

文章编号:1001-9014(2004)04-0251-06

## 一种考虑红外焦平面器件非线性响应的非均匀性校正方法

石岩<sup>1</sup>, 张天序<sup>2</sup>, 李辉<sup>1</sup>, 曹治国<sup>2</sup>

(1. 华中科技大学 图像识别与人工智能研究所, 湖北 武汉 430074;

2. 华中科技大学 图像信息处理与智能控制教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**针对红外焦平面阵列探测元响应具有非线性特征,提出了一种易于硬件电路实现的、考虑探测元响应非线性的非均匀性校正方法。通过理论分析和仿真实验,结果表明该方法校正参数少,易于硬件实现并且校正性能优于多点校正法和基于多项式拟合的校正方法。

**关键词:**红外焦平面阵列;非均匀性校正;非线性响应;最佳平方逼近

**中图分类号:**TN215 **文献标识码:**A

## NEW APPROACH TO NONUNIFORMITY CORRECTION OF IRFPA WITH NONLINEAR RESPONSE

SHI Yan<sup>1</sup>, ZHANG Tian-Xu<sup>2</sup>, LI Hui<sup>1</sup>, CAO Zhi-Guo<sup>1</sup>

(1. Institute for Pattern Recognition and Artificial Intelligence, HUST, Wuhan 430074, China;

2. State Key Laboratory for Image Processing and Intelligent Control, HUST, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Aiming at the nonlinearity of photoresponse characteristic in infrared focal plane arrays, a new approach to non-uniformity correction in IRFPA was proposed, which is simple and easy to implement by hardware circuit. The theoretical analysis and comparisons of simulation results show its performance is more perfect than that of the piecewise linear algorithm and the polynomial fitting algorithm, and only a few correction factors are needed.

**Key words:** infrared focal plane arrays; nonuniformity correction; nonlinear response; least square approximation

### 引言

凝视型红外焦平面成像系统完全取消了光机扫描,具有灵敏度高、分辨率高、体积小、结构紧凑等优点,是目前红外成像系统的发展方向。但由于受许多无法控制的因素和工艺水平的限制,凝视红外焦平面阵列(IRFPA)的每个探测元的响应度不可能完全一致,在图像上表现为空间噪声或固定图像噪声,这种非均匀性导致的空域噪声通常远远大于时域噪声<sup>[1]</sup>。因此,为充分利用探测器的性能,必须进行非均匀性校正。

目前国内外 IRFPA 的非均匀性校正方法可以分为两大类:第一类为基于标定(calibration based)

的校正算法,该类方法假定探测元的响应特性是非时变的(在一段时间内),通过事先利用定标辐射源(通常为黑体辐射源)对 IRFPA 各探测元的响应进行标定,来实现非均匀性校正,主要包括两点校正法、多点校正法<sup>[1,2]</sup>和基于多项式拟合的算法<sup>[3,4]</sup>。第二类为基于景象(scene based)的校正算法,该类方法利用序列图像来估计 IRFPA 的校正系数<sup>[5-7]</sup>或者直接估计校正结果<sup>[5,8]</sup>,尽管该类校正方法目前得到了广泛的研究和发展,但在实际的红外成像系统中(特别是需要硬件电路实时校正时),基于标定的算法仍然是 IRFPA 非均匀性校正的主要方法。

本文在考虑了 IRFPA 探测元响应非线性的基

收稿日期:2003-04-16,修回日期:2004-03-18

Received date: 2003-04-16, revised date: 2004-03-18

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(60135020);国防科技预研跨行业综合技术资助项目(413010701)

作者简介:石岩(1975-),男,湖南衡阳人,博士研究生,主要研究方向为图像处理、图像并行处理系统等。

基础上,提出了一种易于硬件电路实现的基于标定的非均匀校正方法.该方法克服了多点校正法存储参数过多等问题,同时推导的校正公式易于硬件电路实时实现.通过理论分析和仿真实验表明,本文方法得到的校正公式在校正性能上明显好于分段线性校正,也优于基于多项式拟合的校正方法,并且每个探测元需要的校正参数少.

