

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

冯林, 刘爽, 赵凯生, 官安全

(电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054)

摘要:针对红外焦平面阵列的非线性响应特性,提出了一种考虑非线性响应的“曲线一直线”校正方法,并给出了校正的计算公式.仿真实验结果说明此方法具有精度高,计算量小的优点,需要存储的参数少,易于硬件实现.

关键词:红外焦平面阵列;非均匀性校正;非线性响应;“曲线一直线”校正法

中图分类号:TN215 **文献标识码:**A

METHOD OF NONUNIFORMITY CORRECTION FOR IRFPA WITH NONLINEAR RESPONSE

FENG Lin, LIU Shuang, ZHAO Kai-Sheng, GUAN An-Quan

(College of Optoelectronic Information, University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu, 610054, China)

Abstract: Aiming at the nonlinearity of photoresponse characteristic in infrared focal plane arrays, a approach of nonuniformity correction for IRFPA, named “curve-beeline” correction, was proposed, and the correction formula was given. The simulation results show that it has perfect performance of high precision, and less calculation. Only a few parameters are needed to storage and it is easy to implement by hardware circuit.

Key words: infrared focal plane arrays; nonuniformity correction; nonlinear response; “curve-beeline” correction

引言

红外焦平面阵列(IRFPA)是现代红外成像系统的核心部件^[1].然而,由于材料、工艺等方面的原因,红外焦平面阵列普遍存在非均匀性问题,在图像上表现为固定空间噪声,严重影响了系统的成像质量.非均匀性校正技术已成为红外焦平面成像仪所必须解决的关键技术之一.

目前,IRFPA的非均匀校正技术主要分为标定类校正方法和基于场景的校正方法^[2,3].其中,两点校正法计算简单,易实现,是目前实际应用最广泛的方法,缺点是精度不高.分段校正法的校正精度较高,但需要存储的参数过多,所以在实际应用中受到很大限制.文中提出一种考虑探测元非线性响应的标定类校正方法——“曲线一直线”法.该方法的参数计算简单,只需在两点校正法的基础上增加少许的计算量,就能获得几倍于两点校正法的精度,同

时,克服了分段校正法存储参数过多的缺点,工作的动态范围宽,推导的校正公式易于硬件实现,具有较高的实用性.

1 红外焦平面阵列的非均匀性校正

探测器各探测元在接收到相同的幅照功率(入射辐射通量)时的输出不一致,会导致成像的非均匀性.两点校正法是假设每个探测元的响应都是线性定常的,即IRFPA中的第 (i,j) 个探测元的响应可以表示为:

$$R_{i,j}(E) = a_{i,j} \cdot E + b_{i,j} \quad (1)$$

式中, E 为入射辐射通量, $R_{i,j}(E)$ 为探测元的响应输出, $a_{i,j}$ 和 $b_{i,j}$ 分别为增益和偏移量(暗电流).对于每个探测元, $a_{i,j}$ 和 $b_{i,j}$ 都是固定的,而且不随时间变化.但不同的探测元的 $a_{i,j}$ 和 $b_{i,j}$ 是有差别的,这种差别导致了成像的非均匀性.两点校正法通过以下公式来校正这种非均匀性:

收稿日期:2005-10-15,修回日期:2006-02-23

基金项目:电子科技大学青年基金资助课题.

作者简介:冯林(1981-),男,重庆人,硕士研究生,主要研究方向为DSP图象处理.

Received date: 2005-10-15, revised date: 2006-02-23

$$Y_{i,j} = G_{i,j} \cdot R_{i,j}(E) + Q_{i,j}, \quad (2)$$

$$\text{其中: } G_{i,j} = \frac{Y_H - Y_L}{R_{i,j}(E_H) - R_{i,j}(E_L)}$$

$$Q_{i,j} = \frac{Y_H \cdot R_{i,j}(E_L) - Y_L \cdot R_{i,j}(E_H)}{R_{i,j}(E_L) - R_{i,j}(E_H)}$$

式中, $Y_{i,j}$ 为校正后的输出, $G_{i,j}$ 为增益校正系数, $Q_{i,j}$ 为偏移校正系数, $R_{i,j}(E_L)$ 和 $R_{i,j}(E_H)$ 分别为探测元在低温和高温定标点 E_L 和 E_H 的实际输出, Y_L 和 Y_H 分别为低温和高温定标点的校正值, 通常取所有探测元在定标点处实际响应的平均值为 Y_L 和 Y_H .

