

# 红外焦平面阵列非均匀性校正技术的最新进展

侯和坤, 张 新

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 光学技术研究中心, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 面阵列红外焦平面探测器的非均匀性校正技术是正在探索的一项关键技术。介绍了近期国内外发展的红外焦平面阵列非均匀性校正技术: 基于场景的代数算法、基于干扰抵消原理的自适应校正法和基于低次插值的多点校正法。

**关键词:** 红外焦平面; 代数算法; 干扰抵消原理

**中图分类号:** TN215 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)01-0079-04

## Recent development of infrared focal plane arrays nonuniformity correction

HOU He-kun, ZHANG Xin

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Infrared focal plane arrays nonuniformity correction is a developing key technique. Several recent technologies of infrared focal plane arrays nonuniformity correction at home and abroad are introduced in detail, including scene-based algebraic algorithm, the adaptive algorithm based on noise-canceling, and the multi-point nonuniformity correction based on low order interpolation.

**Keywords:** IRFPA; Algebraic algorithm; Noise-canceling principle

## 0 引言

校正焦平面探测器非均匀性的方法有很多种,但到目前还没有找到适应性较强的方法,对方法的研究总是面向某种特定条件和工作模式。除了过去已常用的两点温度定标法(TPC)、恒定统计平均法(CS)、人工神经网络法(ANNC)和时域高通滤波法(THPFC)外,近期国内外又研究出基于场景的代数算法<sup>[1]</sup>、基于干扰抵消原理的自适应校正法<sup>[2]</sup>和基于

低次插值的多点校正算法<sup>[3]</sup>。

## 1 基于场景的代数算法

### 1.1 原理

考虑由一个焦平面阵列探测器产生的  $M \times N$  像序列  $y_n, n=1, 2, \dots$  表示帧数。焦平面探测输出的线性模式为:

$$y_n(i, j) = a(i, j)z_n(i, j) + b(i, j) \quad (1)$$

收稿日期:2003-04-11; 修订日期:2003-07-12

作者简介:侯和坤(1976-),男,山东日照人,硕士生,主要从事光学设计和红外光学成像系统的研究。

式中  $z_n(i, j)$  为帧时间内对探测器有效面积积分的辐射通量;  $a(i, j)$  和  $b(i, j)$  分别为探测器的增益和偏移量。在多数探测器中, 由于偏移非均匀性占主要地位, 增益非均匀性可以忽略, 假设所有探测器的增益相同且为 1, 则公式(1)简化为:

$$y_n(i, j) = z_n(i, j) + b(i, j) \quad (2)$$

为了方便,  $M \times N$  探测器的偏移非均匀性矩阵  $\mathbf{B}$  定义为:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b(1,1) & b(1,2) & \cdots & b(1,N) \\ b(2,1) & b(2,2) & \cdots & b(2,N) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b(M,1) & b(M,2) & \cdots & b(M,N) \end{bmatrix} \quad (3)$$

假定在帧时间内被观测的物体温度恒定, 可用内插法对与第  $n$  帧相临两帧场景模拟出第  $(n+1)$  帧场景。为了简单方便, 选择线性内插法。对于出现  $\alpha$  个像素纯垂直亚像素偏移的相临两帧场景, 第  $k$  帧场景和第  $k+1$  帧场景间的像素数关系为:

$$y_{k+1}(i+1, j) = \alpha z_k(i, j) + (1-\alpha)z_k(i+1, j) + b(i+1, j) \quad 0 < \alpha \leq 1 \quad (4)$$

同样, 对于出现  $\beta$  个像素纯水平亚像素偏移的相临两帧场景, 第  $m$  帧场景和第  $m+1$  帧场景间的像素数关系为:

$$y_{m+1}(i, j+1) = \beta z_m(i, j) + (1-\beta)z_m(i, j+1) + b(i, j+1) \quad 0 < \beta \leq 1 \quad (5)$$

规定  $\alpha$  正号表示场景向下运动,  $\beta$  正号表示左运动。原理<sup>[1]</sup>就是把一个探测单元的偏移值转换为它的垂直相邻的探测单元的偏移值, 把整个一行探测器的偏移归化为统一的数值, 同理, 对所有列和行进行同样处理, 最终把阵列上所有的偏移归化为统一的数值。

