

文章编号: 1672-8785(2011)03-0029-05

基于改进多项式拟合的红外焦平面 非均匀性校正方法

黄英东 安建波

(中国航天二院 25 所, 北京 100854)

摘 要: 两点法是基于定标数据的线性校正方法, 其动态范围窄且校正精度差, 在应用中难以完全克服探测器响应的非线性和随时间及环境变化带来的漂移的影响。在分析两点校正法的基础上, 提出了一种多项式拟合与单点校正相结合的改进算法以消除探测器的非均匀性, 解决了探测器系数随环境变化产生漂移的问题。

关键词: 红外焦平面阵列; 非均匀性校正; 改进多项式拟合; 最小二乘逼近

中图分类号: TN206 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2011.03.007

A Nonuniformity Correction Algorithm for IRFPA Based on Improved Polynomial Fitting

HUANG Ying-dong, AN Jian-bo

(Institute No.25 of the Second Academy of China Aerospace Science
& Industry Corp., Beijing 100854, China)

Abstract: The two-point algorithm is a linear correction method based on calibration data. Because of a narrow dynamic range and a poor accuracy, it is difficult for the algorithm to overcome the non-linearity and spatio-temporal drift of a detector in response. To remove the nonuniformity of the detector, a new algorithm which combines a polynomial fitting algorithm with a one-point algorithm is proposed after the two-point algorithm is analyzed. With this new algorithm, the variation of the coefficient of the detector with the environment is removed.

Key words: IRFPA; nonuniformity correction; improved polynomial fitting; least square approximation

1 引言

在红外成像系统中, 红外焦平面阵列器件有着广泛的应用前景。但由于材料和工艺方面的限制, 器件各探测单元对同一辐射源存在响应的非均匀性问题, 这个问题已经成为提高图像质量的瓶颈^[1]。因此在工程应用中, 红外焦平面阵列器件几乎都需要进行相应的非均匀性校正。

国内外关于红外焦平面阵列非均匀性校正的算法主要可以分为两大类。一类是基于标定的非均匀性校正算法^[2,3], 如单点校正法、两点校正法和多点校正法等。该类方法运算量小且易于通过硬件实现和集成, 但其校正后残留的校正误差较大, 同时漂移误差会随时间及外界环境温度的变化而增加。另一类是基于场景的非均匀性校正算法^[4], 如神经网络法、卡尔曼

收稿日期: 2010-10-19

作者简介: 黄英东(1981-), 男, 广西梧州人, 工程师, 博士, 主要从事红外图像处理方面的研究工作。E-mail: hydlx68941037@sina.com

滤波法和高阶统计量法等。这类方法在一定程度上克服了由红外焦平面阵列的响应漂移带来的校正误差,但基于场景的方法大多采用迭代方法,计算量过大,很难满足工程上的实时性要求。

本文通过分析探测元的线性响应模型,在两点校正法的基础上,提出了一种多项式拟合与单点校正相结合的非均匀校正方法。该方法通过拟合红外探测器光敏单元的响应曲线完成非均匀性校正,克服了探测器系数随时间与环境变化产生漂移的问题。

2 两点校正算法

在理想情况下,探测器单元在达到饱和之前被假设为线性响应模型^[5],红外焦平面阵列中第 (i,j) 个探测单元的响应可以表示为

$$x_{ij}(\phi) = K_{ij}\phi + Q_{ij} \quad (1)$$

式中, ϕ 为探测单元的辐照度; K_{ij} 为探测单元响应特性的增益系数或特性曲线的斜率; Q_{ij} 为暗电流形成的偏移量或特性曲线的截距。

两点校正法是根据探测器的动态响应范围,通过选取高低温两幅均匀的辐照图进行定标来确定校正因子的。它可以同时对增益和偏置进行校正,即在入射辐射 $\phi(T_1)$ 和 $\phi(T_2)$ 处把不同的探测器信号 x_{ij} 校正为一致的平均信号 $x_{ij}(T_1)$ 和 $x_{ij}(T_2)$ 。对探测单元的线性关系进行校正后,得到的校正方程为

$$Y_{ij} = A_{ij}X_{ij}(\phi) + B_{ij} \quad (2)$$

式中, ϕ 为辐射通量; Y_{ij} 为输出值; A_{ij} 和 B_{ij} 分别为焦平面上 (i,j) 点的增益因子和偏移因子。两点法校正过程通常分标定和补偿两步。在光路中插入一个辐射均匀的黑体,所有阵列元在高温 T_H (第一标定点) 和低温 T_L (第二标定点) 下的响应分别为 V_H 和 V_L :

$$\begin{cases} V_H = A_{ij}X_{ij}(H) + B_{ij} \\ V_L = A_{ij}X_{ij}(L) + B_{ij} \end{cases} \quad (3)$$