理论上, 探测元的响应为线性定常时, 两点校正法能实现精确的校正. 但实际探测元的响应都是非线性的, 所以用公式(2)的校正结果精度较低. 用分段校正法可以提高校正精度, 即将整个工作范围分成几个区间(通常为 2~3 个区间), 每个区间都使用两点校正法进行校正. 但随着区间数的增加, 需要存储的参数也成倍地增加, 这一缺点使得分段校正法在实际使用中受到很大限制.

2 考虑非线性响应的“曲线一直线”法

目前各种文献和实验数据说明, 响应曲线近似为抛物型^[4-8]. 所以, 第 i 行 j 列探测元的响应值 $R_{i,j}$ 可以用入射辐射通量 E 的二次多项式来表示:

$$R_{i,j} = a_{i,j} + b_{i,j} \cdot E + c_{i,j} \cdot E^2. \quad (3)$$

不同的探测元, 参数 $a_{i,j}$, $b_{i,j}$ 和 $c_{i,j}$ 是不同的. 对于同一入射辐射通量 E , 输出的响应值 $R_{i,j}$ 也就不同. 校正的目的是要得到相同的输出值, 也就是要把式(3)代表的各条不同的曲线“拉”成同一条直线. 文中提出的“曲线一直线”法能较好地实现这一目的.

如图 1 所示, 曲线 $a1$ 为探测元的实际响应曲线. 设曲线方程(为书写方便, 已省略下标):

$$R = a + b \cdot E + c \cdot E^2. \quad (4)$$

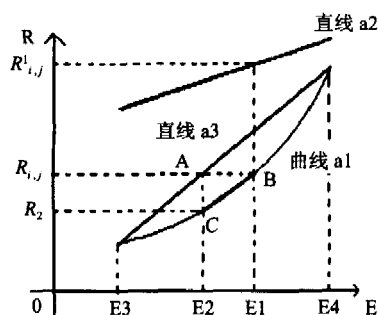


图 1 “曲线一直线”法示意图

Fig. 1 Graphic description of “curve-beeline” correction

$a2$ 为校正后的标准直线, 方程为:

$$R = k \cdot E + v. \quad (5)$$

$a3$ 为连接曲线 $a1$ 首尾两点的直线, 方程为:

$$R = m \cdot E + n. \quad (6)$$

设探测元的实际响应为 $R_{i,j}$, 校正输出为 $R'_{i,j}$,

“曲线一直线”法校正过程如下:

(1) 把 $R_{i,j}$ 代入方程(6), 计算出: $E_2: E_2 = \frac{R_{i,j} - n}{m}$;

(2) 将 E_2 代入方程(4), 计算出 $R_2: R_2 = a + b \cdot E_2 + c \cdot E_2^2$;

(3) 在曲线 $a1$ 的中部附近, 近似地认为 BC 与直线 $a3$ 平行, 则: $E_1 = E_2 + \frac{R_{i,j} - R_2}{m}$;

(4) 将 E_1 代入方程(5), 得到 $R_{i,j}$ 校正后的输出 $R'_{i,j}$, 整理得到:

$$R'_{i,j} = \alpha \cdot R_{i,j}^2 + \beta \cdot R_{i,j} + \gamma, \quad (7)$$

其中: $\alpha = -\frac{kc}{m^3}$, (8)

$$\beta = \frac{2k}{m} - \frac{kb}{m^2} + \frac{2kcn}{m^3}, \quad (9)$$

$$\gamma = -(a+n) \frac{k}{m} + \frac{knb}{m^2} - \frac{kcn^2}{m^3} + v, \quad (10)$$

式(7)即为“曲线一直线”法的校正公式, 其中的参数分别由式(8)~(10)决定.

可以清楚地看到, 校正公式(7)是一个二次多项式, 这样的形式特别利于 DSP 或 FPGA 等硬件的实现.

上述推导过程的第 3 步中有一个约束条件: 在曲线 1 的中部附近. 实际上, 在整个工作范围使用这种近似都是可行的. 校正的精度取决于对 E_1 近似的程度, 对 E_1 近似的误差为: $\Delta E = AC \cdot \frac{1}{m \left(\frac{m}{\Delta} \pm 1 \right)}$, 其

中 m 是大于零的常数, $\Delta = |m - k_{BC}|$, 即直线 $a3$ 和直线 BC 的斜率误差, $AC = -cE^2 + (m-b)E + (n-a)$. 从区间 $E3 - E4$ 的中部向两个端点靠近时, Δ 增大, 导致 $\frac{1}{m \left(\frac{m}{\Delta} \pm 1 \right)}$ 增大, 但 AC 却从一个最大值逐

渐减小至零, 这相当于减弱了平行近似误差 Δ 对 ΔE 的影响. 实际上, 越向曲线两端靠近, AC 对 ΔE 的作用越明显. 在端点附近时, AC 近似为 0, 所以 ΔE 也几乎为 0, 校正精度是非常高的.