## 1.2 算法

对于探测器  $\mathbf{B}$ , 定义  $\alpha$  个像素偏移中间校正矩阵为  $\tilde{\mathbf{V}}_{\mathbf{B}}$ , 当  $j=1, 2, \dots, N$  时, 令:  $\tilde{\mathbf{V}}_{\mathbf{B}}(1, j)=0$ , 定义:

$$\tilde{\mathbf{V}}_{\mathbf{B}}(i, j) = \frac{1}{\alpha} [\alpha y_n(i-1, j) + (1-\alpha)y_n(i, j) - y_{n-1}(i, j)] \quad (6)$$

式中  $i=2, 3, \dots, M; j=1, 2, \dots, N, M \times N$  为帧图像的尺寸。将  $y_k(i-1, j), y_k(i, j)$  和  $y_{k-1}(i, j)$  代入公式(5)可得:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{V}}_{\mathbf{B}}(i, j) &= \frac{1}{\alpha} [\alpha Z_{\mathbf{B}}(i-1, j) + \alpha b(i-1, j) + \\ &(1-\alpha)Z_{\mathbf{B}}(i, j) + (1-\alpha)b(i, j) - \\ &\alpha Z_{\mathbf{B}}(i-1, j) - (1-\alpha)Z_{\mathbf{B}}(i, j) - \\ &b(i, j)] = b(i-1, j) - b(i, j) \quad (7) \end{aligned}$$

通过累加每一列的  $\tilde{\mathbf{V}}_{\mathbf{B}}$ , 得到垂直校正矩阵  $\mathbf{V}_{\mathbf{B}}$ 。更确切地说, 对于  $i=2, 3, \dots, M$  和  $j=1, 2, \dots, N$  定义垂直校正矩阵  $\mathbf{V}_{\mathbf{B}}$  的第  $(i, j)$  单元为  $\mathbf{V}_{\mathbf{B}}(i, j) = \sum_{c=2}^i \tilde{\mathbf{V}}_{\mathbf{B}}(c, j)$ ,  $\mathbf{V}_{\mathbf{B}}$  的矩阵形式为:

$$\mathbf{V}_{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ b(1,1)-b(2,1) & b(1,2)-b(2,2) & \cdots & b(1,N)-b(2,N) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b(1,1)-b(M,1) & b(1,2)-b(M,2) & \cdots & b(1,N)-b(M,N) \end{bmatrix} \quad (8)$$

同理, 由已校正垂直偏移的探测器的偏移矩阵:

$$\mathbf{B}' = \begin{bmatrix} b(1,1) & b(1,2) & \cdots & b(1,N) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b(1,1) & b(1,2) & \cdots & b(1,N) \end{bmatrix}$$

得到水平校正矩阵:

$$\mathbf{H}_{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} 0 & b(1,1)-b(1,2) & \cdots & b(1,1)-b(1,N) \\ 0 & b(1,1)-b(1,2) & \cdots & b(1,1)-b(1,N) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & b(1,1)-b(1,2) & b(1,1)-b(1,3) & b(1,1)-b(1,N) \end{bmatrix} \quad (9)$$

总的校正矩阵为:

$$\begin{aligned} \mathbf{C} &= \mathbf{V}_{\mathbf{B}} + \mathbf{H}_{\mathbf{B}} = \\ &\begin{bmatrix} 0 & b(1,1)-b(1,2) & \cdots & b(1,1)-b(1,N) \\ b(1,1)-b(2,1) & b(1,1)-b(2,2) & \cdots & b(1,1)-b(2,N) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b(1,1)-b(M,1) & b(1,1)-b(M,2) & \cdots & b(1,1)-b(M,N) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

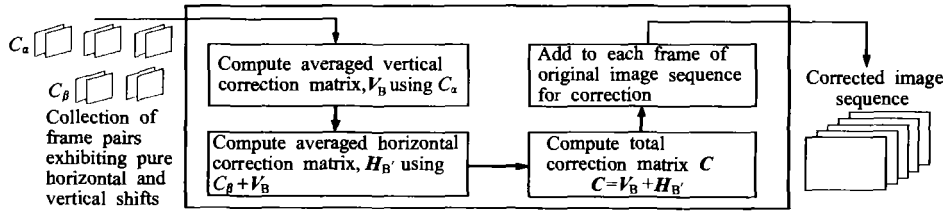


图 1 基于场景的代数算法的原理图

Fig. 1 Block diagram of the scene-based algebraic algorithm

在实际计算中, 由于公式(4)和(5)的线性内插近似的误差以及  $\alpha$  和  $\beta$  偏移估计误差, 将导致偏移校正矩阵误差(噪声), 为了减少这种噪声的影响, 得到两个集合  $C_\alpha$  和  $C_\beta$ , 它们分别由不同的  $\alpha$  和  $\beta$  像素偏移的连续两像帧组成。用这两个集合, 可以得到许多垂直和水平校正矩阵, 形成平均垂直和水平校正矩阵  $\bar{V}_B$  和  $\bar{H}_B$ , 总校正矩阵为两者之和。

