

# 红外焦平面器件二点多段非均匀性校正算法研究

王跃明 陈建新 刘银年 薛永祺  
(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘要** 分析了红外焦平面探测器的非均匀性机理和各种非均匀性校正算法, 提出二点多段非均匀性校正算法, 该算法避免了二点校正算法的低精度和多点校正算法的大运算量. 在红外多谱段相机上的应用结果表明二点多段非均匀性校正算法具有运算量小、精度高、实用性强的优点.

**关键词** 红外焦平面, 非均匀性, 线性校正, 二点多段法.

## STUDY ON TWO-POINT MULTI-SECTION IRFPA NONUNIFORMITY CORRECTION ALGORITHM

WANG Yue-Ming CHEN Jian-Xin LIU Yin-Nian XUE Yong-Qi  
(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract** Based on analyzing the mechanism of the IRFPA's nonuniformity and several nonuniformity correction algorithms, the method of two-point multi-section for IRFPA nonuniformity correction was presented. The two-point multi-section method has higher precision than two-point correction algorithm and has lower operation load than multi-point correction algorithm. The appliance of the two-point multi-section method to infrared multi-band camera showed that the method has the merit of low operation load, high precision and strong practicability.

**Key words** IRFPA, nonuniformity, linear correction, two-point multi-section method.

### 引言

红外焦平面器件是各种成像光谱仪、热像仪、红外相机等仪器中的核心部件. 在红外搜索、红外跟踪等军事系统中以及灾害监测、资源调查等民用领域均有广泛的应用. 但是由于探测器各像元响应度的不均匀性, 使得红外系统的成像质量较差, 直接影响到探测器的最小可分辨温度.

红外焦平面器件的响应非均匀性问题不同于一般的图像噪声, 一般的图像噪声是瞬态随机噪声, 可以通过帧/场处理的方法来消除. 探测器的非均匀性是一种固定图形噪声 (Fixed Pattern Noise). 它是由于探测器的加工工艺、材料、温度和偏置情况的不均匀性所造成的. 例如碲镉汞 ( $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ) 红外焦平面探测器由于半导体的禁带宽度  $E_g$  受组份  $x$  和温度  $T$  的影响而导致截止波长  $\lambda_c$  的不均匀. 因为截止波长  $\lambda_c = 1.24/E_g$  (eV), 而半导体的禁带宽度  $E_g$  与组份  $x$  和温度  $T$  的关系可以由下面的经验公式进行

描述<sup>[1]</sup>:

当  $0.23 \leq x \leq 0.60, 100 < T < 300\text{K}$  时:

$$E_g(x, T) (\text{eV}) = -0.303 + 1.73x + 5.6 \times 10^{-4}(1 - 2x)T + 0.25x^3, \quad (1)$$

当  $0.17 \leq x \leq 0.60, 20 < T < 300\text{K}$  时:

$$E_g(x, T) (\text{eV}) = -0.25 + 1.59x + 5.23 \times 10^{-4}(1 - 2.08x)T + 0.327x^3. \quad (2)$$

以上从材料组份和温度方面分析了红外焦平面探测器响应非均匀性产生的原因, 实际上还有很多其他方面的原因. 图 1 反映了一个 256 元线列红外碲镉汞焦平面器件典型的响应不均匀性状况.

为了改善成像质量, 提高最小温度分辨率, 目前几乎所有的红外系统都要进行非均匀性校正的工作, 至于软件校正还是硬件校正, 只是实现的方法不一样, 其核心都是要选择合适的方法.

本文首先分析传统的非均匀性校正算法, 然后提出二点多段线性校正算法, 并分析校正的效果.