图 2 为“曲线一直线”法的校正结果. 曲线 1 和

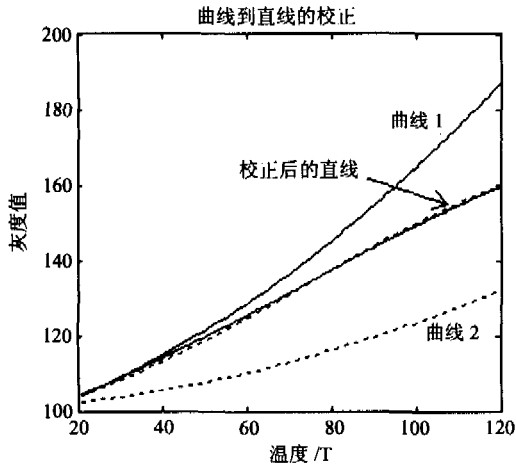


图2 “曲线一直线”法的结果
Fig.2 The result for “curve-beeline” correction

曲线2由文献[6]中两个探测元在(21℃,120℃)区间的实际响应数据拟合得到.可以看到,两条曲线几乎都被校正成了直线,而且两条直线基本重合.在区间中部和两端,校正精度最高,同时也证明了在整个工作区间内使用平行近似条件的可行性.

3 红外图像非均匀性校正的仿真实验及结果

“曲线一直线”法属于标定类方法,在进行非均匀性校正之前,需要对探测器进行定标.在实际操作过程中,可用目标温度 T 代替入射辐射通量 E ,像素灰度值 P 代替输出响应 R ^[6].用以下步骤仿真生成定标数据:

(1) 根据文献[6]中的探测元响应数据,在(21℃,120℃)的温度范围内,拟合得到一个二次多项式(图2中的曲线1).方程为: $P = a + b \cdot T + c \cdot T^2$.以此方程作为响应基本模型.

(2) 按照正态分布,在参数 a, b, c 上分别叠加一个随机数,得到每个探测元的二次曲线,并在此二次曲线上叠加一个正态分布的随机数,建立各个探测元的响应特性模型.

(3) 取37℃,53℃,72℃,93℃,112℃5个测试点,利用步骤(2)得到的各探测元响应函数,生成5幅未校正的原始图像,实验图像大小为200×200.

(4) 取5个定标点(21℃,46℃,71℃,96℃,120℃),利用步骤(2)得到的各探测元响应函数,为每个探测元生成5组定标数据.

对探测器进行定标之后,用“曲线一直线”法对五幅原始图像进行校正.具体步骤如下:

(1) 预处理.对每个探测元的5组定标数据进

行最小二乘拟合,得到每个探测元的 $a_{i,j}, b_{i,j}, c_{i,j}$ 参数.并根据式(8)~(10)得到每个探测元的 $\alpha_{i,j}, \beta_{i,j}, \gamma_{i,j}$ 3个参数,存储此3个参数,用于实时校正.

(2) 校正.对五幅原始图像的每个图像数据作式(7)的计算,得到校正输出.

表1列出了五幅原始图像的非均匀度,以及使用两点法,分段校正法与使用“曲线一直线”法的对比.

非均匀度的定义为:
$$U = \frac{1}{\langle R \rangle} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i,j} (R_{i,j} - \langle R \rangle)^2}{i \cdot j}}$$

由表1可以看出,“曲线一直线”法的校正精度较两点法有大幅度提高,同时也优于分段校正法,所需存储的参数个数也比分段校正法少.