此方法简单可靠, 容易实现, 只需少量的像帧就可以获得有效的校正矩阵, 在场景辐射分布差异较小时也能有效地实现校正。缺点是只能校正偏移量。

## 2 基于干扰抵消原理的自适应校正方法

假定红外焦平面阵列在第  $n$  个时刻的输出为  $x(n)$ , 它是存在非均匀性的失真图像, 由有用信号  $S(n)$  和噪声  $N_1(n)$  混合而成:  $x(n) = S(n) + N_1(n)$ ,  $S(n)$  和  $N_1(n)$  是不相关的。因为产生噪声的复杂性和有用信号的多样性, 设计者无法得到它们的先验知识, 所以, 必须用自适应滤波器去抵消噪声。

自适应干扰抵消<sup>[2]</sup>是对噪声信号进行自适应的估计, 然后从输入信号中减去噪声得到信号的最佳估计, 其原理如图 2 所示。图中  $N(n)$  是与  $N_1(n)$  相关的噪声, 经自适应滤波器后得到  $y(n)$ , 则系统的输出为:

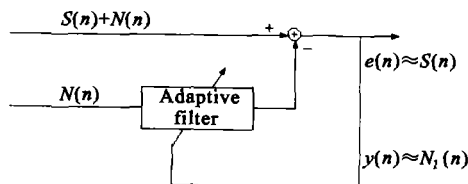


图 2 基于干扰抵消原理的自适应校正方法的原理图

Fig. 2 Sketch map of the adaptive correction based on scene-cancelling principle

$$e(n) = S(n) + N_1(n) - y(n) \quad (11)$$

为了简便, 下面表达式中省去了时间下标。对公式(10)平方后, 得到:

$$e^2 = S^2 + (N_1 - Y)^2 + 2S(N_1 - y) \quad (12)$$

对此式两边取数学期望, 并考虑到  $S$  与  $N_1$  和  $N$  不相关, 得到:

$$E[e^2] = E[S^2] + E[(N_1 - y)^2] \quad (13)$$

当自适应调节滤波器使  $E[e^2]$  最小时, 信号功率  $E[S^2]$  将不受影响, 也就是自适应滤波器使  $E[(N_1 - y)^2]$  达到最小, 所以自适应滤波器的输出  $y$  即为原始噪声  $N_1$  的最佳均方估计。又由于  $N_1 - y = e - S$ , 因此可知  $E[(N_1 - y)^2]$  最小时, 也使  $E[(e - S)^2]$  最小, 即  $e$  是  $S$  的最佳均方估计, 从而实现了噪声的消除。

## 3 基于低次插值的多点校正算法

### 3.1 多点校正算法原理

根据 IRFPA 器件工作时场景的变化范围, 选定  $M$  个辐射度  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_M$  作为校正定标点, 分别对红外焦平面阵列中所有  $N$  个探测单元的输出  $S_i(\varphi_i), i = 1, 2, \dots, M$  求平均, 得:

$$\bar{S}_i = \sum_{j=1}^N f(S_j(\varphi_i)) / N \quad (i = 1, 2, \dots, M) \quad (14)$$

IRFPA 的多点校正算法<sup>[3]</sup>就是找到在任意辐射照度下  $\varphi$ , 第  $j$  个探测单元的输出值  $S_j(\varphi)$  与其校正值  $S'_j(\varphi)$  之间的函数映射关系为  $S'_j(\varphi) = f(S_j(\varphi_i))$ , 满足:

$$\bar{S}_i = f(S_j(\varphi_i)) \quad (i = 1, 2, \dots, M) \quad (15)$$

可利用多项式插值法求得该函数映射关系  $f$ , 但是高次插值多项式(如 Lagrange 插值多项式等)并不是随着插值节点的增多而逼近精度愈高, 且其计算量相对较大, 不利于工程上实时实现。