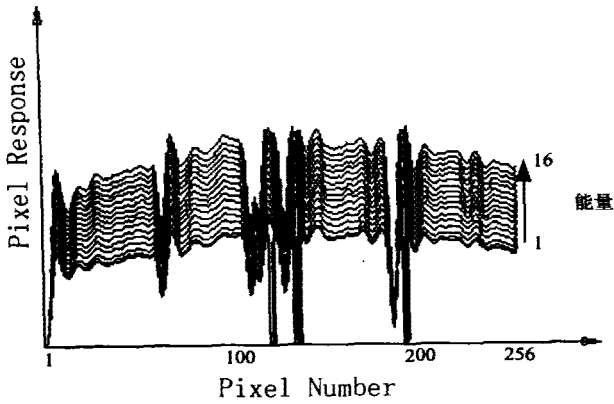


图1 碲镉汞红外焦平面器件的非均匀性(256元)  
Fig. 1 The nonuniformity of Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te IRFPA (256 pixels)

### 1 传统非均匀性校正理论

分析红外探测器的非均匀性产生原因对于建立校正算法模型是很重要的. 由于工艺、温度、压力等各种原因, 探测器光敏元的响应  $V$  和红外辐射量  $\Phi$  呈现为复杂的非线性关系. 另外我们所观察到的红外图像的非均匀性还包含了红外仪器的光学系统所引入的非均匀性, 也就是说红外图像在传递过程中有许多非均匀性的因素发生了相互耦合, 并以综合形态表现出来.

根据应用系统的要求和软硬件条件, 目前常见的非均匀性校正算法有点校正和自适应校正二大类.

点校正包含一点校正、二点校正、多点校正<sup>[2-5]</sup> 3种; 自适应校正主要有基于场景的校正法、神经网络算法、连续时间校正<sup>[6-8]</sup> 3种.

#### 1.1 一点校正法

一点校正法是最早的非均匀性校正算法. 针对增益系数不均匀和偏置不均匀二种情况, 一点校正法也可分为2种.

增益系数不均匀的校正: 选取辐照度  $\varphi_1$  为定标点, 对探测器所有  $N$  个像元的响应值  $V_i$  求平均式(4), 将探测器各像元的响应  $V_i$  校正为其平均响应(也就是所谓的理想响应)  $V_s$ . 根据假设, 能够求得校正因子(式5)

$$V_s = \sum_{i=1}^N V_i / N, \quad (3)$$

$$a_i = \frac{V_i}{V_s}. \quad (4)$$

标定出校正因子  $a_i$  以后就可以进行红外图像

的非均匀性校正了.

偏置不均匀的校正: 上面的方法只是对探测器响应的增益系数不均匀性进行了校正, 而对于探测器各单元的偏置不均匀性则采用另一种算法<sup>[9]</sup>.

选取辐照度  $\varphi_1$  为定标点, 对探测器所有  $N$  个像元的响应值  $V_i$  求平均同式(3), 则在任一辐照度  $\varphi$  下, 每个像元的输出  $V(\varphi)$  可以校正为  $V'(\varphi)$ .

$$V'(\varphi) = V(\varphi) - V(\varphi_1) + V_s(\varphi_1). \quad (5)$$

显然, 一点校正法对于增益不均匀性和偏置不均匀性二者是不能兼顾的, 由此产生了二点校正法.

#### 1.2 二点校正法

二点法考虑了探测器的增益不均匀性、偏置不均匀性、热噪声、暗电平等因素, 通常情况下, 当入射红外辐射为零的时候, 探测器的响应输出不为零, 也就是通常所说的暗电平. 但是, 两点校正法仍然是一种线性校正算法. 它和一点校正法一样假设探测器的响应输出和红外辐射量呈线性关系:

$$V = k\Phi + b. \quad (6)$$

这样只需要在2种辐照度  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  下定标就可以确定校正因子  $k, b$ . 然后可以利用校正因子进行非均匀性补偿, 则在任一辐照度  $\varphi$  下, 每个像元的输出  $V(\varphi)$  可以校正为  $V'(\varphi)$ :

$$\begin{cases} V_s(\varphi_1) = k_j V_j(\varphi_1) + b_j \\ V_s(\varphi_2) = k_j V_j(\varphi_2) + b_j \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} k_j = \frac{V_s(\varphi_2) - V_s(\varphi_1)}{V_j(\varphi_2) - V_j(\varphi_1)} \\ b_j = V_s(\varphi_1) - k_j \times V_j(\varphi_1) \end{cases} \Rightarrow V'_j(\varphi) = k_j \times V_j(\varphi) + b_j, \quad (7)$$