## 1 红外焦平面非均匀性校正公式

设 IRFPA 在有效工作范围内,即输入辐照度  $\phi \in [\phi_{\min}, \phi_{\max}]$ . 其第  $i$  个探测元的输出信号与输入辐照度间关系为

$$Y_i = f_i(\phi_i). \quad (1)$$

式(1)中  $\phi_i$  为入射到第  $i$  个探测元的辐照度,  $Y_i$  为第  $i$  个探测元的输出信号.  $f_i: \phi \rightarrow Y, (\phi \in [\phi_{\min}, \phi_{\max}])$  为第  $i$  个探测元的响应函数. 由于各个探测元的响应函数  $f_i$  存在着差异. 正是这种差异导致了 IRFPA 对于均匀辐照度的输入产生非均匀输出. 根据 IRFPA 探测元在工作范围内的响应特性(如图 1 所示), 响应函数具有下述性质.

性质: IRFPA 探测元其响应函数  $f_i$  是输入辐照度  $\phi$  的单调递增函数.

由上述性质可知存在反函数  $f_i^{-1}: Y \rightarrow \phi, (Y \in [Y_{\min}, Y_{\max}])$ . 设 IRFPA 所有探测元的平均响应函数为  $\bar{f}$ , 则经过非均匀性校正变换  $G: Y \rightarrow Y'$  ( $Y' \in [Y_{\min}, Y_{\max}]$ ) 后, 第  $i$  个探测元的输出信号  $Y'_i$  为

$$Y'_i = G_i(Y_i) = \bar{f}(f_i^{-1}(Y_i)) = \bar{f}(\phi_i). \quad (2)$$

经过非均匀性校正后的任意探测元  $i$ , 对于均匀辐照度输入  $\phi$  其输出为  $\bar{f}(\phi)$ , 这样从而消除了由于探测元响应函数的差异所导致的非均匀性.

两点定标校正算法认为探测元  $i$  在输入达到饱和之前, 其输出信号与输入辐照度为线性时不变关系, 即响应函数为

$$f_i: g_i \phi + o_i. \quad (3)$$

其中,  $g_i$  为增益系数,  $o_i$  为偏移系数. 根据公式(2)和式(3), 可以推出两点法的非均匀性校正变换  $G$  也是  $Y$  的线性函数, 即:

$$Y'_i = G_i(Y_i) = \bar{f}(f_i^{-1}(Y_i)) = \langle g_i \rangle * (Y_i - o_i) / g_i + \langle o_i \rangle. \quad (4)$$

其中,  $\langle g_i \rangle$  和  $\langle o_i \rangle$  分别为整个 IRFPA 的平均增益系数和平均偏移系数. 上式中各探测元的  $g_i$  和  $o_i$  以及整个 IRFPA 的  $\langle g_i \rangle$  和  $\langle o_i \rangle$  参数, 通过选定

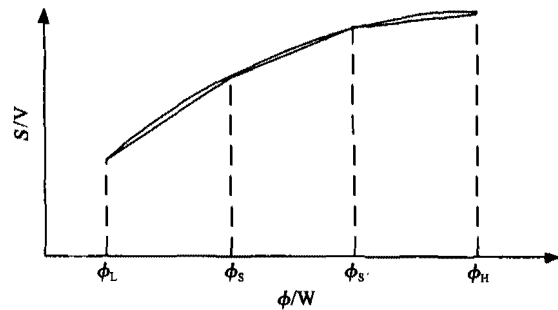


图 1 IRFPA 探测元非线性响应曲线及多点定标分段线性校正的示意图

Fig. 1 Graphic description of the nonlinear response of IRFPA detector and the piecewise linear correction scheme

两个定标点  $\phi_H$  和  $\phi_L$  ( $\phi_L < \phi_H$ , 且  $\phi_L, \phi_H \in [\phi_{\min}, \phi_{\max}]$ ), 测得 IRFPA 各探测元在两个定标点的响应输出  $Y_{iL}$  和  $Y_{iH}$ , 从而最终得到.

