

文章编号: 1672-8785(2013)08-0011-05

IRFPA 非均匀性校正数学机理与仿真技术研究

殷世民¹ 阮祥淼² 洪新华³ 陈真诚¹

(1. 桂林电子科技大学生命与环境科学学院, 广西 桂林 541004;

2. 国家电网河南信阳供电公司, 河南 信阳 464000;

3. 河南科技学院基础部, 河南 新乡 453003)

摘 要: 针对红外成像系统的实际工程应用, 阐述了红外焦平面阵列 (Infrared Focal Plane Array, IRFPA) 非均匀性校正辐射定标的基本原理, 推导出了红外焦平面阵列非均匀性校正属于函数插值或拟合的数学机理, 给出了适于工程应用的相关非均匀性校正算法。同时, 为了克服实际工作中研究设备不足等条件的限制, 详细研究了红外焦平面阵列非均匀性校正的仿真技术, 给出了有效的仿真算法。该仿真技术能够有效地满足实际工程中对非均匀性校正算法的验证与评估要求。

关键词: 红外焦平面阵列; 非均匀性校正; 辐射定标; 数学机理; 仿真技术

中图分类号: TN215

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.08.03

Research on Mathematic Mechanism and Simulation Technique for Nonuniformity Correction of IRFPA

YIN Shi-min¹, RUAN Xiang-miao², HONG Xin-hua³, CHEN Zhen-cheng¹

(1. School of Life and Environmental Sciences, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China; 2. Xinyang Branch, State Grid Corporation of China, Xinyang 464000, China; 3. Department of Basic Sciences, Henan Institute of Sciences and Technology, Xinxiang 453003, China)

Abstract: According to the practical project application of an infrared imaging system, the basic radiation calibration principle for nonuniformity correction of an Infrared Focal Plane Array (IRFPA) is presented. The mathematic mechanism in which the nonuniformity correction of an IRFPA belongs to function interpolation or fitting is derived. A nonuniformity correction algorithm suitable for project application is given. Meanwhile, to overcome the limitation of device shortages in the practical research work, the simulation technique for nonuniformity correction of an IRFPA is studied in detail and an effective simulation algorithm is given. The simulation technique can meet the validation and evaluation requirements of a nonuniformity correction algorithm in practical projects.

Key words: infrared focal plane array; nonuniformity correction; radiation calibration; mathematic mechanism; simulation technique

收稿日期: 2013-06-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61265006)

作者简介: 殷世民 (1968-), 男, 河南信阳人, 研究员, 博士, 主要从事光电成像与信号处理研究。

E-mail: hawk_ysm@163.com

0 引言

红外焦平面阵列器件非均匀性^[1]定义为在某一均匀辐射照射下 IRFPA 中各探测单元响应输出的不一致性。它在器件成像时表现为图像中的固定图案噪声,会对目标图像形成严重的干扰,导致红外成像系统的温度分辨率、灵敏度等性能下降,严重时会使红外成像系统不能满足实际使用要求。在干涉式红外成像光谱仪系统中,由于复原光谱对噪声的敏感性,当红外探测器的非均匀性达到 5% 时,干涉图的相对误差会达到 2.6%,由此引起的复原光谱误差将高达 20%^[2](见表 1)。

表 1 探测器非均匀性对复原光谱的影响

探测器 非均匀性 (%)	干涉图 相对误差 (%)	复原光谱 相对误差 (%)
1.08	0.54	2.83
2.17	1.08	6.12
3.25	1.66	10.6
5.14	2.61	19.8

目前,国外的高性能红外焦平面阵列器件的非均匀性可做到小于 5%^[3],而国产器件的非均匀性通常都在 15% 以上。因此,在实际工程使用中,通常都要对由红外焦平面阵列组成的红外成像系统进行相应的非均匀性校正处理^[4]。

IRFPA 非均匀性校正主要有基于场景^[5]和基于辐射源定标两类算法。基于场景的校正算法由于校正精度低、算法复杂、计算速度慢等原因在工程上一直未能得到有效应用。在实际工程中,对 IRFPA 非均匀性的校正主要是采用辐射源定标算法进行的。