$j$ ——探测器像元数.  $j = 1, 2, 3, \dots, N$

#### 1.3 多点校正法

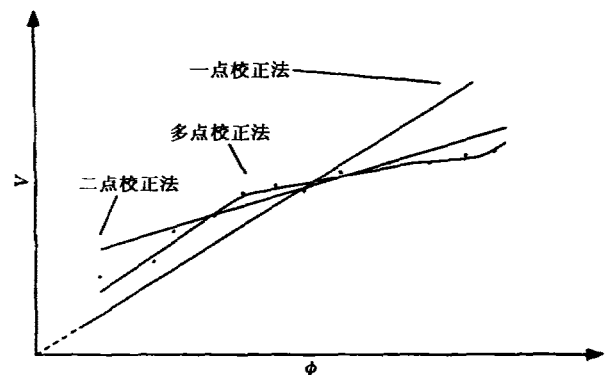


图2 点校正算法原理图

Fig. 2 The principle of Point Correction Algorithm

多点校正法比二点校正法更进一步,它考虑了探测器响应度的非线性.它根据红外成像系统工作的动态范围,选择  $M$  个不同的辐照度  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3 \dots \varphi_M$ , 分别对  $N$  个探测单元进行辐射定标.其目的就是要找到任意辐照度  $\Phi$  下,探测器的响应输出与辐照度  $\Phi$  之间的函数映射关系.根据定标获得的  $M$  个点  $(V_i, \Phi_i), i=1, 2, \dots, M$ , 利用多项式插值算法(样条插值或 Lagrange 插值)就可以求得校正函数

$$V = f(\varphi, \varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_M). \quad (8)$$

该种算法特点是精度高,但问题是计算量很大,在实时性要求较高的红外成像系统中很难采用这种算法.

图2是3种点校正算法的原理图.

## 2 二点多段线性校正算法研究

通过分析以上三种算法,可知这三种算法各有优缺点,一点校正法和二点校正法具有算法简单、定标方便、运算量小的优点,但精度太差,基本没有多少实用价值;而多点校正算法是多项式插值算法,虽然精度高,但运算量大.因此在工程应用上,还存在一些问题.为此,我们结合工程实际,提出二点多段线性校正算法,并在红外多谱段相机中进行了应用,取得了较好的效果.因为二点多段法仍然是线性校正算法.因此运算量小,实时性好,下面详细说明.

红外探测器不仅各像元之间在非均匀性,而且每个像元的光谱响应曲线也不是严格一致的.因此,认识到探测器响应的非线性是十分必要的.所谓二点多段法就是将红外成像系统的工作范围分成  $M$  段来进行定标(这一点和前面分析过的多点校正法是一样的),然后在每一段内采用线性近似的办法来处理.也就是用折线来逼近理想的曲线,如图3所示.

在动态范围内选取  $\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3 \dots \varphi_M$  不同的  $M+1$  个辐照等级,对  $N$  各探测器像元分别进行定标,得到对应的响应值  $V_j(\varphi_i) (i=0, 1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, N)$ , 则可以得出校正参数  $k_{i,j}, b_{i,j}$ :

$$\begin{cases} k_{i,j} = \frac{V_j(\varphi_{i-1}) - V_j(\varphi_i)}{V_j(\varphi_{i-1}) - V_j(\varphi_i)} \\ b_{i,j} = V_j(\varphi_i) - k_{i,j} \times V_j(\varphi_i). \end{cases} \quad (9)$$

$i$ ——辐照度等级,  $i=0, 1, 2, \dots, M$

$j$ ——探测器像元数,  $j=0, 1, 2, \dots, N$

校正的时候需要读入参数表  $V_j(\varphi_i) (i=0, 1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, N)$ , 校正参数  $k_{i,j}, b_{i,j}$ . 对于任意辐照条件  $\varphi$  下,第  $j$  个探测器像元的响应值  $V_j(\varphi)$  可

以校正为  $V_j'(\varphi)$ .