而实际探测元的响应度与辐照度输入通常呈非线性关系, 即式(3)中的增益系数  $g_i$  是随输入  $\phi$  的改变而变化的. IRFPA 的工作范围越宽, 其响应的线性度越差. 为了减小校正误差, 目前通常采用的措施是使用分段线性校正算法(多点定标校正法). 即将 IRFPA 的工作范围  $[\phi_{\min}, \phi_{\max}]$  分为若干区间, 在每个区间内采用两点定标的线性校正算法. 探测元的实际响应曲线和多点定标分段线性校正的示意图如图 1 所示. 但在硬件实现时多点定标校正法存在着需要存储的参数过多和校正区间选择这两个问题使得处理电路的设计复杂化. 为了解决这些问题, IRFPA 的非均匀性校正应该从探测元响应的非均匀性和非线性两方面进行综合考虑.

## 2 考虑探测元响应非线性的易于硬件实现的非均匀性校正方法

由于探测元响应函数具有非线性, 因此不能采用式(3)线性关系来描述探测元实际响应函数  $f: \phi \rightarrow Y, (\phi \in [\phi_{\min}, \phi_{\max}])$ . 目前各种文献中一般认为响应曲线为抛物线型<sup>[1-3]</sup>, 如图 1 所示. 为求出探测元响应曲线  $f$  的近似表达式, 通过在多个定标点(大于 2)进行多次测量, 对于每个探测元  $i$  都得到  $M$  组实验数据  $(\phi_{ij}, Y_{ij}), j = 1, 2, \dots, M$ . 选择适当的函数类型, 对测得的  $M$  组  $(\phi_{ij}, Y_{ij})$  进行最小二乘拟合, 便可得到各个探测元的近似响应函数  $h_i(\phi), (\phi \in [\phi_{\min}, \phi_{\max}])$ . 由于实际响应曲线呈抛物线型, 同时考虑到需要方便求反函数, 近似响应函数  $h_i(\phi)$  可以用  $\phi$  的二次多项式来表示, 即:

$$f_i(\phi) \approx h_i(\phi) = \sum_{k=0}^2 a_{ik} * \phi^k. \quad (5)$$

对于 IRFPA 的平均响应曲线  $\bar{f}$ , 通过计算平均响应  $\langle Y_{ij} \rangle$  同样得到  $M$  组数据  $(\phi_{ij}, \langle Y_{ij} \rangle)$ , 用上述方法同样得到平均响应曲线  $\bar{f}$  的近似函数  $\bar{h}(\phi)$ ,

$$\bar{f}(\phi) \approx \bar{h}(\phi) = \sum_{k=0}^2 C_k * \phi^k. \quad (6)$$

由响应曲线  $f$  的单调递增性, 可知在整个定义域内其一阶导数为正. 近似函数  $h_i(\phi)$  也具有同样性质, 因此在  $\varphi \in [\phi_{\min}, \phi_{\max}]$  内  $h_i(\phi)$  的反函数为  $f_i^{-1}(\phi) \approx h_i^{-1}(\phi) =$

$$(-a_{i1} + \sqrt{a_{i1}^2 - 4 * a_{i2} * (a_{i0} - Y_i)}) / (2 * a_{i2}). \quad (7)$$

由式(6)、式(7)和式(2), 得到校正公式为

$$\begin{aligned} Y_i^c &= G_i(Y_i) = \bar{h}(h_i^{-1}(Y_i)) \\ &= \frac{c_2}{a_{i2}} * Y_i + \frac{a_{i1}^2 c_2 - 2a_{i2} a_{i0} c_2 - a_{i2} a_{i1} c_1 + 2a_{i2}^2 c_0}{2a_{i2}^2} \\ &+ \frac{(a_{i2} c_1 - a_{i1} c_2) * \sqrt{a_{i1}^2 - 4a_{i2}(a_{i0} - Y_i)}}{2a_{i2}^2}. \end{aligned} \quad (8)$$

从式(8)可以看出, 由于探测元响应函数具有非线性特征, 因此要在整个工作范围内要达到理想校正, 其相应的校正公式也是非线性的. 而在式(8)中由于存在除法和开方运算, 同时公式形式也很复杂, 不利于实际使用, 尤其是不利于算法的硬件电路实现. 从硬件实现的角度考虑, 非均匀性校正变换后的输出  $Y^c$  最好能用输入  $Y$  的多项式表示, 即:

$$Y^c = \sum_{k=0}^T b_k * Y^k. \quad (9)$$

对于所有符合式(9)类型的校正算法, 通过若干乘法器和加法器的组合便可方便地用硬件电路实现. 尤其是用 FPGA 实现时, 由于有乘法器、加法器模块可以直接调用, 因而易于实现.