另外,由于 IRFPA 器件价格昂贵,一般的研究机构通常很少利用实际的红外成像系统来开展 IRFPA 非均匀性校正技术的研究。最好的办法是采用仿真技术来评估校正算法的性能。为此,本文在阐述 IRFPA 非均匀性校正辐射定标原理的基础上,推导出了 IRFPA 非均匀性校正的数学机理,给出了相应的适于工程应用的典型校正算法。同时,详细研究了 IRFPA 非均匀

性校正的仿真技术,给出了有效的仿真算法,满足了实际工程中对非均匀性校正算法的验证与评估要求。

1 IRFPA 非均匀性辐射定标

1.1 辐射定标原理

IRFPA 的辐射定标原理如图 1 所示。根据 IRFPA 响应的动态范围,预先利用黑体等均匀辐射源照射 IRFPA 器件,IRFPA 输出的模拟视频信号通过 A/D 被转换为定标图像的数字图像信号,然后被存储起来。之后在后续的数据处理系统中,人们便可利用这些定标图像来校正 IRFPA 的非均匀性。

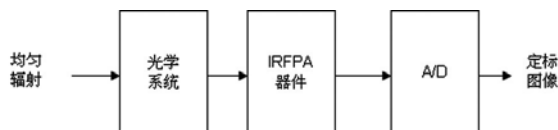


图 1 IRFPA 辐射定标原理

由 IRFPA 组成的一般红外成像系统,由于输入的是光学图像,输出的是红外数字图像,对 IRFPA 的定标可以在整个系统组装完成之后进行。这样的定标方式可以校正由 IRFPA、光学系统及电路系统等引起的整个系统的非均匀性。

而对于由 IRFPA 组成的干涉式红外成像光谱仪系统,即便系统输入的是均匀的辐射信号,由于光谱仪特殊的结构,系统 A/D 输出的是明暗相间的干涉条纹图像。因而对于干涉式红外成像光谱仪系统,IRFPA 的定标必须在系统组装之前单独进行。之后在后续的光谱仪数据处理系统中再完成对 IRFPA 非均匀性的校正。

1.2 IRFPA 非均匀性的计算

通过对 IRFPA 非均匀性的辐射定标,可以计算 IRFPA 的非均匀性。即在 IRFPA 响应的动态范围内,利用黑体在 K 个不同温度下的均匀辐射作为系统输入,系统采集并存储各不同温度下的输出作为定标图像,并以此计算 IRFPA 的非均匀性。

设 IRFPA 为 $M \times N$ 的阵列,它在某个均匀辐照度 φ 下输出的图像为 $S_{ij}(\varphi)_{j=1,2,\dots,N}^{i=1,2,\dots,M}$,则实际

测量的 IRFPA 非均匀性为

$$U = \frac{1}{\bar{S}} \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [S_{ij}(\varphi) - \bar{S}]^2} \quad (1)$$

式中

$$\bar{S} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N S_{ij}(\varphi) \quad (2)$$

2 IRFPA 非均匀性校正研究

2.1 IRFPA 非均匀性校正模型

IRFPA 的非均匀性是由于各探测单元响应不一致^[6]引起的,如图 2 所示。

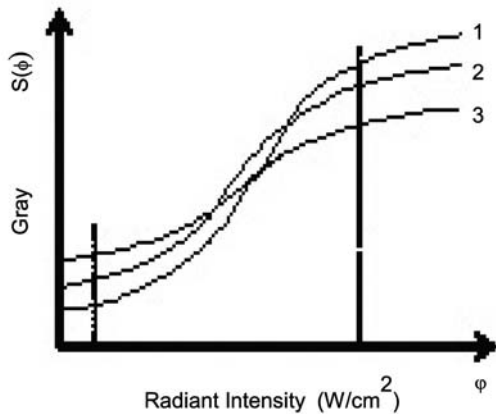


图 2 IRFPA 特性响应曲线

图 2 为 IRFPA 的三个探测单元的响应特性曲线。各个探测单元对相同输入信号的响应不同,导致了 IRFPA 的非均匀性。对 IRFPA 的非均匀性校正就是对其各个探测单元的响应特性曲线进行修正,使得所有探测单元的响应曲线都趋于一致。