首先需要判断  $V_j(\varphi)$  在  $V_j(\varphi_i) (i=0, 1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, N)$  中属于哪一个区间,设

$$V_j(\varphi_{i-1}) < V_j(\varphi) \leq V_j(\varphi_i), \quad (10)$$

则

$$V_j'(\varphi) = k_{i,j} \times V_j(\varphi_i) + b_{i,j}. \quad (11)$$

红外多谱段相机包含可见近红外、短波红外、中波红外和远红外4个谱段,下面以具有  $N$  个像元的短波红外谱段为例来说明二点多段法的实现步骤.

1) 利用定标设备辐射积分球获取  $N$  个像元在  $M+1$  个不同辐照度条件下的响应  $DN_{i,j} (i=0, 1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, N)$ , 这一步骤的目的是利用统计平均的办法来消除测量的误差.

2) 因为探测器具有非均匀性,所以同一辐照度下各个像元的响应  $DN_{i,j} (i=0, 1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, N)$  是不一样的.期望平均值  $EXDN_i$ :

$$EXDN_i = \frac{(\sum_{j=1}^N DN_{i,j})}{N}. \quad (12)$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, M$$

3) 计算校正参数  $a_{i,j}, b_{i,j}$ , 因为工程实际当中,红外辐射  $\Phi$  是很难度量的,也是没有必要去度量的.因此我们只要求得每个像元的响应  $DN_{i,j}$  是与期望值  $EXDN_i$  的关系即可.

$$EXDN_i = a_{i,j} DN_{i,j} + b_{i,j}. \quad (13)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, N$$

该式表明第  $i$  个像元的响应值与期望值的关系,对于二点多段法,校正因子  $a, b$  可用下式进行计算

$$\begin{cases} a_{i,j} = \frac{EXDN_{i-1} - EXDN_i}{DN_{i-1,j} - DN_{i,j}} \\ b_{i,j} = EXDN_i - a_{i,j} DN_{i,j}. \end{cases} \quad (14)$$

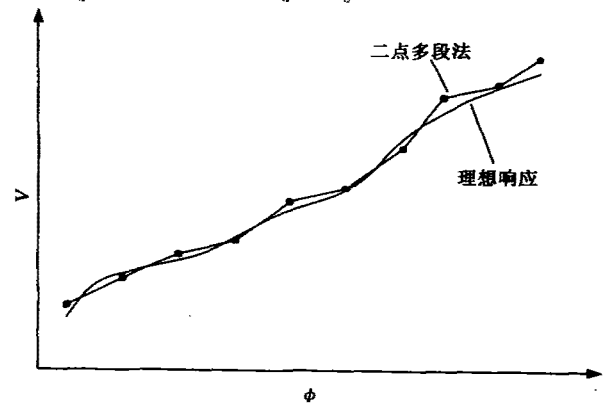


图3 二点多段法原理

Fig. 3 The principle of 2-point multi-section method

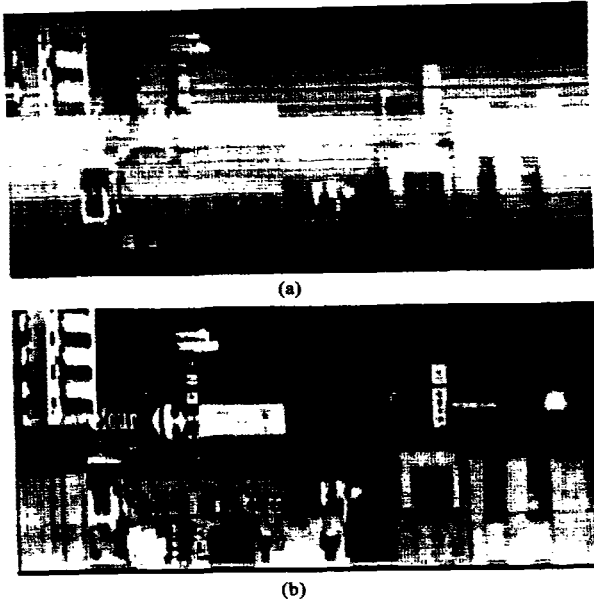


图4 二点多段法校正效果分析(a)短波红外原始图像  
(b)二点多段法校正后的图像  
Fig.4 Result of nonuniformity correction using 2-point multi-section method (a)SWIR original image (b)the image corrected by 2-point multi-section method