为了便于校正算法的实际使用以及硬件电路实现, 对于式(8)可以按照一定准则, 选择一个属于式(9)类型的函数  $\tilde{G}(Y)$  来近似. 为了使 IRFPA 在整个工作范围内具有尽可能低的非均匀性, 近似函数  $\tilde{G}(Y)$  选择的准则采用最佳平方逼近. 即在  $Y \in [Y_{\min}, Y_{\max}]$  范围内选取  $\tilde{G}(Y)$  使

$$\begin{aligned} I(b_0, b_1, \dots, b_T) &= \int_{Y_{\min}}^{Y_{\max}} [G(Y) - \tilde{G}(Y)]^2 dY \\ &= \int_{Y_{\min}}^{Y_{\max}} [G(Y) - \sum_{k=0}^T b_k * Y^k]^2 dY, \end{aligned} \quad (10)$$

取得最小值. 在极值点  $(b_0, b_1, \dots, b_T)$ , 偏导数为零:



图 2(a) 实验所用的原始定标点温度图像  
Fig. 2(a) Infrared thermal image at the eight calibration temperature points before nonuniformity correction



图 2(b) 用两点校正法校正后的温度图像  
Fig. 2(b) Infrared thermal image after two-point correction



图 2(c) 多项式拟合得到的 1 阶校正处理后的温度图像  
Fig. 2(c) Infrared thermal image after the first order polynomial fitting correction



图 2(d) 最佳平方逼近得到的 1 阶校正处理后的温度图像  
Fig. 2(d) Infrared thermal image after the first order least square approximation correction



图 2(e) 分段(两个区间)多点校正法处理后的温度图像  
Fig. 2(e) Infrared thermal image after piecewise-linear correction(2 intervals)



图 2(f) 多项式拟合得到的 2 阶校正处理后的温度图像  
Fig. 2(f) Infrared thermal image after the second order polynomial fitting correction



图 2(g) 最佳平方逼近得到的 2 阶校正处理后的温度图像  
Fig. 2(g) Infrared thermal image after the second order least square approximation correction

$\frac{\partial I}{\partial b_j} = 0, (j=0, 1, \dots, T)$ , 即

$$\int_{Y_{\min}}^{Y_{\max}} [G(Y) - \sum_{k=0}^T b_k * Y^k] * Y^j dY = 0. \quad (11)$$

记函数  $g(x), h(x) \in C[a, b]$  在  $[a, b]$  上的内积为  $\langle g, h \rangle = \int_a^b g(x) * h(x) dx$ , 则式(11)亦即:

$$\sum_{k=0}^T \langle Y^k, Y^j \rangle * b_k = \langle Y^j, G \rangle, (j=0, 1, \dots, T). \quad (12)$$

由于系数矩阵可逆, 方程组(12)存在唯一解, 从而得到函数  $G(Y)$  在  $[Y_{\min}, Y_{\max}]$  范围内的最佳平方逼近函数  $\tilde{G}(Y)$ . 令  $\delta(Y) = G(Y) - \tilde{G}(Y)$ , 由式(11)可得

$$\langle \delta(Y), \tilde{G}(Y) \rangle = 0. \quad (13)$$

由式(13)可知,  $\tilde{G}(Y)$  是  $G(Y)$  在函数空间  $\Psi = \text{Span}\{Y^0, Y^1, \dots, Y^T\} \subset R[Y_{\min}, Y_{\max}]$  内的投影, 因此  $\tilde{G}(Y)$  是  $Y$  的所有  $T$  次多项式函数中对  $G(Y)$  的最佳估计. 对 IRFPA 每个探测元的非线性校正式(8), 用上述方法求其最佳平方逼近的  $T$  次多项式函数  $\tilde{G}_i(Y)$ , 即求出各阶校正系数  $b_k$ . 保存各个探测元的各阶校正系数  $b_k$ , 利用校正公式(9)便可用软件进行校正或者用硬件电路进行实时校正.

