

文章编号: 1672-8785(2011)08-0012-06

电阻阵列非均匀性测试方法研究

杨春伟 王仕成 苏德伦 廖守亿 张金生

(第二炮兵工程学院 301 教研室, 陕西 西安 710025)

摘 要: 给出了电阻阵列非均匀性校正方法, 并根据非均匀性测试模型分析了 1:1 映射下的非均匀性全屏测试方法。针对图像退化会导致边缘效应以及收敛性变差的问题, 研究了基于点扩散函数估计的全屏测试方法。仿真结果表明, 与原方法相比, 该方法可以减少边缘效应的影响, 并且在平滑因子较大时可以体现出更好的收敛性。

关键词: 电阻阵列; 非均匀性校正; 稀疏网格法; 全屏测试法; 点扩散函数

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2011.08.003

A Non-uniformity Measurement Method for Resistor Arrays

YANG Chun-wei, WANG Shi-cheng, SU De-lun, LIAO Shou-yi, ZHANG Jin-sheng

(Accuracy Guidance and Control Laboratory of the Second Artillery

Engineering College, Xi'an 710025, China)

Abstract: A non-uniformity correction method for resistor arrays is given and a flood non-uniformity measurement method in the mapping ratio 1:1 is analyzed according to the functional diagram of a non-uniformity measurement model. To improve the edge effect and non-ideal convergence due to image deterioration, a flood non-uniformity measurement method based on point spread function estimation is proposed. The simulation result shows that compared with the former method, this method can reduce the edge effect and has a better convergence when a greater smooth factor is existent.

Key words: resistor array; non-uniformity correction; sparse grid; flood; point spread function

0 引言

电阻阵列红外景像投射器是红外成像半实物仿真系统中的关键部件, 它负责将图像生成系统产生的数字灰度图像实时地转换为红外成像系统敏感的红外辐射信号^[1]。但是由于机械加工技术不成熟, 电阻阵列存在一定的非均匀性, 即对于均匀的驱动电压, 电阻阵列的红外辐射能量却不均匀。这种非均匀性将会直接影响

电阻阵列的成像质量。为了能够生成高保真度的红外图像, 在使用电阻阵列之前必须对其进行非均匀性校正。

非均匀性校正效果的好坏取决于对电阻阵列非均匀性进行测试的精确程度。目前, 非均匀性测试技术主要包括稀疏网格法和全屏测试法两种^[1]。其中, 稀疏网格法是将电阻阵列分成网格状, 然后每次只驱动各个网格相同位置上的一个辐射像元, 并测量其输出能量的; 而全屏

收稿日期: 2011-05-16

基金项目: 航空科学基金 (20080112005)

作者简介: 杨春伟 (1986-), 男, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要研究方向为控制系统仿真与系统分析。

E-mail: yangchunwei081129@163.com

测试法则是通过一次性驱动所有辐射像元来测量其非均匀性的。全屏测试法虽然方法复杂,但测试速度快,更重要的是它在低压情况下依然具有较高的信噪比,因此其应用前景更好^[2]。

本文对 1:1 映射比下的非均匀性全屏测试方法进行了改进。改进后的方法能够减少边缘效应的影响,并且在平滑因子较大时具有比原算法更好的收敛性。

1 非均匀性校正方法

非均匀性校正包括非均匀性测试、数据管理和实时校正 3 个环节^[3]。其中,非均匀性测试和数据处理是“离线”完成的。非均匀性测试的目的是获得电阻阵列中每个辐射像元的非均匀性信息。数据处理环节主要对电阻阵列非均匀性的测试结果进行处理,即通过曲线拟合得到所有辐射像元的响应曲线和平均响应特性的反函数曲线,然后通过分段线性化得到线性化查找表和校正查找表。

实时校正环节是在红外图像实时生成系统中“在线”运行的。它根据计算机生成的图像数据调用查找表数据,计算对应的驱动电压,实现辐射亮度数据向驱动电压数据的转换,从而实时驱动电阻阵列产生红外图像。图 1 为实时非均匀性校正的流程图。

实时非均匀性校正的具体步骤如下:

(1) 对于输入数据 $l_{i,j}^{in}$, 在校正查找表中查找相应的增益值和偏置值, 计算得到 $l_{i,j}^{corr}$;

