

文章编号 1001-2486(2001)05-0122-04

# 红外焦平面阵列非均匀校正技术研究\*

王平 李飏 沈振康

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 红外焦平面阵列探测器广泛应用于红外成像制导系统。但焦平面阵列的非均匀性校正技术与探测器的性能息息相关,因此必须进行非均匀性校正。在众多非均匀校正方法中,两点法和时间高通自适应方法是两种最典型的方法。文中对这两种方法分别进行了分析,并对一般的时间高通自适应非均匀校正法提出了改进,以达到更好的校正效果。

**关键词** 红外探测器;焦平面阵列;两点法;非均匀校正;时间高通法

**中图分类号** :TJ765.3+3 **文献标识码** :A

## A Modified Nonuniformity Correction Method of Infrared Focal Plane Array

WANG Ping, LI Biao, SHEN Zhen-kang

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract** :Infrared focal plane array(IR FPA) detector has been widely used in new infrared guided system because of its outstanding performance. But the Nonuniformity of IR FPA debases the performance of the detector. Lots of nonuniformity correction methods have been developed to solve the problem. The paper puts forward a modified method to correct the nonuniformity of IRFPA to get better infrared image.

**Key words** :Infrared Detector ;Focal Plane Array ;Two-Point Method ;Nonuniformity Correction ;Temporal High-Pass Method

红外探测器是红外制导系统的“眼睛”,其发展状况代表着红外制导系统的水平。红外焦平面阵列不需要光机扫描,显著地改善了系统的结构,提高了系统的精度和可靠性,已经被应用于最先进的第四代红外空空导弹中(如美国的响尾蛇 AIM-9X 等),并且是红外探测器的主要发展方向。

红外焦平面阵列由多个探测元组成,每个探测元对应红外图像中的一个像素点。由于各种因素的影响,焦平面阵列各探测元会出现对同样的外部输入的响应不一致的现象,这就是所谓的红外焦平面阵列的非均匀性<sup>[1]</sup>。非均匀性的产生有两个方面的原因<sup>[2]</sup>:内部原因主要是探测元在工艺上难以做到完全一致,导致结构和材料上不同;外部原因则是由于环境温度变化、光学系统结构等。焦平面阵列的非均匀性会严重影响焦平面阵列的成像质量,甚至会完全淹没信号,因此必须对非均匀性进行校正。

焦平面阵列探测元的响应模型为<sup>[1]</sup>:

$$F(i, j, \phi) = G_{ij} \cdot \phi + O_{ij} \quad (1)$$

上式中  $(i, j)$  为探测元的空间位置,  $G_{ij}$  为  $(i, j)$  处探测元的增益,  $O_{ij}$  为  $(i, j)$  处探测元的偏移,  $\phi$  为探测元的输入通量,  $F(i, j, \phi)$  为探测元的输出信号。

焦平面阵列的非均匀性主要表现为各探测元的增益与偏移参数不一致。用于校正非均匀性的方法有多种,其中最为典型的是两点法和基于场景的校正方法。两点法直接校正探测元的增益和偏移参数,基于场景的方法则通过探测器输出的红外图像序列进行处理来补偿焦平面阵列的非均匀性,二者各有优缺点,都能取得较好的校正效果。

### 1 两点法进行非均匀校正<sup>[3]</sup>

两点法校正的目的是为了使得各探测元的增益参数和偏移参数在同一温度下具有相同的响应特

\* 收稿日期 2001-03-13  
作者简介 王平(1976-)男,博士生。

性。首先,选择高温和低温两个温度作为定标点,所选择的高温和低温定标点为红外焦平面阵列探测器正常工作的温度范围。由式(1),两种温度下焦平面阵列探测元的输出分别为

$$\begin{aligned} P(i, j, \phi_L) &= G_{ij} \phi_L + O_{ij} \\ P(i, j, \phi_H) &= G_{ij} \phi_H + O_{ij} \end{aligned} \quad (2)$$