在理想情况下,各探测元的响应值相同,非均匀性的影响可分别用高温和低温下所有探测元的响应平均值 V_H 和 V_L 表示,即

$$\begin{cases} V_H = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N X_{ij}(H)}{M \times N} \\ V_L = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N X_{ij}(L)}{M \times N} \end{cases} \quad (4)$$

从而可以求出校正增益和偏移量:

$$\begin{cases} A_{ij} = \frac{V_H - V_L}{X_{ij}(H) - X_{ij}(L)} \\ B_{ij} = \frac{V_H X_{ij}(L) - V_L X_{ij}(H)}{X_{ij}(L) - X_{ij}(H)} \end{cases} \quad (5)$$

在较窄的动态范围内,探测单元响应与辐射功率之间基本呈线性关系,此时可以使用两点法进行非均匀性校正。但是,当红外成像动态范围大时,线性关系难以得到满足,两点法的校正效果并不十分理想。现在人们通常是用两点多段法来克服这个不足的^[5]。

3 改进的多项式拟合校正算法

经研究发现,一般探测元的响应近似为二次曲线且呈 S 形状^[6]。根据该函数模型,可以拟合出红外探测器光敏单元的响应曲线。即两点法中的 A_{ij} 和 B_{ij} 系数只与图像中像元 i 的灰度值相关,可表示为

$$A_{ij} = P_{1ij}x_{ij}^2 + P_{2ij}x_{ij} + P_{3ij} \quad (6)$$

$$B_{ij} = P'_{1ij}x_{ij}^2 + P'_{2ij}x_{ij} + P'_{3ij} \quad (7)$$

式中, A_{ij} 为增益因子; B_{ij} 为偏移因子; P_{1ij} 、 P_{2ij} 、 P_{3ij} 、 P'_{1ij} 、 P'_{2ij} 和 P'_{3ij} 均为拟合系数。将式(6)和式(7)代入式(2),可得:

$$\begin{aligned} & (P_{1ij}x_{ij}^2 + P_{2ij}x_{ij} + P_{3ij})x_{ij} \\ & + P'_{1ij}x_{ij}^2 + P'_{2ij}x_{ij} + P'_{3ij} = Y_{ij} \end{aligned} \quad (8)$$

整理后得到:

$$\begin{aligned} & P_{1ij}x_{ij}^3 + (P_{2ij} + P'_{1ij})x_{ij}^2 \\ & + (P_{3ij} + P'_{2ij})x_{ij} + P'_{3ij} = Y_{ij} \end{aligned} \quad (9)$$

令 $a_{ij} = P_{1ij}$, $b_{ij} = P_{2ij} + P'_{1ij}$, $c_{ij} = P_{3ij} + P'_{2ij}$, $d_{ij} = P_{3ij}$, 则有

$$a_{ij}x_{ij}^3 + b_{ij}x_{ij}^2 + c_{ij}x_{ij} + d_{ij} = Y_{ij} \quad (10)$$

式中, a_{ij} 、 b_{ij} 、 c_{ij} 和 d_{ij} 也为拟合系数。

这样由原先两点法的 A_{ij} 和 B_{ij} 两个校正系数变成现在的 a_{ij} 、 b_{ij} 、 c_{ij} 和 d_{ij} 等四个校正系数。对于同一入射辐射通量, 其输出是不同的, 并且可以通过一个 4 系数的三次多项式进行拟合。为了克服探测器随时间和环境温度漂移的问题, 使校正后的曲线与事先拟合的曲线尽可能地没有偏离, 在使用红外焦平面前, 利用单点校正方法进行二次修正, 即对 d_{ij} 进行修正, 可取得更好的校正效果。假设周围温度为 ϕ , 令两点校正法中的增益因子为 1, 则两点校正法退化为单点校正, 校正偏置为

$$d_{ij}(\phi) = Y_{ij}(\phi) - \overline{Y(\phi)} \quad (11)$$

针对任一阵列像元 (i, j) 的单点校正公式为

$$Y_{ij} = a_{ij}x_{ij}^3 + b_{ij}x_{ij}^2 + c_{ij}x_{ij} + d_{ij} - d_{ij}(\phi) \quad (12)$$

