

## 红外焦平面阵列非均匀性的两点校正及依据

刘会通<sup>1</sup>, 易新建<sup>2</sup>

- (1. 华中科技大学 光电子工程系, 湖北 武汉 430074;  
2. 华中科技大学 图像识别与人工智能研究所, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**以 Planck 辐射定律和红外探测元的线性响应模型为基础, 在理论上完整地推导了红外焦平面阵列非均匀性的两点校正方法; 据此, 论证了两点校正方法的物理依据, 即从理论上证明如果探测元是线性和稳定响应的, 该方法则可以实现非均匀性的准确校正; 初步分析了非均匀性校正中存在误差的问题。

**关键词:** 红外焦平面阵列; 非均匀性; 线性校正

**中图分类号:** TP21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)01-0076-03

## Two-point nonuniformity correction for IRFPA and its physical motivation

LIU Hui-tong<sup>1</sup>, YI Xin-jian<sup>2</sup>

- (1. Department of Opto-Electronic Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China;  
2. Institute for Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The two-point nonuniformity correction algorithm for IRFPA is theoretically and perfectly deduced based on Planck Law and the linear response model of infrared detector. The physical motivation of the two-point nonuniformity correction is hereby disserted for the first time. It is theoretically proved that the algorithm is perfect for nonuniformity correction provided that the response of IRFPA is linear and stable. The residual nonuniformity is initiatively analyzed.

**Keywords:** IRFPA; Nonuniformity; Linear correction

### 0 前言

基于黑体的非均匀性校正方法(又称标定类方法)是非均匀性校正(NUC)中最直接、最基本的技术,在红外焦平面阵列(IRFPA)成像系统中获得了广

泛的应用。该方法原理简单,硬件易于实现和集成,对目标没有任何要求,也易于相互比较,是 IRFPA 系统公认的评估手段<sup>[1~4]</sup>;其依据的线性校正理论是所有自适应类方法的物理基础。依据 Planck 辐射定律和红外探测器的线性响应模型,在数学上可完整地推导出两点校正方法,在理论上论证了其物理依据。

收稿日期:2003-05-14; 修订日期:2003-06-20

作者简介:刘会通(1966-),男,河南伊川人,在站博士后,目前从事红外系统的信号处理及总体设计方面的研究工作。

## 1 非均匀性的两点校正方法

量子探测器的输出与入射的光子数有关。由 Planck 辐射定律可以推导出从一个温度为  $T_s$  的电源黑体入射到 IRFPA 第  $m$  个探测元的光子通量为:

$$\Phi_m(T_s) = \frac{\pi}{4(F/\#)^2} \tau A_m \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda L_\lambda^{BB}(\lambda, T_s) \quad (1)$$

平均入射到各个单元的光子通量则是:

$$\Phi_s = \langle \Phi_m(T_s) \rangle = \frac{\pi}{4(F/\#)^2} \tau \langle A_m \rangle \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda L_\lambda^{BB}(\lambda, T_s) = \frac{\pi}{4(F/\#)^2} \tau \bar{A} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda L_\lambda^{BB}(\lambda, T_s) \quad (2)$$

式中  $\bar{A} = \langle A_m \rangle$ , 表示 IRFPA 各单元平均的有效光敏面积, 其他各量的意义见参考文献[5, 6]。公式(2)建立了  $T_s$  与  $\Phi_s$  之间的一一对应关系, 故无论  $T_s$  或  $\Phi_s$  都可以用来表征黑体辐射源的特性,  $T_s$  可用于在实验中直观地控制黑体, 而  $\Phi_s$  用来表示 IRFPA 的响应特性。后者更符合量子探测器的物理特征。

设 IRFPA 对黑体测试时共有  $N$  个温度点, 对第  $n$  个温度区间  $[T_n, T_{n+1}]$  响应的光子通量区间为:

$$FI_n = [\Phi_n, \Phi_{n+1}] \quad (3)$$

可以不失一般性地认为所有探测元(除盲元外)的响应是单调的, 即:

$$r_m(\Phi_n) < r_m(\Phi_{n+1}) \quad (4)$$

在  $[\Phi_n, \Phi_{n+1}]$  区间探测元  $m$  的响应范围是:

$$RI_{m,n} = [r_m(\Phi_n), r_m(\Phi_{n+1})] \quad (5)$$

如果黑体入射光子通量  $\Phi_s$  位于第  $n$  个区间, 其响应应属于第  $n$  个响应区间:

$$\Phi_s \in FI_n \Rightarrow r_m(\Phi_s) \in RI_{m,n} \quad (6)$$

如果红外辐射在第  $m$  单元产生的响应等于该单元对第  $n$  个黑体温度点的响应, 基于黑体的校正运算将把该响应校正到 IRFPA 对该温度点处黑体的平均响应, 即:

$$r_m(\Phi_s) = r_m(\Phi_n) \Rightarrow f_m[r_m(\Phi_s)] = f_m[r_m(\Phi_n)] = S(\Phi_n) \quad (7)$$