上式中,  $\phi_L$  为低温时焦平面阵列的输入通量,  $\phi_H$  为高温时焦平面阵列的输入通量。两种温度下的输入通量均为固定值,但难以获得具体大小,为此,对输出图像进行空间平均来消除输入通量的影响,校正后  $(i, j)$  处探测元当前温度下的输出为

$$\begin{aligned} P_c(i, j, \phi) &= [P(i, j, \phi) - P(i, j, \phi_L)] \frac{\bar{P}(\phi_H) - \bar{P}(\phi_L)}{P(i, j, \phi_H) - P(i, j, \phi_L)} + \bar{P}(\phi_L) \\ &= P(i, j, \phi) G_{C_{ij}} + O_{C_{ij}} \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $\bar{P}(\phi_L)$  为低温定标点焦平面输出的空间平均值,  $\bar{P}(\phi_H)$  为高温定标点焦平面输出的空间平均值,  $G_{C_{ij}}$  和  $O_{C_{ij}}$  为校正后探测元的增益和偏移参数,分别为

$$\begin{aligned} G_{C_{ij}} &= \frac{\bar{P}(\phi_H) - \bar{P}(\phi_L)}{P(i, j, \phi_H) - P(i, j, \phi_L)} \\ O_{C_{ij}} &= \bar{P}(\phi_H) - P(i, j, \phi_L) G_{C_{ij}} \end{aligned} \quad (4)$$

上式中各个参数都是已知的,可以离线计算,然后用  $G_{C_{ij}}$  和  $O_{C_{ij}}$  对每个探测元的输出信号进行乘法和加法运算,即可达到校正焦平面的非均匀性的目的。

## 2 时间高通非均匀校正方法及改进

时间高通法是一种典型的基于场景的自适应非均匀校正方法。焦平面阵列的非均匀性实际上是一种固定模式噪声,在输出的红外图像序列中,每个探测元在偏移上的非均匀性与实际的输入信号基本无关,可对输出红外图像序列进行时间上的高通滤波,消除频率较低的非均匀性噪声信号。

时间高通滤波法的校正公式为<sup>[1]</sup>

$$\begin{aligned} f(n) &= \frac{1}{M} x(n) + \left(1 - \frac{1}{M}\right) f(n-1) \\ y(n) &= x(n) - f(n) \end{aligned} \quad (5)$$

上式中  $x(n)$  为焦平面输出的第  $n$  帧图像,  $f(n)$  为输入图像中的低频部分,  $y(n)$  为校正输出图像,  $M$  为用于计算的焦平面输出连续红外图像帧数。

时间高通系统的系统转移函数的  $Z$  变换表示式为

$$H(z) = \frac{(M-1)(z-1)}{Mz - (M-1)} \quad (6)$$

其频谱幅度特性和截止频率为

$$|H(\omega)| = \left| \left[ \frac{(2M^2 - 4M + 2)(1 - \cos(\omega))}{(2M^2 - 2M)(1 - \cos(\omega)) + 1} \right]^{\frac{1}{2}} \right| \quad (7)$$

$$f_c = \arccos\left(\frac{M^2 - 3M + 1.5}{M^2 - 3M + 2}\right) \quad (8)$$

焦平面阵列的非均匀性受到工作环境的影响时,其频率特性会发生变化,需要调整滤波器的截止频率。由式(8), $M$  值大小对系统的截止频率有一定的影响,但幅度很小<sup>[4]</sup>。这里,对式(5)所示的时间高通滤波器进行改进

$$\begin{aligned} f(n) &= \frac{\alpha}{M} x(n) + \left(1 - \frac{1}{M}\right) f(n-1) \\ y(n) &= x(n) - f(n) \end{aligned} \quad (9)$$

其中参数  $\alpha$  为调节因子,目的是为了调节系统的截止频率,选择合适的调节因子能够尽可能校正焦平面阵列的非均匀性,又不丢失有用的目标信息。

此时,离散系统转移函数为

$$H(z) = \frac{(M - \alpha)z - (M - 1)}{Mz - (M - 1)} \quad (10)$$

其频谱幅度特性和截止频率分别为

$$|H(\omega)| = \left[ \frac{(2M^2 - 2(\alpha + 1)M + 2\alpha)(1 - \cos(\omega)) - (\alpha - 1)}{(2M^2 - 2M)(1 - \cos(\omega)) + 1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

$$f_c = \arccos\left(\frac{M^2 - (2\alpha + 1)M + \alpha + 0.5}{M^2 - (2\alpha + 1)M + 2\alpha}\right) \quad (12)$$