### 3 软件仿真实验比较

通过软件仿真模拟未经非均匀校正的红外焦平面阵列各探测元的响应函数, 在多个定标点得到其非均匀响应图像数据. 对上述软件仿真的多点定标实验数据, 采用本文提出的基于最佳平方逼近的校正方法和常用的多点校正法<sup>[1]</sup>以及文献[3, 4]提出的基于多项式拟合的非均匀性校正算法, 分别进行非均匀性校正, 比较各自的校正性能. 软件仿真的多点定标图像数据生成的步骤如下:

1) 在辐照度  $\phi \in [\phi_{\min}, \phi_{\max}]$  范围内, 建立 IRFPA 关于辐照度的非线性的平均响应特性模型, 即建立  $\bar{f}(\phi)$  的模型. 不失一般性, 实验中  $\bar{f}(\phi)$  采用  $\phi$  的二次多项式函数.

2) 根据  $\bar{f}(\phi)$  的模型在一定的不均匀度下, 按正态分布随机地建立每个探测元的响应特性模型, 即建立  $f_i(\phi)$  模型.

3) 在定标点  $\phi_i (i=1, 2, \dots, M)$  利用步骤 2 得到的 IRFPA 各探测元响应函数, 生成各定标数据. 实验中定标点数  $M=8$ .

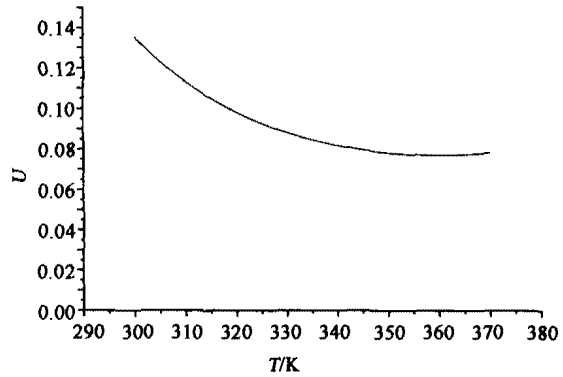


图3 校正前的非均匀性

Fig. 3 The nonuniformity of the simulated IRFPA before nonuniformity correction

对于定标图像, 用本文中所述的校正方法计算校正系数的步骤如下:

1) 对每个探测元  $i$  的响应以及 IRFPA 的平均响应, 利用  $M$  组定标实验数据  $(\phi_{ij}, Y_{ij}), j=1, 2, \dots, M$ , 采用  $\phi$  的二次多项式函数  $h_i$  和  $\bar{h}$  进行最小二乘拟合.

2) 对每个探测元  $i$  的校正公式(8), 采用函数的最佳平方逼近方法得到其  $T$  次多项式的最佳估计函数  $\tilde{G}(Y)$ . 亦即得到校正公式(9)中的各阶校正系数  $b_k (k=0, 1, \dots, T)$ , 用于后面的对比实验. 实验中分别取  $T$  为 1 和 2, 得到一次线性校正和二次非线性校正.

3 种校正方法的对比实验步骤如下:

1) 在辐照度  $\phi \in [\phi_{\min}, \phi_{\max}]$  范围内, 利用前面

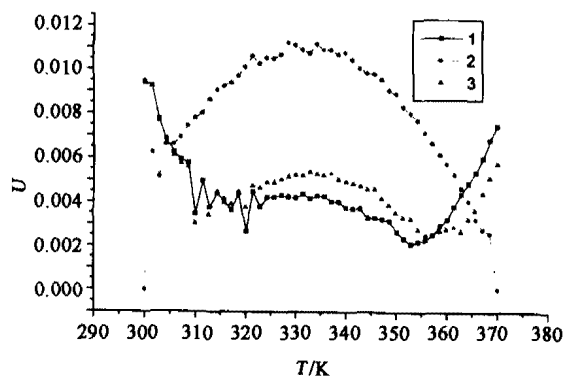


图4 几种1阶校正算法处理后的非均匀性(曲线1:最佳平方逼近的1阶校正结果, 曲线2:两点法的校正结果, 曲线3:多项式拟合的1阶校正结果)