(2) 通过查找线性查找表将 $l_{i,j}^{corr}$ 转换成驱动电压值, 继而驱动电阻阵列产生红外辐射 $l_{i,j}^{out}$ 。

2 非均匀性测试模型

作为非均匀性校正的基础环节和关键部分,非均匀性测试的目的是从探测图像中提取非均匀性信息,进而为实时非均匀性校正提供先验信息。图 2 为电阻阵列非均匀性全屏测试模型的示意图。该模型的工作流程如下: 图像生成计算机产生灰度图像 S_{in} , 然后驱动电阻阵列产生红外辐射投射图像 p (S_{np} 表征电阻阵列的非均匀性噪声, 属于乘性噪声); 投射图像 p 经过光学系统后由于散焦等原因发生退化 (此处用点扩散函数 h 表征), 然后探测器输出探测图像 u ; 通过图像数据处理环节从 u 中提取出非均匀性信息 S_{nuc} , 这是整个流程中的关键部分 (该部分要剔除点扩散函数等的影响, 然后还原真实的投射图像信息); 非均匀性信息生成器将非均匀性信息累乘并将其反馈到灰度图像输入端, 以抵消图像固定噪声的影响。该反馈控制过程经过多次迭代, 直至 $S_{nuc} \rightarrow S_{np}$ 时, 迭代过程结束。此时, 非均匀性信息生成器中的累乘数据 $\prod_{i=1}^n S_{nuc}^i$ 即为电阻阵列的非均匀性信息。

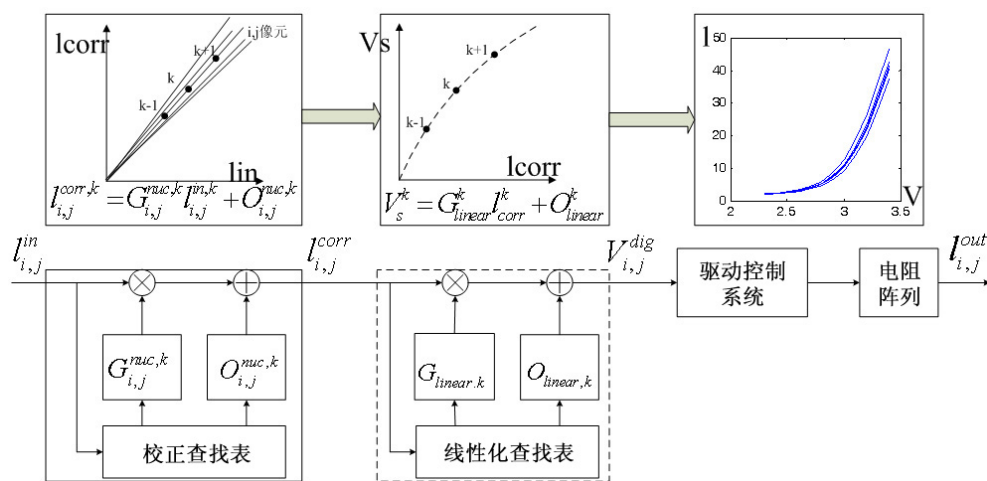


图 1 实时非均匀性校正的流程图

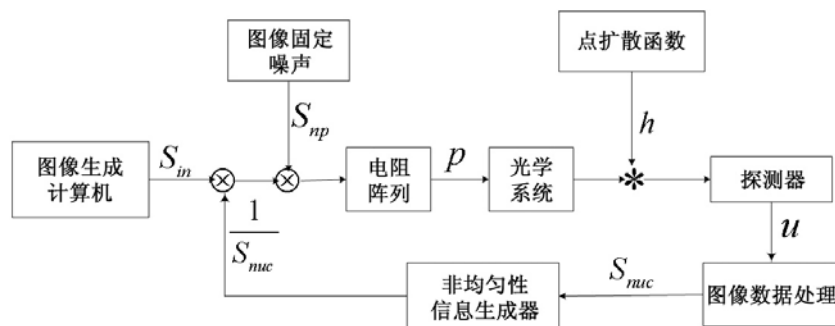


图2 非均匀性全屏测试模型的示意图

3 非均匀性全屏测试方法

3.1 假设条件

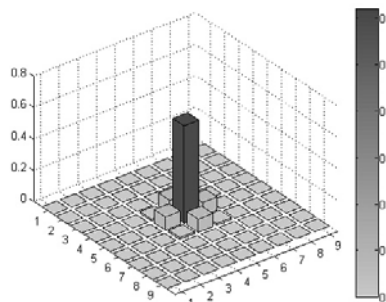
在对全屏测试方法进行研究之前,先作以下假设:

(1) 电阻阵列的非均匀性信息是通过热像仪测得的,因此假设热像仪是均匀的。

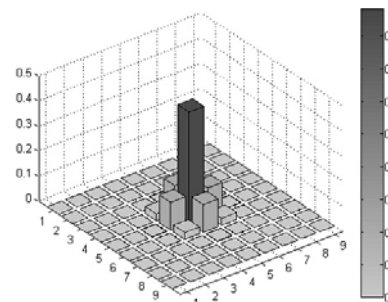
(2) 假设投射像元和探测像元之间的映射比为 1:1 且像元之间实现了精确配准,这样热像仪探测到的非均匀性信息才能被反馈到相应的电阻阵列的辐射像元处。

(3) 由于电阻阵列辐射像元之间的能量串扰和光学系统散焦会导致图像退化,热像仪探测到的图像信息已经不是电阻阵列的真实红外辐射了。此处假设图像退化满足高斯点扩散函数(Point Spread Function, PSF)。这种假设不会影响下面的分析,而且对于实际情况也是一种很好的近似^[4]。点扩散函数可写成:

$$h(i, j) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{i^2 + j^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$



(a) $\sigma=0.5$, 对应探测像元的能量占辐射能量的 62 %



(b) $\sigma=0.6$, 对应探测像元的能量占辐射能量的 44 %

图3 高斯点扩散函数的模糊效应

式中, σ 为高斯点扩散函数的方差,也叫平滑因子。图 3 所示为不同平滑因子所引起的像元能量分散情况。当 $\sigma=0.5$ 时,对应的探测像元的能量占辐射能量的 62 % (以对应像元为中心, 3×3 范围以外像元的辐射能量可以忽略不计)。

3.2 非均匀性全屏测试方法

图 4 为非均匀性全屏测试方法的原理图。其中,输入图像 S_{in} 为均匀图像,非均匀性信息 S_{nuc} 为乘性噪声且每个元素的初始值为 1。观测图像 S_{out} 包括输入图像 S_{in} 、图像噪声 S_{np} 以及引起图像退化的点扩散函数 h 。因此

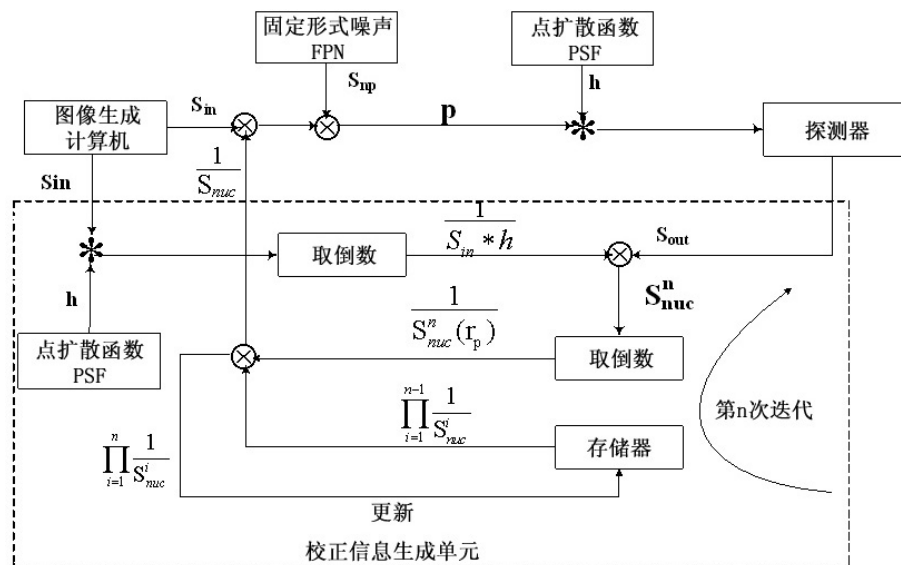
$$S_{out} = \frac{S_{in} \cdot S_{np}}{S_{nuc}} * h \quad (2)$$