如图 3 所示,可以将 IRFPA 所有探测单元的平均响应特性曲线作为归一化曲线来校正 IRFPA 的非均匀性。

图 3 中的实线为 IRFPA 的第 (i,j) 个探测单元的响应特性曲线,虚线为 IRFPA 所有探测单元的平均响应特性曲线。将 IRFPA 的平均响应特性曲线作为归一化曲线,即可校正 IRFPA 的非均匀性。

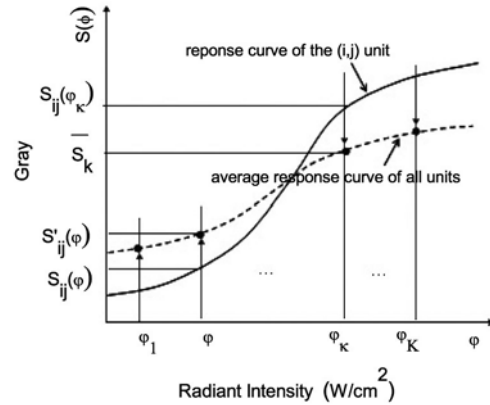


图 3 IRFPA 非均匀性校正原理

设 IRFPA 在 K 个不同的均匀辐照度 $\varphi_k (k = 1, 2, \dots, K)$ 下输出的定标图像分别为 $S_{ij}(\varphi)_{j=1,2,\dots,N}^{i=1,2,\dots,M}$, 对 K 副定标图像分别求平均得

$$\bar{S}_k = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N S_{ij}(\varphi_k), k = 1 \sim K \quad (3)$$

根据图 3, 校正过程为将 $S_{ij}(\varphi_k)$ 映射为 $\bar{S}_k (k = 1, 2, \dots, K)$ 的过程, 亦即要寻找在任意辐照度 φ 下第 (i,j) 个探测单元的输出值 $S_{ij}(\varphi)$ 与其校正值 $S'_{ij}(\varphi)$ 之间的函数映射关系 f :

$$S'_{ij}(\varphi) = f(S_{ij}(\varphi)) \quad (4)$$

满足

$$\bar{S}_k = f(S_{ij}(\varphi_k)), k = 1, 2, \dots, K \quad (5)$$

求解满足式 (4)、(5) 的函数映射关系 f 属于函数的插值或拟合问题^[7], 这就是 IRFPA 非均匀性校正的数学机理。由于 IRFPA 非均匀性校正的工程需要, 所采用的校正算法应绝对收敛且计算量较小。

2.2 算法实现

2.2.1 两点插值校正算法

在 IRFPA 响应的动态范围内, 选定两个辐照度 φ_1 和 φ_2 作为校正定标点, 对 IRFPA 输出的定标图像 $S_{ij}(\varphi_1)$ 与 $S_{ij}(\varphi_2)$ 分别求平均, 得

$$\bar{S}_1 = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N S_{ij}(\varphi_1) \quad (6)$$

$$\bar{S}_2 = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N S_{ij}(\varphi_2) \quad (7)$$

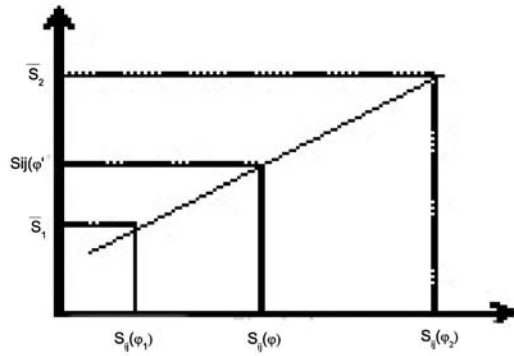


图 4 两点插值校正原理

如图 4 所示, 如果以 $(S_{ij}(\varphi_1), \bar{S}_1)$ 与 $(S_{ij}(\varphi_2), \bar{S}_2)$ 确定的直线作为第 (i,j) 个探测单元的归一化校正曲线, 则在任意辐照度 φ 下, 第 (i,j) 个探测单元的输出值 $S_{ij}(\varphi)$ 与其校正值 $S'_{ij}(\varphi)$ 之间的函数关系可通过线性插值得到:

$$S'_{ij} = K_{ij}S_{ij}(\varphi) + Q_{ij}, \quad \begin{matrix} i=1 \sim M \\ j=1 \sim N \end{matrix} \quad (8)$$