图3为温度在72℃时,两点法,分段校正法和“曲线一直线”法校正的仿真结果图像.(注:为便于

表1 不同方法的非均匀性
Table 1 Nonuniformity for different methods

	37℃	53℃	72℃	93℃	112℃	平均值	需存储的参数 个数/探测元
校正前	3.62%	4.94%	6.48%	8.13%	9.56%	6.55%	
两点法	0.86%	1.18%	1.2%	0.85%	0.37%	0.89%	2
分段校正 (两个区间)	0.54%	0.50%	0.34%	0.34%	0.27%	0.40%	5
“曲线一直 线”法	0.60%	0.51%	0.29%	0.29%	0.22%	0.38%	3

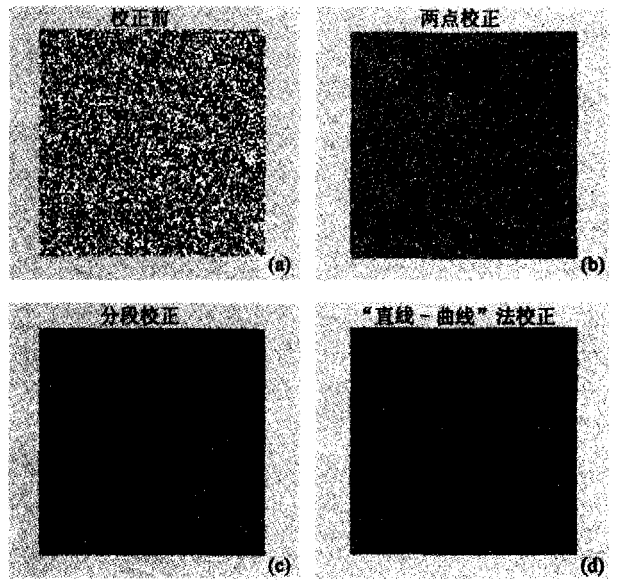


图3 几种非均匀性校正结果的对比 (a)校正前图像 (b)两点法校正后的图象 (c)分段(两个区间)校正后的图象 (d)“曲线一直线”法校正后的图象

Fig.3 Comparison of results for nonuniformity corrections (a) image before correction (b) image for twopoint correction (c) image for piecewise-linear correction(2 intervals) (d) image for “curve-beeline” correction

对比,将各图的非均匀度放大了8倍,并作了归一化处理)

4 结论

非均匀校正技术是红外焦平面成像仪的关键技术之一.考虑到实际探测元的非线性特性,文中提出了“曲线一直线”法对其进行校正.由于是直接对曲线进行校正,所以精度很高.从仿真实验的结果可以看出,“曲线一直线”法的校正精度优于分段校正,所需存储的校正参数更少.与两点校正法相比,精度有大幅度提高.同时,校正公式形式简单,特别利于DSP或者FPGA等硬件的实现,计算量较两点校正法并没有增加多少,完全可以满足实时性要求,具有较高的实用价值.

REFERENCES

- [1] LIU Shuang, NING Yong-Gong, CHEN Ai, *et al.* Formation of ultra-thin PtSi film by vacuum annealing[J]. *Vacuum*, 2002, **65**(2):33—136.
- [2] XU Tian-Hua, ZHAO Yi-Gong. Analysis of scene-based techniques for nonuniformity correction of infrared focal plane arrays[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (徐田华,赵亦工.基于场景的红外焦平面非均匀校正技术分析. *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(4):257—261.
- [3] Xing Su-Xia, Zhang Jun-Jv, Sun Lian-Jun, *et al.* Two-point nonuniformity correction based on LMS[C]. *SPIE*, 2005, **5640**:130—136.
- [4] SHI Yan, ZHANG Tian-Xu, LI Hui, *et al.* New approach to nonuniformity correction of IRFPA with nonlinear response[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (石岩,张天序,李辉,等.一种考虑红外焦平面器件非线性响应的非均匀性校正方法. *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(4):251—256.
- [5] WANG Yu, CHEN Qian, YIN De-Kui, *et al.* Real-time nonuniformity correction technique for infrared image[J]. *J. Infrared Millim. 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.
- [6] HU Gui-Hong, CHEN Qian, SHEN Xiao-Yan. Research on the nonlinearity of infrared focal plane arrays[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser* (胡贵红,陈钱,沈晓燕.红外焦平面探测器响应非线性测定. *光电子·激光*), 2003, **14**(5):489—492.
- [7] SHI Yan, MAO Hai-Gen, ZHANG Tian-Xu, *et al.* New approach of IRFPA non-effective pixel discrimination based on pixel's characteristics histogram analysis[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (石岩,毛海岑,张天序,等.一种新的基于特征直方图分变的红外焦平面阵列无效像元判别方法. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(2):119—123.
- [8] ZHANG Tian-Xu, SHI Yan. Eliminating the “ghosting” artifact and target fade-out in adaptive nonuniformity correction for IRFPA[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张天序,石岩.红外焦平面阵列非均匀性自适应校正算法中目标退化与伪像的消除方法. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(5):335—340.