

式中:  $d^k$  为第  $k$  个断点处微镜单元的驱动占空比;  $\bar{l}^k$  为第  $k$  个断点处微镜单元的标准响应。将式(1)中增益校正系数  $G_{\text{line}}^k$  和偏置校正系数  $O_{\text{line}}^k$  存于缓存以供非线性实时校正时使用, 即为线性化查找表。线性化查找表的数据量为  $2 \times (h-1)$  个, 与 DMD 的分辨率无关。

由于 DMD 每个微镜单元响应特性的差异, 经过线性化处理后, 不同微镜单元的响应表现为近似直线的不同曲线。因此还需要通过非均匀性校正将各个微镜单元线性化后的响应曲线归一化到标准响应曲线上, 如图 4 所示。

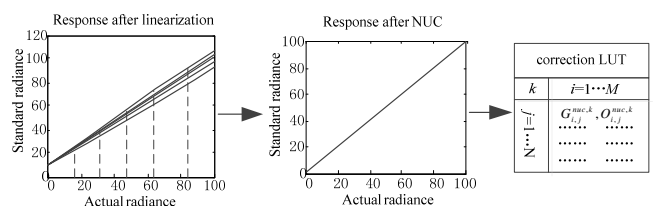


图4 非均匀性校正查找表生成原理图

Fig.4 The schematic of correction LUT generation

考虑非均匀性校正实时性因素,校正过程采用分段校正方法。对于 DMD 任意一个位置  $(i, j)$  处的微镜单元,同样选取  $h$  个断点将其分为  $h-1$  个直线段。经过数学推导可得,每个直线段都对应一组由增益

$G_{i,j}^{nuc,k}$  和偏置  $O_{i,j}^{nuc,k}$  组成的修正数据,

$$\begin{cases} G_{i,j}^{nuc,k} = \frac{l_{i,j}^{corr,k+1} - l_{i,j}^{corr,k}}{l_{i,j}^{in,k+1} - l_{i,j}^{in,k}} & k=1, \dots, h-1, \\ O_{i,j}^{nuc,k} = l_{i,j}^{corr,k} - \frac{l_{i,j}^{corr,k+1} - l_{i,j}^{corr,k}}{l_{i,j}^{in,k+1} - l_{i,j}^{in,k}} l_{i,j}^{in,k} & i=1, \dots, M, \\ & j=1, \dots, N \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $l_{i,j}^{corr,k}$ 、 $l_{i,j}^{corr,k+1}$  分别为分段点处校正后的标准响应输出;  $l_{i,j}^{in,k}$ 、 $l_{i,j}^{in,k+1}$  分别为分段点处的实际响应输出。将式(2)中的修正数据  $(G_{i,j}^{nuc,k}, O_{i,j}^{nuc,k})$  增存于缓存以供非线性实时校正时使用,即为非均匀性校正查找表。如果 DMD 的分辨率为  $M \times N$ ,那么非均匀性校正查找表的数据量即为  $M \times N \times 2 \times (h-1)$ 。

通过上述的数据处理,分别生成了 DMD 红外场景产生器非均匀性校正所需的线性化查找表和非均匀性校正查找表。在非均匀性实时校正过程中仅需要根据输入在查找表中查找对应的参数进行修正即可,整个非均匀性实时校正流程如图 5 所示。

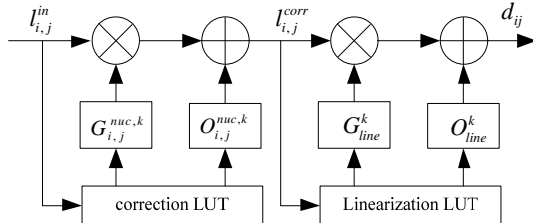


图 5 非均匀性实时校正流程图

Fig.5 The flow of NUC

图 5 中非均匀性实时校正主要分为以下两步:首先根据输入的期望辐射亮度  $l_{i,j}^{in}$  在非均匀性校正查找表中查找相应的修正参数,计算得到校正数据  $l_{i,j}^{corr}$ ;

$$l_{i,j}^{corr} = G_{i,j}^{nuc,k} \cdot l_{i,j}^{in} + O_{i,j}^{nuc,k} \quad k=1,2, \dots, h-1 \quad (3)$$