图1给出了M为100时,参数 $\alpha$ 对滤波器频率响应特性的影响,图2给出了修正的时间高通滤波器中的参数 $\alpha$ 对截止频率的影响。

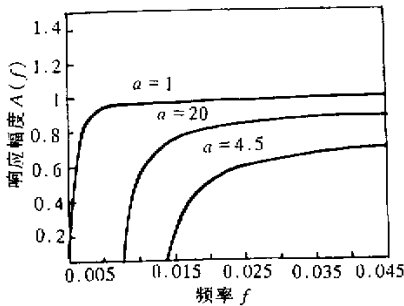


图1 改进滤波器的频率特性 (M=100)

Fig.1 Frequency of Modified Filter (M=100)

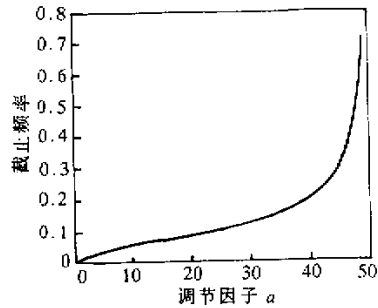


图2 改进滤波器的截止频率与 $\alpha$ 的关系

Fig.2 Relation of Frequency and  $\alpha$  (M=100)

由图2可见,调节因子 $\alpha$ 能够很好的调节时间高通滤波系统的截止频率。当焦平面阵列的非均匀性不随时间发生变化时,可以选择较小的 $\alpha$ 值,一般选择 $\alpha=1$ ,也就是一般的时间高通法。如果焦平面阵列非均匀性出现漂移,由于小于1的 $\alpha$ 值对截止频率影响不大,因此通常大于1的 $\alpha$ 值来调节滤波器的截止频率,尽可能滤除低频非均匀信号,提高输出红外图像的质量。

### 3 实验结果与结论

评判非均匀校正算法的性能的通用指标是校正前后红外图像的空间标准差。这里利用298K温度下红外焦平面阵列输出的图像来比较上述各类非均匀校正方法的性能。表1给出分别两点法和两种时间高通非均匀校正方法校正后红外图像的空间上的标准差,图3给出焦平面阵列校正前后输出的红外图像。

表1 各种非均匀性校正算法的性能比较

Tab.1 Comparison of three nonuniformity correction method

校正方法	输出图像	两点法	时间高通法	改进时间高通法
图像空间标准差	10.83	2.34	0.84	0.70 ( $\alpha=5$ )

两点法和时间高通自适应非均匀校正法是两种最有代表性的红外焦平面阵列非均匀校正方法。这两种方法各有优缺点。两点法计算简便,但不能克服焦平面阵列偏移的漂移,时间高通非均匀校正方法算法简单,能有效地校正焦平面阵列偏移的漂移,并对渐变效果有很好的效果,但由于其频率特性固定,当焦平面阵列非均匀性出现漂移时,难以取得好的校正效果。本文对其进行了改进,通过调节因子 $\alpha$ 来调节滤波器的频率响应特性,使得系统能够根据不同焦平面阵列调节频率特性,从而能够更好地校正红外焦平面阵列的非均匀性。