Fig. 4 Comparison of nonuniformity after different first order correction algorithms (curve 1: after correction by the first order least square approximation algorithm, curve 2: after correction by two-point algorithm, curve 3: after correction by the first order polynomial fitting algorithm)

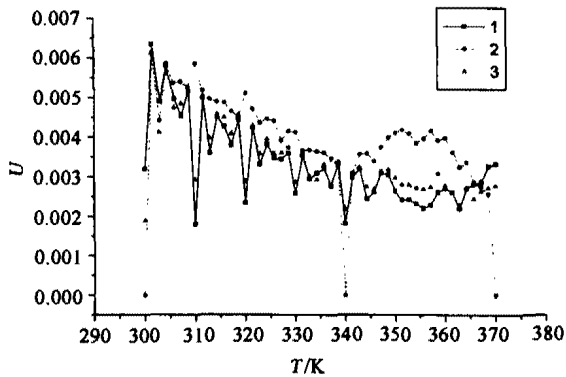


图5 多点法和两种2阶校正算法处理后的非均匀性(曲线1:最佳平方逼近的2阶校正结果,曲线2:多点法的校正结果,曲线3:多项式拟合的2阶校正结果)

Fig. 5 Comparison of nonuniformity after piecewise-linear correction and two different second order correction algorithms (curve 1: after correction by the second order least square approximation algorithm; curve 2: after correction by piecewise-linear algorithm; curve 3: after correction by the second order polynomial fitting algorithm)

得到的 IRFPA 各探测元响应函数, 仿真生成 IRFPA 对均匀辐照度输入的输出, 作为原始的未校正的图像。

2) 用3种方法得到的校正系数对原始图像进行校正。

3) 对校正前后的图像, 计算图像的非均匀性。非均匀性(Nonuniformity)定义为

$$U = \frac{1}{\langle Y \rangle} * \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [Y_i - \langle Y \rangle]^2}{N}} \quad (14)$$

为了更好地对各种校正方法校正前后的结果进行比较, 在探测元的输出响应模型中未考虑读出噪声的作用。需说明的是由于对仿真定标图像数据和测试图像数据进行了取整, 存在截断误差。

图2是各种算法的校正效果, 选用的实验温度图像为300、310、320...370K 8个温度点, 目标为定标黑体辐射源, 由斯蒂芬-玻尔兹曼定律计算得到辐射出射度作为 IRFPA 的入射辐照度。图2(a)为定标点温度图像。图2(b)~2(d)属于校正阶次为1阶的校正算法, 分别是两点校正法、基于多项式拟合得到的1阶校正算法和本文中提出的最佳平方逼近法(least square approximation correction)得到的1阶校正算法。图2(e)~图2(g)属于校正阶次为2阶的校正算法, 分别是(2个校正区间的)多点校正法、基于多项式拟合得到的2阶校正算法和本文中提出的最佳平方逼近法得到的2阶校正算法。

图3是根据实验中所用的 IRFPA 各探测元的

响应函数, 由公式(14)得到的该 IRFPA 在校正前的非均匀性曲线。图4是用3种1阶校正算法处理后的非均匀性曲线。其中曲线1是最佳平方逼近(least square approximation correction)的1阶校正后的结果, 曲线2是两点法校正后的结果, 曲线3是多项式拟合的1阶校正后的结果。图5是用多点法和两种2阶校正算法处理后的非均匀性曲线。其中曲线1是最佳平方逼近的2阶校正后的结果, 曲线2是多点法校正后的结果, 曲线3是多项式拟合的2阶校正后的结果。