式中

$$K_{ij} = \frac{\bar{S}_2 - \bar{S}_1}{S_{ij}(\varphi_2) - S_{ij}(\varphi_1)} \quad (9)$$

$$Q_{ij} = \frac{S_{ij}(\varphi_2)\bar{S}_1 - S_{ij}(\varphi_1)\bar{S}_2}{S_{ij}(\varphi_2) - S_{ij}(\varphi_1)} \quad (10)$$

K_{ij} 为 IRFPA 响应的斜率, Q_{ij} 为其响应度的截距或暗电流。二点校正算法计算量小, 适用于 IRFPA 响应特性为线性的情况。

2.2.2 多点校正算法

如果 IRFPA 响应特性为非线性, 采用两点插值算法会带来较大的误差。根据式 (4)、(5), 此时对 IRFPA 非均匀性校正可采用多点校正算法, 通常可采用多点分段线性插值算法、三次样条插值算法及最小二乘拟合算法 [8] 等。

多点校正算法的校正精度高, 但计算量较大, 特别适用于 IRFPA 响应特性非线性 [9] 比较大的情况。

目前, 由于技术的进步, IRFPA 响应特性的线性度已达 95% 以上。因此工程上对 IRFPA 的非均匀性校正主要是采用两点插值校正算法进行的。

3 IRFPA 非均匀性校正仿真研究

3.1 仿真模型

由于 IRFPA 器件价格昂贵及科研条件限制等原因, 一般的研究单位通常很少利用实际的红外成像系统来开展 IRFPA 非均匀性校正技术的研究。因此, 最好的办法是采用仿真技术来研究和评估 IRFPA 非均匀性校正算法。

目前 IRFPA 响应特性的线性度都非常高, 一般采用线性响应模型开展 IRFPA 非均匀性校正的仿真技术研究, 其原理如图 5 所示。根据 IRFPA 的响应特性曲线的逆变换 g , 由标准图像 Y 生成 IRFPA 的输入图像 X , 再根据模拟的 IRFPA 的非均匀性响应特性曲线 h 产生 IRFPA 输出的非均匀性图像 S , 同时由输入的均匀图像 X_1 、 X_2 利用响应特性曲线 h 产生定标图像 S_1 、 S_2 , 最后利用非均匀性校正算法得到校正输出图像 S' 。具体计算步骤如下:

(1) 给定 a 、 b , 设 IRFPA 响应为 $f: y=ax+b$, 其中 $a > 1$ 模拟 IRFPA 的放大倍数, $b > 0$ 模拟 IRFPA 的暗电流;

(2) 给定标准图像 Y , 若其灰度值不在 $[b, 256]$ 范围内, 则对其进行标准化, 使得 $b \leq Y_{ij} \leq 256$;

(3) 根据 $g: x=(y-b)/a$, 由标准图像 Y 求 IRFPA 的输入图像 X , $X_{ij} \geq 0$;

(4) $A = a + r_a \times \text{rand}(M, N) - r_a/2$, $B = b + r_b \times \text{rand}(M, N) - r_b/2$, 利用 $h: y=Ax+B$ 模拟 IRFPA 的非均匀性响应特性, r_a 、 r_b 用于调节非均匀性的大小。

(5) 根据 $h: y=Ax+B$, 由输入图像 X 求 IRFPA 输出的非均匀性图像 S ;

(6) 给定均匀图像 X_1 、 X_2 , 根据 $h: y=Ax+B$ 得到 IRFPA 输出的定标图像 S_1 、 S_2 ;

(7) 由非均匀性图像 S 、定标图像 S_1 、 S_2 , 利用式 (6) ~ (10) 求得校正图像 S' ;

(8) IRFPA 校正前、后的非均匀性为

$$U_{-}S = \frac{1}{Y} \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [S_{ij} - Y]^2} \quad (11)$$

$$U_{-}S' = \frac{1}{Y} \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [S'_{ij} - Y]^2} \quad (12)$$

式中

$$\bar{Y} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N Y_{ij} \quad (13)$$