理论上可以有无数的光谱辐射在第  $m$  单元产生等于  $r_m(\Phi_n)$  的响应, 如果  $S(\Phi_s) \neq S(\Phi_n)$ , 则校正过程将产生剩余非均匀性。这是此类方法无法避免的,

但在多数应用中影响可以忽略。在线性校正方法中, 所有单元的响应被校正函数按照线性插值算法映射为  $RI_{m,n}$  中的一个数值, 如图 1 所示。如果  $r_m(\Phi_s) \in RI_{m,n}$ , 则其校正输出  $f_m[r_m(\Phi_s)]$  应满足:

$$\frac{f_m[r_m(\Phi_s)] - S(\Phi_n)}{r_m(\Phi_s) - r_m(\Phi_n)} = \frac{S(\Phi_{n+1}) - S(\Phi_n)}{r_m(\Phi_{n+1}) - r_m(\Phi_n)}, r_m \in RI_{m,n} \quad (8)$$

所以:

$$f_m[r_m(\Phi_s)] = a_m + b_m r_m(\Phi_s) \quad (9)$$

式中:

$$a_m = \frac{r_m(\Phi_{n+1})S(\Phi_n) - r_m(\Phi_n)S(\Phi_{n+1})}{r_m(\Phi_{n+1}) - r_m(\Phi_n)}$$

$$b_m = \frac{S(\Phi_{n+1}) - S(\Phi_n)}{r_m(\Phi_{n+1}) - r_m(\Phi_n)} \quad (10)$$

分别为第  $m$  单元直流偏移量(offset)的和增益(gain)的校正系数。

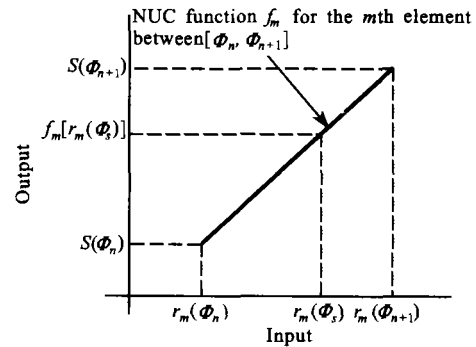


图 1 非均匀性校正线性方法示意图

Fig. 1 Illustration of the linear NUC

在黑体标定点处, 即  $\Phi_s = \Phi_n$  和  $\Phi_s = \Phi_{n+1}$  处, 由上式可以计算出:

$$f_m[r_m(\Phi_s)] = S(\Phi_n), f_m[r_m(\Phi_s)] = S(\Phi_{n+1}) \quad (11)$$

公式(9)和(10)的运算是根据各单元在  $\Phi_n, \Phi_{n+1}$  处响应的标定值对  $\Phi_s$  处的响应进行线性插值的, 这种方法又称为两点校正方法(Two-Point NUC, TP-NUC)。当标定的光子通量区间大于一个时称为分段线性校正方法(Piecewise Linear NUC, PL-NUC)。

## 2 两点校正方法的物理依据

下面证明如果探测器的响应为线性(而且是稳定的), 任意一点  $\Phi_s$  处的响应在两点校正中都可以被校

正到 IRFPA 在  $\Phi_s$  处的响应均值。当探测器响应为线性时,有:

$$r_m(\Phi_s) = o_m + g_m \Phi_s \quad (12)$$

式中  $o_m$  为直流偏移量;  $g_m$  为增益系数。在  $\Phi_s$  处, IRFPA 的平均响应为:

$$S(\Phi_s) = \langle r_m(\Phi_s) \rangle = \langle o_m \rangle + \langle g_m \rangle \Phi_s \quad (13)$$

由公式(12)得:  $\Phi_s = \frac{r_m(\Phi_s) - o_m}{g_m}$ , 再代入公式(13)得到:

$$S(\Phi_s) = \frac{g_m \langle o_m \rangle - \langle g_m \rangle o_m}{g_m} + \frac{\langle g_m \rangle}{g_m} r_m(\Phi_s) \quad (14)$$