然后通过线性化查找表,计算  $l_{i,j}^{corr}$  所对应的控制占空比  $d_{ij}$ ,驱动 DMD 产生与期望相同的红外辐射亮度。

$$d_{i,j} = G_{line}^k \cdot l_{i,j}^{corr} + O_{line}^k \quad k=1,2, \dots, h-1 \quad (4)$$

### 3 数值仿真与分析

设 DMD 红外场景产生器单个微镜单元的输出响应为  $l_{ij}$ ,  $M$  和  $N$  分别为 DMD 的行数和列数,其非均匀性定义为输出响应标准差与均值之比,如公式(5)所示。

$$NUC = \text{Std}(l_{i,j}) / \text{Mean}(l_{i,j}) \quad (5)$$

式中:

$$\text{Mean}(l_{i,j}) = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M l_{i,j},$$

$$\text{Std}(l_{i,j}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (l_{i,j} - \bar{l}_{i,j})^2}{M \times N - 1}}.$$

非均匀性校正算法的优劣主要取决于校正后残余非均匀性指标,其次还要兼顾对非均匀性校正参数存储量的需求。为验证本文所述非均匀校正算法的效果,在 Matlab 中对生成的模拟 DMD 进行仿真验证。以真实 DMD 微镜单元平均响应特性的实测数据作为模拟 DMD 的标准响应特性,在标准响应特性曲线采样点的输出数据上添加高斯噪声,模拟 DMD 红外场景产生器的非均匀性。最终生成的模拟 DMD 微镜单元的响应曲线如图 6 所示。

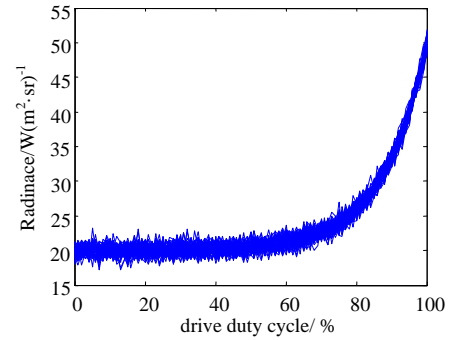


图 6 仿真 DMD 响应特征曲线

Fig.6 The response characteristic curve of simulated DMD

首先,检验分段校正点个数对非均匀校正效果的影响。通过计算,当数值 DMD 所有微镜单元驱动占空比一致均为 50% 时,其原始输出的非均匀性为 10.72%。通过设定不同分段点数对非均匀性校正算法分别进行了数值计算,结果如表 1 所示。

从仿真结果来看,适当增加分段点个数,可以显著降低残余非均匀性,不过达到一定量的时候,继续增加分段点个数不再显著降低残余非均匀性。过多的分段点会增加校正数据的存储量,影响查表速度,因此需要根据实际需求确定分段校正点的个数,在满足校正精度需求的前提下尽量减少数据量。

表 1 不同分段点数非均匀性校正结果

Table 1 The NUC results about different segmentation points

Number of segment points	Residual non-uniformity
3	8.52%
6	4.42%
9	0.52%
12	0.49%

为了验证在不同驱动占空比输入下 DMD 红外场

景产生器非均匀性校正效果, 设定分段点的数量为 9 且固定不变, 选取输入为 10%~100% 的 10 组数据分别对非均匀性校正算法分别进行了数值计算, 结果如表 2 所示。

表 2 不同驱动占空比非均匀性校正结果

Table 2 The NUC results about different drive duty cycle

Drive duty cycle	Residual non-uniformity (before correction)	Residual non-uniformity (after correction)
10%	9.34%	0.42%
20%	9.77%	0.41%
30%	10.13%	0.45%
40%	10.32%	0.43%
50%	10.72%	0.52%
60%	10.71%	0.51%
70%	10.74%	0.52%
80%	10.42%	0.47%
90%	10.25%	0.43%
100%	10.11%	0.44%

从仿真结果来看, 从未校正数值阵列在不同驱动占空比的非均匀性在 10% 左右, 而校正后的残余非均匀性在 0.5% 左右, 该非均匀性校正方法在不同驱动占空比下均具有较好的校正效果。