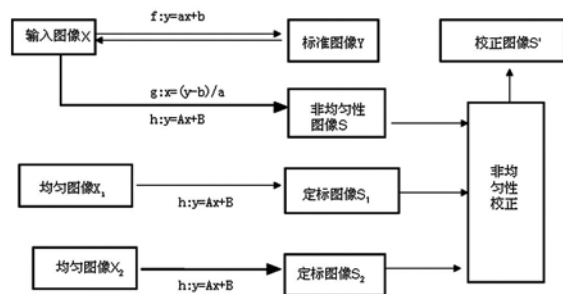
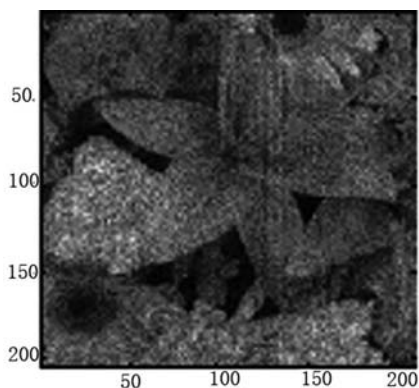


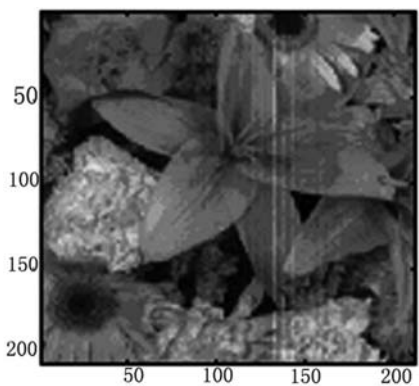
图 5 IRFPA 非均匀性校正仿真原理

3.2 仿真结果

根据上面的仿真步骤, 得到的仿真结果如图 6 所示。



(a) 非均匀性图像 (10.0068%)



(b) 校正图像 (0.05425%)

图 6 IRFPA 非均匀性校正仿真结果

表 2 为 IRFPA 校正前后的非均匀性大小。从表 2 中可以看出, 对具有线性响应特性的 IRFPA, 两点插值校正算法可显著降低 IRFPA

的非均匀性, 能够有效满足一般红外成像系统及干涉式红外成像光谱仪系统等对 IRFPA 的非均匀性校正要求。

表 2 IRFPA 非均匀性大小

校正前 非均匀性 (%)	校正后 非均匀性 (%)	非均匀性 降低倍数
5.0701	0.02749	184.4324
10.0068	0.05425	184.4324
15.0101	0.08138	184.4324
20.0135	0.10851	184.4324

4 结论

本文阐述了 IRFPA 非均匀性校正辐射定标的基本原理, 导出了 IRFPA 非均匀性校正属于函数插值或拟合的数学机理, 给出了相关的适于工程应用的非均匀性校正算法。针对一般研究单位因科研条件限制等原因不能利用实际的红外成像系统开展 IRFPA 非均匀性校正研究的需要, 详细给出了 IRFPA 非均匀性校正的仿真原理及步骤, 可有效满足实际工程中对非均匀性校正算法的验证与评估。对响应特性线性度非常好的 IRFPA 器件, 两点插值校正算法不仅计算量小、速度快, 而且校正精度高, 能够有效满足工程上对 IRFPA 非均匀性的校正需要。如果 IRFPA 响应特性的非线性比较突出, 根据 IRFPA 非均匀性校正数学机理, 可采用多点校正算法来满足工程上对校正精度的需要。

参考文献

- [1] Gross W, Hierl T, Schulz M. Correctability and Long-term Stability of Infrared Focal Plane Arrays [J]. *Optical Engineering*, 1999, **38**(5): 862–865.
- [2] 殷世民, 计忠瑛, 崔燕, 等. 干涉成像光谱仪 CCD 象元响应非均匀性校正研究 [J]. *光子学报*, 2009, **28**(4): 880–884.
- [3] Sofradir. All Products [EB/OL]. <http://www.sofradir.com/pure-infrared/fr/19/all-products.html>, 2012.
- [4] Daniel R, Silva D, Eduardo A B, et al. Recursive Algorithms for Bias and Gain Nonuniformity Correction in Infrared Videos [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, **21**(12): 4758–4769.

(下转第 46 页)