将公式(12)、(13)代入公式(10)得到:

$$a_m = \frac{g_m \langle o_m \rangle - \langle g_m \rangle o_m}{g_m}, b_m = \frac{\langle g_m \rangle}{g_m} \quad (15)$$

对比公式(14),有:

$$f_m[r_m(\Phi_s)] = a_m + b_m r_m(\Phi_s) = S(\Phi_s) \quad (16)$$

如果探测元是线性响应并且没有漂移,两点校正的输出  $f_m[r_m(\Phi_s)]$  等于 IRFPA 在  $\Phi_s$  处的平均输出,即该方法对线性响应的 IRFPA 的校正没有剩余非均匀性。这是两点校正方法在物理上的依据。

### 3 其他问题

如果探测元的量子效率与光子波长无关,其响应为:

$$r_m(\Phi_s) = (r_d)_m + C_R C_F A_m \eta_m \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda L_{\lambda}^{BB}(\lambda, T_s, T_0) = (r_d)_m + \frac{C_R \eta_m A_m t_{mt}}{A} \frac{\pi}{4(F/\#)^2} \pi A \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda L_{\lambda}^{BB}(\lambda, T_s) = O_m + G_m \Phi_s \quad (17)$$

式中  $O_m = (r_d)_m$ ;  $G_m = \frac{C_R \eta_m A_m t_{mt}}{A}$ 。  $O_m$ 、 $G_m$  是  $m$  单元全区域线性响应的直流偏移量和增益系数,与对应的区域量  $o_m$ 、 $g_m$  并不一定相等,这是因为非线性响应的原由。公式(17)即为 IRFPA 的全区域线性响应模型,该模型给出全部响应范围内对输入光子通量的输出估计,与公式(12)相比对实际响应的计算误差要大一些。

如果增益系数和直流偏移是独立的随机变量,由公式(5)可以计算出  $\Phi_s$  处的空间噪声为:

$$\sigma^2(\Phi_s) = \text{var}(o) + \text{var}(g)\Phi_s^2 = \sigma_o^2 + \sigma_g^2 \Phi_s^2, \Phi_s \in FI_n \quad (18)$$

式中  $\text{var}(\cdot)$  表示求方差的运算。这样,一旦测定区域内增益系数和偏移量的方差,则可以计算出任意输入  $\Phi_s$  处的空间噪声。但由于非线性的存在,这种估计只能是近似的。

### 4 结论

完整地推导了非均匀性的两点校正方法,并在理论上首次论证了该方法的物理依据,表明如果 IRFPA 的响应是稳定、线性的,则两点校正的算法将没有误差。到目前为止,几乎所有红外焦平面阵列的非均匀性校正方法都是基于线性校正的原理,而且没有哪一种方法可以像两点校正方法这样能大幅度地校正初始的非均匀性。虽然实际上探测元响应都是非线性的,但基于黑体的两点校正方法仍获得了广泛的应用,特别是在采用 PtSi 器件的系统中几乎全部采用了这种方法。除了所述的优点外,还因为 IRFPA 非线性带来的校正剩余误差可通过增加标定点和减小标定间隔的方法控制到系统许可的范围;响应漂移问题则可结合自适应的方法或增加现场修正来克服。在其他论述中,将推导两点校正方法的剩余误差问题。

### 参考资料:

- [1] Perry D L. 2-D\* : a new focal plane array figure of merit [A]. SPIE[C]. 1992, 1762, 308-312.
- [2] Dawson J A, Borg E J, Duykers G L. Proposed standard for IRFPA non-uniformity measurements [A]. SPIE[C]. 1994, 2224, 62-71.
- [3] Mooney J M, Shepherd F D. Characterizing IRFPA nonuniformity and IR camera spatial noise [J]. Infrared Physics & Technology, 1996, 37: 595-606.
- [4] 朱晓池. 红外焦平面阵列成像传感器 [J]. 红外与激光工程, 1997, 26(4): 36-38.
- [5] Mooney J M, Shepherd F D, Ewing W S, et al. Responsivity nonuniformity limited performance of infrared staring cameras [J]. Optical Engineering, 1989, 28(11): 1151-1161.
- [6] 刘会通, 王骥, 郑志伟, 等. 红外焦平面阵列非线性响应的分析和计算 [J]. 红外与毫米波学报, 2001, 20(4): 253-258.