表1是在定标黑体辐射源在[300K, 370K]之间等距选取500个测试点得到的各种算法的平均非均匀性。

从图2、图4和图5以及表1可以看出:

1) 由于红外焦平面探测元的响应特性具有非线性, 因此采用1阶校正其效果比多点法以及2阶校正要差。

2) 采用最佳平方逼近得到的1阶和2阶校正公式, 其校正结果在1阶和2阶中都是最佳的, 这从图5、6和表1中都可以看出。

3) 表1中可以得到, 采用最佳平方逼近得到的1阶校正公式, 其平均校正结果已接近分段线性校正法(多点法)的效果; 而最佳平方逼近得到的2阶校正公式, 则要好于多点法的效果。此外, 具有2个校正区间的多点法每个探测元需要5个校正参数, 而最佳平方逼近得到的1和2阶校正公式分别只需要2和3个校正参数。

## 4 结论

考虑到红外焦平面探测元的响应曲线具有非线性

表1 平均非均匀性比较

Table 1 Comparison of average nonuniformity

类别	平均非均匀性(%)	需存储的参数个数/探测元
未校正的原始图像	9.156	
两点法校正结果	0.825	2
最佳平方逼近的1阶校正后的结果	0.438	2
多项式拟合的1阶校正后的结果	0.46	2
分段(两区间)多点法校正结果	0.406	5
最佳平方逼近的2阶校正后的结果	0.34	3
多项式拟合的2阶校正后的结果	0.346	3

性的特征,本文提出利用定标实验数据对其响应曲线进行最小二乘拟合,从而得到其非线性的校正公式.从便于硬件电路(如 FPGA)实现的角度,本文提出了易于硬件实现的非均匀校正公式的函数形式.在这种函数空间内,对前面得到的非线性校正公式进行最佳平方逼近,从而得到最佳的校正公式.软件仿真实验结果表明,本文方法得到的校正公式在校正性能上明显好于分段线性校正,并且每个探测元需要的校正参数少;与基于多项式拟合的校正方法相比,本文方法也优于基于多项式拟合的校正方法.这是因为与基于多项式拟合得到的校正公式相比,本文方法推出的校正公式是理想解析校正公式的最佳估计.

### REFERENCES

- [1] Milton A F, Barone F R. Influence of nonuniformity on infrared focal plane array performance[J]. *Optical Engineering*, 1985, **24**(5): 855—862.
- [2] WANG Yu, CHEN Qian, YIN De-Kui, *et al.* Real-time nonuniformity correction technique for infrared image[J]. *Journal of Infrared Millimeter Wave* (王钰,陈钱,殷德奎,等.实时红外图像非均匀性校正技术研究. *红外与毫米波学报*), 1999, **18**(2): 151—155.
- [3] Schulz M, Caldwell L. Nonuniformity correction and correctability of infrared focal plane arrays[J]. *Infrared Physics & Technology*, 1995, **36**: 763—777.
- [4] Wang Ruizhong, Chen Peiyi, Tsien Peihsin. An improved nonuniformity correction algorithm for infrared focal plane arrays which is easy to implement[J]. *Infrared Physics & Technology*, 1998, **39**: 15—21.
- [5] Scribner D A, Sarkady K A, Kruer M R, *et al.* Adaptive Nonuniformity Correction for IR Focal Plane Arrays Using Neural Networks[C]. *Infrared Sensors, Detectors, Electronics, and Signal Processing, SPIE*, 1991, **1541**: 100—109.
- [6] Hardie R C, Hayat M M, Armstrong E, *et al.* Scene-based nonuniformity correction using video sequences and registration[J]. *Applied Optics*, 2000, **39**(8): 1241—1250.
- [7] JIANG Guang, LIU Shang-Qian. Adaptive nonuniformity correction of IRFPA [J]. *Journal of Infrared Millimeter Wave* (姜光,刘上乾.红外焦平面阵列非均匀性自适应校正算法研究. *红外与毫米波学报*), 2001, **20**(2): 93—96.
- [8] Harris J G, Chiang Y M. Nonuniformity correction of infrared image sequences using the constant-statistics constraint [J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 1999, **8**(8): 1148—1151.