第 n 次迭代生成的非均匀性信息为

$$S_{nuc}^n = \frac{S_{out}}{S_{in} * h} \quad (3)$$

若 S_{nuc} 收敛,则

$$\prod_{i=1}^n S_{nuc}^i \rightarrow \prod_{i=1}^{n-1} S_{nuc}^i \Rightarrow S_{nuc}^n \rightarrow 1 \quad (4)$$



由式 (2)、式 (3) 和式 (4) 可得:

$$\frac{S_{np}}{S_{\text{avg}}} \rightarrow 1 \Rightarrow p = \frac{S_{in} \cdot S_{np}}{S_{\text{avg}}} \Rightarrow S_{in} \quad (5)$$

因此当迭代过程结束时,电阻阵列的输出图像 p 即为图像生成计算机产生的均匀图像 S_{in} 。

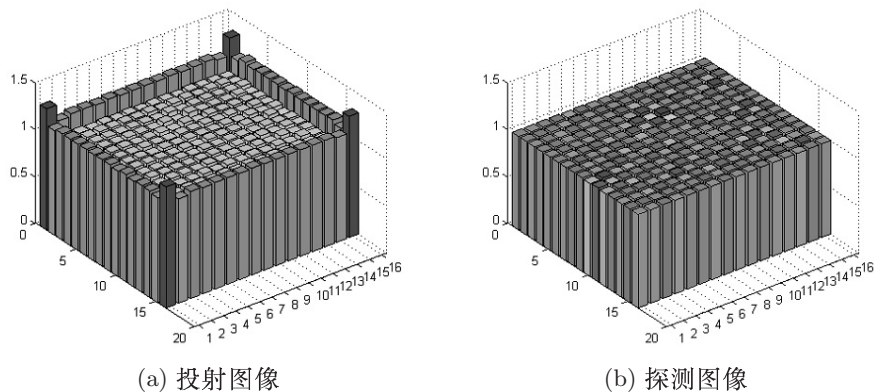
为了验证非均匀性全屏测试方法的正确性, 我们通过 MATLAB 下生成 16×16 数值电阻阵列来进行仿真验证, 并将原始的非均匀性值设为 10 %。图 5 为 $\sigma = 0.50$ 时经过 5 次迭代后得到的投射图像和探测图像。虽然探测图像的非均匀性得到了很好的改善, 但投射图像的边缘辐射值明显升高, 出现了边缘效应^[5]。这是由于点扩散函数引起辐射能量在探测器焦平面上分散的结果, 因为边缘辐射像元的输出扩散到采样图像区

外部, 如果无法得到外部能量的补充, 就导致边缘探测值较低。在测试过程中, 若将边缘效应误认为是非均匀性信息, 边缘的输出就会得到自动补偿, 从而造成上述现象的发生。

图 6 所示为点扩散函数的平滑因子 σ 值不同时全屏测试方法的收敛性。从图 6 中不难看出, σ 值越大, 收敛性越差。

3.3 基于点扩散函数估计的全屏测试方法

上述全屏测试方法虽然无需点扩散函数的精确信息,但当点扩散函数的平滑因子较大($\sigma > 0.5$)时,由图像退化引起的平滑效应将会使收敛性变差甚至出现无法收敛的情况。为了克服这个缺点,我们研究了基于点扩散函数估计的全屏测试方法。该方法仅需点扩散函数的估



计值, 这样既可减少边缘效应, 又可使收敛速度加快, 尤其是在平滑因子较大的时候。图 7 所示为该方法的具体流程。

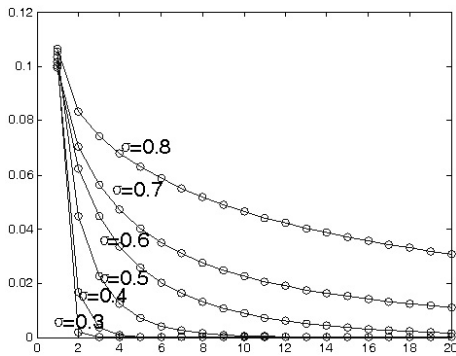


图 6 σ 值对全屏测试方法收敛性的影响

该方法将 S_{np} 看作是加性噪声, 而且非均匀性信息 S_{nuc} 每个元素的初始值为 0^[4]。因此, 当热像仪探测到的非均匀性图像经过处理后, δu 为