令 $d'_{ij} = d_{ij} - d_{ij}(\phi)$, 则多项式校正公式变为

$$Y_{ij} = a_{ij}x_{ij}^3 + b_{ij}x_{ij}^2 + c_{ij}x_{ij} + d'_{ij} \quad (13)$$

使用单点校正算法对多项式拟合校正算法进行二次修正, 可以使该方法具有更大的动态

范围, 并能有效地消除由红外焦平面探测单元的非线性响应特性及漂移特性带来的影响。

4 利用最小二乘法对多项式系数进行拟合

由于式 (13) 是对 4 个校正系数进行求解, 一般可以先通过测量 4 个温度点来建立 4 个方程, 然后通过解方程组来确定校正系数。但是由于测量系统的误差, 仅通过 4 个方程求解, 校正系数的误差比较大^[7], 因此, 黑体温度要达到足够宽的范围。本文使用的是从黑体常温到黑体最高温度的所有响应值, 几乎覆盖了整个红外焦平面的工作温度范围。通过利用最小二乘法对各温度点的数据进行拟合, 将可以使校正结果变得更加准确。

就红外焦平面的每一个探测元而言, 它对任一点 $(x_i, y_i) (i = 0, 1, \dots, m)$ 都是独立响应的。设 $\varphi_j(x_j) (j = 0, 1, 2, 3)$ 线性无关, 求 $p(x_i) = \sum_{j=0}^3 q_j \varphi_j(x_i)$, 使误差 $\sum_{i=0}^m r_i^2 = \sum_{j=0}^m [p(x_i) - y_i]^2$ 变得最小。当 $m > 4$ (超过理论上的解方程组个数) 时, 如果使用一般的最小二乘法, 正规方程组式的系数矩阵容易成为病态阵, 这时所求最小二乘数据拟合的误差较大, 校正结果并不理想。此时, 需要用超定方程组最小二乘法解出 4 组校正系数。

对于 $p(x) = \sum_{j=0}^3 q_j \varphi_j(x)$, 求满足 $p(x_i) = y_i (i = 1, \dots, m)$ 的最小二乘解, 即

$$\begin{pmatrix} \varphi_0(x_1) & \varphi_1(x_1) & \varphi_2(x_1) & \varphi_3(x_1) \\ \varphi_0(x_2) & \varphi_1(x_2) & \varphi_2(x_2) & \varphi_3(x_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \varphi_0(x_m) & \varphi_1(x_m) & \varphi_2(x_m) & \varphi_3(x_m) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \\ \dots \\ y_m \end{pmatrix} \quad (14)$$

令

$$P = \begin{pmatrix} \varphi_0(x_1) & \varphi_1(x_1) & \varphi_2(x_1) & \varphi_3(x_1) \\ \varphi_0(x_2) & \varphi_1(x_2) & \varphi_2(x_2) & \varphi_3(x_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \varphi_0(x_m) & \varphi_1(x_m) & \varphi_2(x_m) & \varphi_3(x_m) \end{pmatrix}, \quad Q = \begin{pmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix}, \quad Y = \begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \\ \dots \\ y_m \end{pmatrix}$$

则

$$P^T P = \begin{pmatrix} (\varphi_0, \varphi_0) & (\varphi_0, \varphi_1) & (\varphi_0, \varphi_2) & (\varphi_0, \varphi_3) \\ (\varphi_1, \varphi_0) & (\varphi_1, \varphi_1) & (\varphi_1, \varphi_2) & (\varphi_1, \varphi_3) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (\varphi_3, \varphi_0) & (\varphi_3, \varphi_1) & (\varphi_3, \varphi_2) & (\varphi_3, \varphi_3) \end{pmatrix}$$

$$P^T Y = \begin{pmatrix} \sum_{i=0}^m y_i \varphi_0(x_i) \\ \sum_{i=0}^m y_i \varphi_1(x_i) \\ \sum_{i=0}^m y_i \varphi_2(x_i) \\ \sum_{i=0}^m y_i \varphi_3(x_i) \end{pmatrix}$$