### 3.2 分段线性插值算法

所谓分段线性插值<sup>[1]</sup>就是通过插值节点用折线段连接起来逼近  $f(x)$ 。设已知节点  $a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b$  上的函数值  $f_0, f_1, \dots, f_n$ , 求一折线函数  $I_h(x)$  满足:

- (1)  $I_h(x) \in C(a, b)$ ;
- (2)  $I_h(x_k) = f_k, k = 0, 1, \dots, n$ ;
- (3)  $I_h(x)$  在每个小区间  $[x_k, x_{k+1}]$  上是线性函数, 则称  $I_h(x)$  为分段线性插值函数。

据此原理, 可得到 IRFPA 非均匀校正的分段线性插值算法:

$$S'_j(\varphi) = \frac{S_j(\varphi) - S_j(\varphi_{i+1})}{S_j(\varphi_i) - S_j(\varphi_{i+1})} \bar{S}_i + \frac{S_j(\varphi) - S_j(\varphi_i)}{S_j(\varphi_{i+1}) - S_j(\varphi_i)} \bar{S}_{i-1} \quad (16)$$

式中  $S_j(\varphi) \in [S_j(\varphi_i), S_j(\varphi_{i+1})], (j = 1, 2, \dots, N)$ 。

### 3.3 三次样条插值算法

根据三次样条插值算法原理可构造如下的 IRFPA 非均匀性多点校正算法:

$$S'_j(\varphi) = \bar{S}_i(1-t) + \bar{S}_{i+1}t - 6^{-1}h_i^2t(1-t) \times [(2-t)m_i + (1+t)m_{i+1}] \quad (17)$$

$$t = (S_j(\varphi) - S_j(\varphi_i))/h_i$$

$$h_i = S_j(\varphi_{i+1}) - S_j(\varphi_i)$$

式中  $S_j(\varphi) \in [S_j(\varphi_i), S_j(\varphi_{i+1})], (i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, N)$ 。

$$\begin{bmatrix} 2 & \lambda_0 & & & & \\ \mu_1 & 2 & \lambda_1 & & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & & \\ & & \mu_M & 2 & \lambda_M & \\ & & & \mu_{M+1} & 2 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_0 \\ m_1 \\ \vdots \\ m_M \\ m_{M+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_0 \\ d_1 \\ \vdots \\ d_M \\ d_{M+1} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\mu_i = h_{i-1}/(h_{i-1} + h_i);$$

$$\lambda_i = 1 - \mu_i;$$

$$d_i = (6/h_{i-1} + h_i)(\bar{S}_{i+1} - \bar{S}_i)/$$

$$h_i - (\bar{S}_i - \bar{S}_{i-1})/h_{i-1} \quad i = 1, 2, \dots, M$$

$$\lambda = \mu_{M+1} = 1;$$

$$d_0 = d_{M+1} = 0。$$

式中  $\{m_i, i = 0, 1, \dots, M+1\}$  可事先用追赶法快速求解, 存储以备实时校正时使用。

基于分段线性插值和三次样条插值的 IRFPA 非均匀性多点校正算法, 能显著地提高 IRFPA 器件的均匀性, 具有校正精度高、动态范围大的特点, 并且对 IRFPA 各探测单元的非线性影响不敏感。这两种方法均具有较好的收敛性, 即随着均匀参考辐射源的增加, 其校正精度愈来愈高。算法简单, 在线计算量小, 易于工程上实时实现。

## 4 总 结

红外成像技术正在突飞猛进的发展, 红外探测器是核心部件, 非均匀性问题严重影响它的性能。因此解决非均匀性问题是探测器发展的关键, 目前方法虽然很多, 但是都不理想。国内外都在进行研究, 希望找到软硬件实现的高效、高速、高精度的校正方法。

### 参考文献:

- [1] 胡晓梅. 红外焦平面探测器的非均匀性与校准方法研究[J]. 红外与激光工程, 1999, 28(3): 9-12.
- [2] Bradley M Ratliff, Majeed M Hayat. An algebraic algorithm for nonuniformity correction in focal-plane arrays[J]. Opt Soc, 2002, 19(9): 1737-1747.
- [3] 曹治国, 李辉, 张天序. 一种新的红外焦平面阵列非均匀性校正技术[J]. 华中科技大学学报, 2001, 29(12): 55-57.
- [4] 殷世民. 基于低次插值的红外焦平面器件非均匀性多点校正算法[J]. 光子学报, 2002, 31: 715-718.