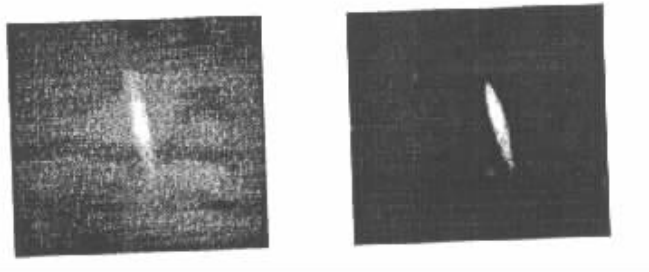


图3 焦平面阵列校正前后输出红外图像

Fig.3 the corrected image of IR FPA

## 参考文献：

- [1] Scriber D.A., Sakady K.A., et al. Nonuniformity correction for staring IR focal plane arrays using scene-based techniques[ A ]. SPIE[ C ] 1990 ,1308 224-235.
- [2] Narendra P.M. Reference-free nonuniformity compensation for IR imaging arrays[ A ]. SPIE[ C ]1980 ,252 :10-17.
- [3] Tzimopoulou S. ,Lettington A.H. Scene based techniques for nonuniformity correction of IRFPA[ A ]. SPIE[ C ]1998 ,3436 172-183.
- [4] 陈宝国 . 焦平面探测器的应用与非均匀校正技术研究[ D ]. 国防科技大学学位论文 ,1997.

(上接 128 页)

- [3] Grinvald A, Lieke E, Frostig RD et al. Functional architecture of cortex revealed by optical imaging of intrinsic signals[ J ]. Nature , 1986 324-364.
- [4] Ivo Vanzetta and Amiram Grinvald. Increased cortical oxidative metabolism due to sensory stimulation : implications for functional brain imaging[ J ]. Science , 1999 ,286 19.
- [5] Frostig RD, Lieke EE, Ts'o Dan, et al. Cortical functional architecture and local coupling between neuronal activity and the microcirculation revealed by in-vivo high resolution optical imaging of intrinsic signals[ A ]. Proc Natl Acad Sci. USA ,1990 87 6082-6086.
- [6] 唐晓加, 张为俊, 韩亚农, 王沛, 聂劲松. 应用于生物组织的光学成像技术及国内可实施技术探讨[ J ]. 中国医学物理学杂志 ,2000 ,17(1) :17-20.
- [7] Haglund MM, Ojemann GA & Hochman DW. Optical imaging of epileptiform and functional activity in human cerebral cortex[ J ]. Nature ,1992 385 668-671.
- [8] 张鹏, 俞洪波, 寿天德. 基于内源信号的脑光学成像系统的研制[ J ]. 生物物理学报 ,1999 ,21(3) :597-604.
- [9] 俞洪波, 寿天德. 脑光学成像术揭示的猫初级视皮层方位倾向性效应[ J ]. 生理学报 ,2000 52 :431-434.
- [10] 俞洪波, 寿天德. 用脑光学成像术研究不同空间拓扑位置猫初级视皮层的空间频率反应特性[ J ]. 生理学报, 2000, 52(5) :411-415.
- [11] 俞洪波, 刑大军, 寿天德. 脑内源信号光学成像术 视皮层的方位功能柱的活体显示[ J ]. 中国神经科学杂志 ,2000 16 :352-359.
- [12] A. Grinvald, D. Shoham, A. Shmuel, et al. IN-VIVO OPTICAL IMAGING OF CORTICAL ARCHITECTURE AND DYNAMICS[ A ]. Technical Report GC-AG/99-6 2001.
- [13] 唐孝威主编. 脑功能成像[ M ]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999 :126-143.
- [14] Bonhoeffer T, Grinvald A. . Optical imaging based on intrinsic signals : the methodology[ A ]. In :Toga AW, Mazziotta. Eds. Brain Mapping : The Methods. San Digo : Academic ,1996 55-97.
- [15] 曹厚德. 21 世纪的数字化医学影像技术[ J ]. 中华放射学杂志 ,1999 33(12).
- [16] Yoko Hoshi, Mamoru Tamura. Near-Infrared Optical Detection of Sequential Brain Activation in the Prefrontal Cortex during Mental Tasks[ J ]. NeuroImage ,1997 5(4).
- [17] Y. Chen, S. Zhou, S. Nioka, B. Chance. A Novel Optical System for Neonatal Brain Imaging[ A ]. Proceedings of SPIE ,1999 , VOL. 3597-37
- [18] Maria Angela Franceschini, Sergio Frantini, Scott A. Walker, John S. Maier, William W. Mantulin, and Enrico Gratton. Multi-channel optical instrument for near -infrared imaging of tissue[ A ]. Proc. SPIE ,1995 ,2389 264-272.