由于 $\varphi_j(x_j)(j=0,1,2,3)$ 线性无关, $P^T P$ 是满秩矩阵。在将其变成上三角矩阵后, 求此上三角矩阵的逆矩阵, 即可得到:

$$Q = (P^T P)^{-1} P^T Y \quad (15)$$

对任一个像元点 (i, j) 而言, 矩阵 Q 中 4 个向量均对应于其像元 (i, j) 的校正系数 a_{ij} 、 b_{ij} 、 c_{ij} 和 d_{ij} 。

5 实验结果

利用 256×256 致冷型中波红外焦平面阵列探测器, 在不同温度的均匀黑体辐射下得到了多组不同的标定数据, 然后分别采用本文提出的红外焦平面阵列非均匀性校正新方法、三次多项式校正方法和两点多段法对多组标定数据进行了非均匀性校正实验, 并对实验结果进行了比较。选取 3 个探测器单元并绘制其在不同辐射强度下的响应特性曲线, 将辐射功率变换为对应的温度, 将响应电压转换为红外图像的灰度值, 如图 1 所示。其中的虚线为探测器单元的平均曲线。使用两点多段法对探测器单元进行校正并记录校正系数, 3 个月后使用原校正系数进行校正, 校正结果如图 2 所示, 其中有两个探测器单元存在明显的漂移。此外, 使用三次多项式对探测器单元进行校正并记录校正系数, 同样 3 个月后使用原校正系数进行校正, 校正结果如图 3 所示, 其中探测器单元有漂移但并

不明显。最后, 使用本文方法对探测器单元进行校正并记录校正系数, 3 个月后用原系数进行校正, 结果如图 4 所示, 其中探测器单元基本没有漂移。从校正结果中可以看到, 随着时间的变化, 与两点多段法及三次多项式拟合法相比, 本文方法的漂移量最小, 能有效消除由漂移带来的影响。