#### 4 结论

本文结合工程实际应用背景重点研究了 DMD 红外场景产生器的非均匀性校正方法。首先在深入研究传统稀疏网格测量方法的基础上, 充分考虑 DMD 的红外辐射调制特性, 提出了一种变尺度稀疏网格的非均匀性测量方法, 该方法可根据测量信号的信噪比调整网格大小, 有效解决了传统稀疏网格在低信噪比条件下测量困难的问题。然后研究了分段校正算法的原理与实现方法。最后利用模拟数值 DMD 对校正算法进行了仿真验证, 在不同驱动占空比输入下该方法均可有效降低 DMD 红外场景产生器的非均匀性。下一步可以考虑在此研究基础上设计基于硬件平台的数据传输校正卡, 将非均匀校正算法和参数固化于其中, 在工程上实现对 DMD 红外场景产生器非均匀性的实时校正。

#### 参考文献:

[1] 李卓, 钱丽勋, 欧文. 动态红外场景生成新技术[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 1-6.  
LI Zhuo, QIAN Lixun, OU Wen. New technologies of infrared scene projection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 1-6.

[2] 陆志洋, 高文, 洪泽华, 等. 高逼真度红外复杂场景动态实时生成技术研究[J]. 系统仿真学报, 2017, 27(1): 76-81.  
LU Zhifeng, GAO Wen, HONG Zehua, et al. Research on dynamic realtime infrared complicated scene generation technology[J]. *Journal of System Simulation*, 2017, 27(1): 76-81.

[3] ZHANG Kai, HUANG Yong, YAN Jie, et al. Dynamic infrared scene simulation using grayscale modulation of digital micro-mirror device[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2013, 26(2): 394-400.

[4] 徐正平. 数字微镜器件在光电设备中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51: 051103.  
XU Zhengping. Application of digital micromirror device in photoelectric equipment[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51: 051103.

[5] 张颖新, 王云萍, 侯军燕. 高帧频 DMD 红外景象仿真设备电路与光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(4): 0404003  
ZHANG Yingxin, WANG Yunping, HOU Junyan. Circuit and optical system design for high frame rate DMD infrared scene simulation equipment[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 0404003.

[6] 李艳, 孟庆虎, 吴永刚. 国外电阻阵列非均匀性校正技术概述[J]. 红外技术, 2010, 32(8): 453-456.  
LI Yan, MEN Qinhu, WU Yonggang. Resistor array nonuniformity correction technology from foreign countries[J]. *Infrared Technology*, 2010, 32(8): 453-456.

[7] Robert A Joyce, Leszek Swierkowski, Owen M. Williams. Resistor array infrared projectors nonuniformity correction: search for performance improvement III[C]//*Proc. of SPIE*, 2008, 6942: 69420N.

[8] Tom Danielson, Greg Franksa, Joe LaVeigne, et al. Advances in iterative non-uniformity correction techniques for infrared scene projection[C]//*Proc. of SPIE*, 2015, 9452: 945210.

[9] 苏德伦, 廖守亿, 张金生, 等. 电阻阵列红外景象投射器非均匀性实时校正[J]. 红外技术, 2014, 36(7): 521-526.  
SU Delun, LIAO Shouyi, ZHANG Jinsheng, et al. Resistor array IR scene projector non-uniformity real-time correction[J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(7): 521-526.

[10] 耿旭, 冯晓晨, 李凡. 基于 MOS 电阻阵列的红外目标模拟器非均匀性校正技术研究[J]. 光学与光电技术, 2012, 10(5): 57-62.  
GENG Xu, FENG Xiaochen, LI Fan. Infrared target simulator of non-uniformity correction based on MOS resistor arrays[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2012, 10(5): 57-62.

[11] 杨春伟, 廖守亿, 苏德伦, 等. 电阻阵列非均匀性测试与校正[J]. 红外技术, 2013, 35(6): 345-349.  
YANG Chunwei, LIAO Shouyi, SU Delun, et al. Resistor array nonuniformity measurement and correction[J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(6): 345-349.

[12] 苏德伦, 王仕成, 张金生, 等. 电阻阵列稀疏网格非均匀性修正[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(4): 604-608.  
SU Delun, WANG Shicheng, ZHANG Jinsheng, et al. Sparse grid nonuniformity correction for resistor array[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(4): 604-608.