$$\delta u(i, j) = \sum_{n, k} h(i - n, j - k) \delta p(n, k) \quad (6)$$

式中, δp 为非均匀性噪声。

$$\delta p(n, k) = p(n, k) - S_{in}(n, k) \quad (7)$$

即

$$\delta u = H \delta p \quad (8)$$

该方法的目的是从探测值 δu 中得到非均匀性投射图像 δp 。由于点扩散函数 h 未知, 不能得

到逆算子 H^{-1} 。假设存在一个近似逆算子 G , 使

$$G \cdot H = I - R \quad (9)$$

式中, I 为单位矩阵, R 为剩余算子。如果 R 足够小, 那么

$$G \cdot \delta u \rightarrow \delta p \quad (10)$$

经过一次迭代后, 剩余非均匀性 δp 及对应的探测图像 δu 为

$$\begin{aligned} \delta p_1 &= \delta p - G \cdot \delta u \\ \delta u_1 &= H \cdot \delta p_1 \end{aligned} \quad (11)$$

那么经过几次迭代后,

$$\begin{aligned} \delta p_2 &= \delta p_1 - G \cdot \delta u_1 = \delta p - G \cdot \delta u - G \cdot \delta u_1 \\ \delta u_2 &= H \delta p_2 \\ &\dots \\ \delta p_m &= \delta p - G \cdot (\delta u + \delta u_1 + \dots + \delta u_{m-1}) \\ \delta u_m &= H \delta p_m \end{aligned} \quad (12)$$

因此

$$\begin{aligned} G \delta u_m &= G H \delta p_m \\ &= G H (\delta p_{m-1} - G \delta u_{m-1}) \\ &= G \delta u_{m-1} - G H G \delta u_{m-1} \\ &= (I - G H) G \delta u_{m-1} \\ &= R G G \delta u_{m-1} = R^m G \delta u \end{aligned} \quad (13)$$