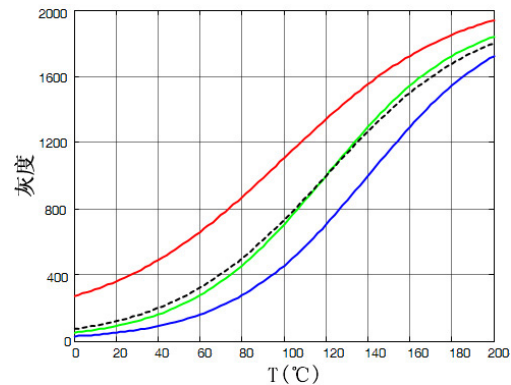


图 1 探测器单元的原始响应图

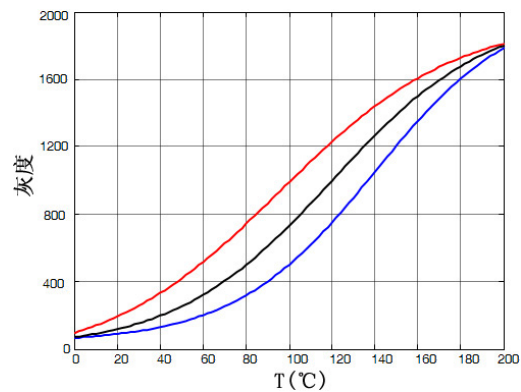


图 2 两点多段校正算法的处理结果

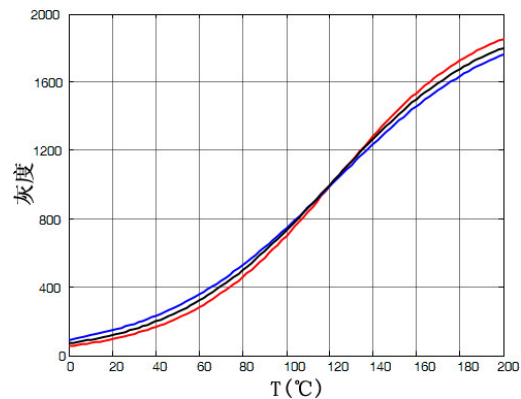


图 3 三次多项式拟合校正算法的处理结果

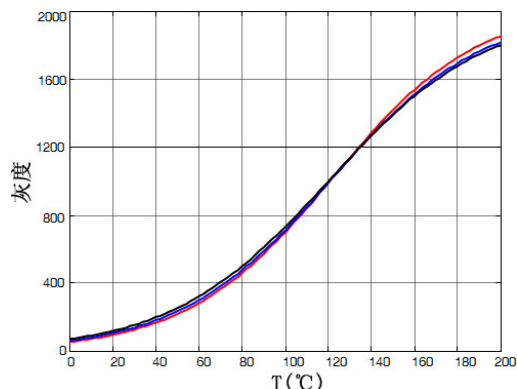


图 4 改进的三次多项式校正算法的处理结果

通过用不同校正方法校正同一幅等灰度图像在不同温度下的图像数据的残余非均匀性, 对校正后的图像的残余非均匀性进行了比较。在计算非均匀性时, 采用非均匀性的定义公式^[8], 计算公式如下:

$$NU = \frac{1}{V_{avg}} \times \sqrt{\frac{1}{M \times N - (d+h)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (V_{ij} - V_{avg})^2} \quad (16)$$

式中, $V_{avg} = \frac{1}{M \times N - (d+h)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N V_{ij}$; NU 为焦平面阵列的非均匀性; V_{ij} 为焦平面上第 i 行第 j 列像元的输出信号; V_{avg} 为焦平面上所有有效像元的视频信号平均值; M 和 N 分别为焦平面阵列的行数和列数; d 为焦平面阵列中的死像元数; h 为焦平面阵列中的过热像元数。表 1 列出了分别用两点多段法、三次多项式法及本文提出的改进的三次多项式校正法对同一辐射源作校正后的残余非均匀性的计算结果。从中可以看到, 本文提出的校正方法效果最好。

表 1 三种方法的非均匀性校正评估

	图像非均匀性	提高倍数
校正前	7.653%	—
两点多段法	0.746%	10.258
三次多项式法	0.406%	18.849
本文算法	0.342%	22.377

6 结论

本文提出的红外焦平面阵列多项式拟合与单点校正相结合的新方法, 充分考虑了实际探测单元的非线性响应特性。其校正精度明显高于三次多项式校正法和两点多段法, 而且有效地避免了繁琐的校正算法, 同时能有效克服探测器校正系数随时间漂移的问题。从实验结果中可以看出, 与三次多项式校正和两点多段校正相比, 本文方法的校正精度得到大幅提高, 而且漂移量小, 特别适合用 DSP 或 FPGA 等硬件实现, 在工程中具有较大的实用价值。

参考文献

- [1] 张峰, 刘上乾, 汪大宝. 一种新的基于平稳小波变换的红外焦平面非均匀性校正技术 [J]. 光子学报, 2009, 38(8): 2135-2138.
- [2] 冯林, 刘爽, 赵凯生, 等. 考虑红外焦平面器件非线性响应的一种非均匀性校正方法 [J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(3): 221-224.
- [3] 李旭, 杨虎. 基于两点的红外图像非均匀性校正算法应用 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S2): 608-610.
- [4] Bing-jian Wang, Da-bao Wang, Rui Lai, et al. An Improved Non-uniformity Correction Algorithm for IRFPA Based on Neural Network [C]. 1st International Congress on Image and Signal Processing, CISP 2008, 3: 547-551, 2008.
- [5] 王跃明, 陈建新, 刘银年, 等. 红外焦平面器件两点多段非均匀性校正算法研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2003, 22(6): 415-418.
- [6] 白俊奇, 陈钱, 钱惟贤, 等. 基于环境温度的红外焦平面阵列非均匀性校正 [J]. 红外与毫米波学报, 2010, 29(1): 49-52.
- [7] 程正兴, 李水根. 数值逼近与常微分方程数值解 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000.
- [8] 鲁剑锋. 基于 DSP 的实时红外图像处理系统的设计 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(6): 622-625.