$$(i = 0, 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N)$$

4) 根据3)求得校正因子的  $a_{i,j}, b_{i,j}$ , 就可以对红外图像进行校正。

对于红外图像第  $j$  个像元的响应  $ImageDN_j$ , 首先判断其属于哪一个辐照度

$$DN_{i-1,j} < ImageDN_j \leq DN_{i,j}, \quad (15)$$

求得  $i$ . 然后选择校正参数  $a_{i,j}, b_{i,j}$ , 得校正期望值

$$DN'_j = a_{i,j}ImageDN_j + b_{i,j}. \quad (16)$$

即完成了一个像元的非均匀性校正。

该种二点多段非均匀性校正算法可以用于软件校正也可以用于硬件校正, 运算量不大, 对系统要求不高, 实时性好. 辐射定标以后只需保存校正参数  $a_{i,j}, b_{i,j}, DN_{i,j}$  到文件, 校正的时候读取到内存即可, 对于硬件校正, 则固化到 LUT 表中, 通过查表算法读取校正参数。

我们在红外多谱段相机中利用二点多段法进行了实时的非均匀性校正, 证明该方法运算量不大, 但效果很好, 如图4所示。

由图4可以看出, 原始图像由于探测器的非均匀性, 经扫描成像后在图像上留下了很多条纹, 经过二点多段法校正后, 条纹已经不很明显, 图像也更清晰了。

### 3 结论

工程上, 红外焦平面器件的非均匀性包含2个层次的含义: 一方面是单个像元随辐射信号的强弱变化响应的不均匀和光谱成分不同而响应不均匀; 另一方面红外焦平面器件的非均匀性在宏观上表现为同样的辐照条件下, 各像元的响应不一致. 对于不同的应用, 所关心的不均匀性是不一样的. 在遥感成像光谱领域, 需要对地物辐射信息进行定量化的分析, 因此需要对每个像元的光谱响应不均匀性进行校正; 而对于通常的红外成像系统则只关心图像的清晰程度, 只要不影响目标识别就行了, 因此, 对非均匀性校正的要求相对低些。

红外焦平面器件是红外成像系统的核心部件, 解决探测器的非均匀性校正问题对于提高系统的性能十分重要. 与各种非均匀性校正算法综合比较, 二点多段非均匀性校正算法运算量小, 实时性好, 软硬件实现简单方便, 具有很强的实用价值和推广意义。

### REFERENCES

- [1] TANG Ding-Yuan, Semiconducting Character of  $Hg_{1-x}Cd_xTe$ . *Infrared Physics and Technology* (汤定元. 碲镉汞三元系的半导体性质. 红外物理与技术), 1974, 15(16): 345—357
- [2] WANG Yu, CHEN Qian, YIN De-Kui, et al. Real-time nonuniformity correction technique for infrared image. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (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] Milton A F, Kruer M R, Barone F R. Influence of nonuniformity on infrared focal plane array performance. *SPIE*, 1985, 24: 855—864
- [4] Bulter N, Blackwell R, Murphy R, et al. Low cost Uncooled microbolometer imaging system for dual use. *SPIE*, 1995, 2552: 583—591
- [5] Leonard G, Karaus R, Timlin H, et al. Nightmaster, a low compact IR imaging system. *SPIE*, 1996, 2746: 226—234
- [6] Scribner D A, Caulfield J T, Kruer M R, et al. Nonuniformity correction for staring IR focal plane arrays using scene-based techniques. *SPIE*, 1990, 1308: 224—233
- [7] Ronald Driggers, Scribner D A, Willam C. Performance evaluation of two retina-like preprocessors for imaging detector arrays. *SPIE*, 1995, 2474: 118—126
- [8] John G Harris. Continuous-time calibration of VLSI sensors for gain and offset variations. *SPIE*, 1995, 2474: 22—33
- [9] Yin Shimin, Liu Shangqiang. The multi-point non-uniformity correction algorithms for IRFPA based on low order interpolation. *ACTA PHOTONICA SINICA*, 2002, 31: 715—718