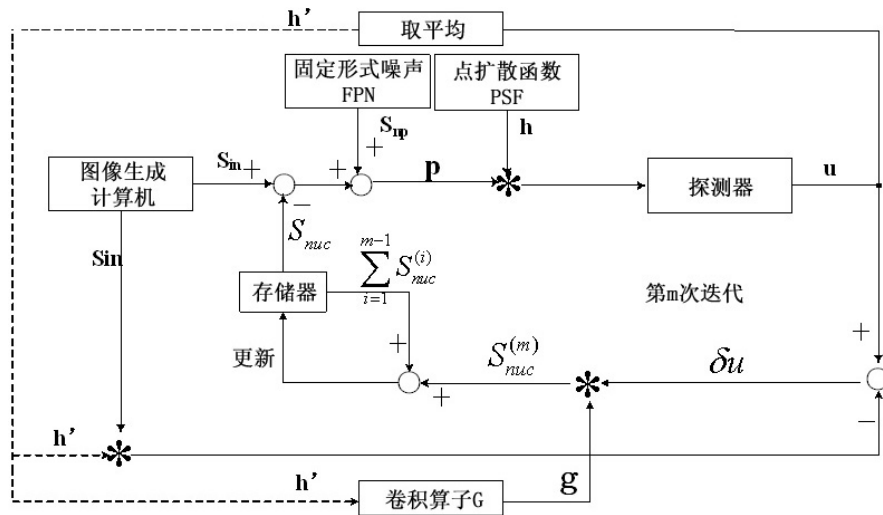


图 7 基于点扩散函数估计的非均匀性全屏测试方法的原理图

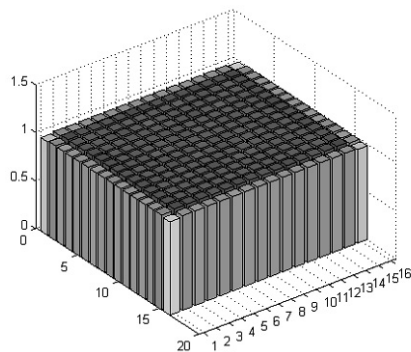
则

$$\begin{aligned} & \mathbf{G} \cdot (\delta \mathbf{u} + \delta \mathbf{u}_1 + \cdots + \delta \mathbf{u}_{m-1}) \\ &= (\mathbf{I} + \mathbf{R} + \cdots + \mathbf{R}^{m-1}) \mathbf{G} \delta \mathbf{u} \\ & \xrightarrow{m \rightarrow \infty} (\mathbf{I} - \mathbf{R})^{-1} \mathbf{G} \delta \mathbf{u} \\ &= (\mathbf{I} - \mathbf{R})^{-1} \mathbf{G} \mathbf{H} \delta \mathbf{p} = \delta \mathbf{p} \end{aligned} \quad (14)$$

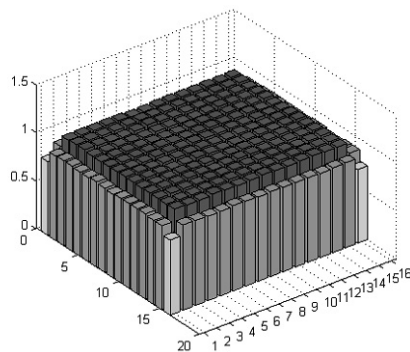
式中, 等式左侧即为存储器中的非均匀性反馈信息。这样, S_{nuc} 最终收敛于 S_{np} 。该方法的收敛性依赖于近似算子 $\mathbf{G}$ 与逆算子 $\mathbf{H}^{-1}$ 的逼近

度。因此, 通过控制 h' 估计误差可以调节该方法的收敛性。

采用上述方法进行了非均匀性测试。图 8 所示为 $\sigma = 0.50$ 且估计误差为 3% 时, 经过 3 次迭代后得到的投射图像和探测图像。与图 5 相比, 图 8 中的边缘效应得到了很大的改善。这里应当指出, 当点扩散函数存在估计误差时, 残余非均匀性主要是由于边缘效应造成的。



(a) 投射图像



(b) 探测图像

图 8 测试结果

图 9 所示为不同 σ 值时的仿真结果。与原方法相比, 该方法的收敛性更强。尤其是当平滑因子 σ 变大时, 该方法体现出更好的收敛性。

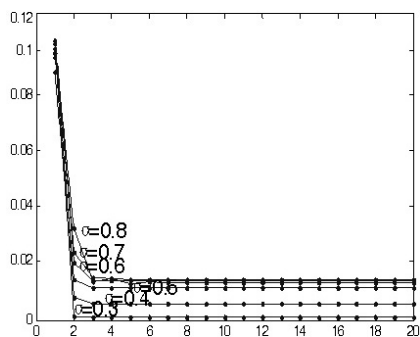


图 9 不同 σ 值时全屏测试方法的收敛性比较

4 结论

非均匀性信息测量是影响电阻阵列非均匀性校正精度的关键环节。随着电阻阵列规模的不断扩大, 稀疏网格测试方法越来越显示出劣势, 而全屏测试方法则不受电阻阵列规模的影响, 并且能够快速得出电阻阵列的非均匀性信息。更重要的是, 在低压驱动的情况下, 全屏测试方法能够体现出更大的优越性。本文研究的

基于点扩散函数估计的全屏测试方法可以减少边缘效应的影响, 并且在平滑因子 σ 变大时可以体现出更好的收敛性。

在对全屏测试方法进行研究时, 假设像元映射比为 1:1 且像元之间实现了精确配准。当不满足上述假设即映射比不为 1:1 或者像元之间没有实现精确配准时, 应该如何处理问题将是下一步工作的重点。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Williams O M. Search for Optimal Infrared Projector Non-uniformity Correction Procedures [C]. SPIE, 1999, 3697: 352-365.
- [3] 苏德伦, 张金生, 廖守亿. 电阻阵列非均匀性测试 [J]. 红外技术, 2010, 32(6): 345-352.
- [4] Świerkowski L, Williams O M. Search for Optimal Infrared Projector Non-uniformity Correction Procedures II [C]. SPIE, 2000, 4027: 214-225.
- [5] Joyce R A, Świerkowski L, Williams O M. Resistor Array Infrared Projector Non-uniformity Correction-search for Performance Improvement III [C]. SPIE, 2006, 6208: 1-9.