

一种改进的红外焦平面非均匀多点校正方法

黄星明, 余国文, 王宏远

(华中科技大学 电子与信息工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要: 红外焦平面阵列普遍存在非均匀性问题, 国内外已经提出众多解决该方法, 其中最有价值的是两点非均匀校正法。在分析两点校正法的基础上, 结合红外焦平面阵列非均匀模型, 提出一种改进的多点非均匀性校正算法并给出其实现方法。该方法动态范围大, 能有效克服由红外焦平面探测单元的非线性响应特性带来的均匀性影响, 并且具有校正精度高、处理速度快和易于实时处理等优点。工程中已经证明该方法的有效性。最后给出了工程结果。

关键词: 红外焦平面; 非均匀性; 多点校正

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)01-0062-04

Imaging multi-point nonuniformity correction method for IRFPA

HUANG Xing-ming, YU Guo-wen, WANG Hong-yuan

(Electronics & Information Engineering Department, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Nonuniformity exists in all IRFPA. Lots of nonuniformity correction methods have been developed to solve the problem. One of the most valuable methods is two-point correction algorithm. Based on the analysis of two-point correction algorithm, an improved multi-point algorithm is put forward and its implementation is also discussed. This algorithm has large dynamic range to effectively overcome nonuniformity brought by nonlinear characteristic of IRFPA detector units. And it has the advantages of high precision, fast processing speed, and easy to realize in real time. Its effectiveness is demonstrated in engineering. The experimental results are given in the end.

Key words: IRFPA; Nonuniformity; Multi-point correction

0 引言

红外焦平面阵列(IRFPA)是现代红外成像系统的核心器件,与上一代红外成像系统相比,红外焦平面阵列以凝视方式工作,不需要运动的光学元件对景物进行一维或二维光机扫描。因此具有结构简单、工作稳定、灵敏度高、噪声等效温差小等优点。然而由于制造材料、工艺以及工作环境等方面的原因,红外焦平

面阵列普遍存在非均匀性问题。非均匀性表现为在相同的辐射通量照射下,IRFPA各探测单元输出响应不同,又称为空间噪声^[1]。

非均匀性校正技术已经成为绝大多数红外焦平面成像仪所必须的关键技术之一。目前,非均匀校正技术主要分为基于红外参考源的校正;基于场景的实时校正参数漂移技术^[2,3]。校正方法主要有两点校正法、多点校正法、恒定统计平均法、时域高通滤波法和

收稿日期:2004-02-01; 修订日期:2004-03-18

作者简介:黄星明(1978-),男,湖北武汉人,硕士生,研究方向为数字视频及红外成像技术。

人工神经网络法等。其中应用最广泛的方法是两点校正算法。该算法具有简单、易实现的特点,但存在校正精度低、动态范围小等缺点。本文提出一种改进的多点非均匀性校正方法,可以有效地克服两点校正法的缺陷。

1 红外焦平面阵列的响应模型^[4]

在假设红外探测器为线性响应的情况下,IRFPA中第 (i,j) 个探测单元的响应可以表示为:

$$x_{ij}(\phi) = K_{ij}\phi + Q_{ij} \quad (1)$$

式中 ϕ 为探测单元的辐照度; K_{ij} 为探测单元响应特性的增益系数或特性曲线的斜率; Q_{ij} 为暗电流形成的偏移量或特性曲线的截距。红外焦平面阵列的非均匀性是由于各探测单元的 K_{ij} 和 Q_{ij} 不同所造成的,如图 1(a)所示。而实际上,红外焦平面阵列的各探测单元响应特性呈非线性,其响应特性曲线如图 1(b)所示。图中,曲线 a 、 b 、 c 分别代表三个不同探测单元的响应特性曲线。在相同辐照度 ϕ_1 时,探测单元输出响应不同,因此造成红外焦平面的非均匀特性。

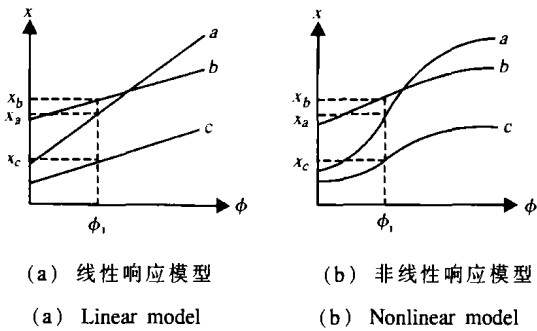


图 1 红外焦平面探测单元的响应模型

Fig.1 Response model of IRFPA detector unit

2 非均匀性两点和多点校正算法

两点校正法是最早展开研究和应用最为广泛的一种校正方法。如果焦平面阵列各单元的响应特性在一定范围内呈线性变化,且时间上是稳定的,则焦平面各探测单元的响应特性可以用公式(1)表示。非均匀性是由每个探测单元的 K 和 Q 之间的差异造成的,因此可以采用下式加以校正^[5-7]:

$$y_{ij}(\phi) = G_{ij} x_{ij}(\phi) + O_{ij} \quad (2)$$

式中 G_{ij} 和 O_{ij} 分别为校正增益和校正偏移; y_{ij} 为校正后的输出。通过公式(2),可以对由公式(1)建立的IRFPA 响应模型进行非均匀性校正。

根据场景的变化范围,在光路中插入一均匀辐射的黑体,通过各探测单元对高温 T_H 和低温 T_L 下的均匀辐射黑体的响应计算出 G_{ij} 和 O_{ij} , 从而实现非均匀性校正。将所有探测单元在高温 T_H 和低温 T_L 下的响应规格化为 V_{T_H} 和 V_{T_L} :

$$V_{T_H} = G_{ij} x_{ij}(\phi_{T_H}) + O_{ij} \quad (3)$$

$$V_{T_L} = G_{ij} x_{ij}(\phi_{T_L}) + O_{ij} \quad (4)$$

校正增益和校正偏移量则可以用下式计算:

$$G_{ij} = \frac{V_{T_H} - V_{T_L}}{x_{ij}(\phi_{T_H}) - x_{ij}(\phi_{T_L})} \quad (5)$$

$$O_{ij} = \frac{V_{T_H} x_{ij}(\phi_{T_L}) - V_{T_L} x_{ij}(\phi_{T_H})}{x_{ij}(\phi_{T_L}) - x_{ij}(\phi_{T_H})} \quad (6)$$

响应规格化取值可以使用焦平面阵列响应的平均值。分别对高温 T_H 下响应 $x_{ij}(\phi_{T_H})$ 和低温 T_L 下的响应 $x_{ij}(\phi_{T_L})$ 求平均,得:

$$\bar{X}_{T_H} = \frac{\sum_i \sum_j x_{ij}(\phi_{T_H})}{i \times j} \quad (7)$$

$$\bar{X}_{T_L} = \frac{\sum_i \sum_j x_{ij}(\phi_{T_L})}{i \times j} \quad (8)$$

令:

$$V_{T_H} = \bar{X}_{T_H}, V_{T_L} = \bar{X}_{T_L} \quad (9)$$

用公式(5)、(6)、(9)校正,即以点 $(x_{ij}(\phi_{T_H}), \bar{X}_{T_H})$ 与点 $(x_{ij}(\phi_{T_L}), \bar{X}_{T_L})$ 确定的直线作为 (i,j) 探测单元的校正曲线。

由以上可知,两点校正算法对输出响应的偏差和增益系数都进行了校正,因此,具有较高的精度。尤其是在 IRFPA 响应特性接近线性时,两点校正法是最优的校正算法之一。然而两点校正法是基于探测单元在工作范围内响应呈线性这个假设,实际上探测单元响应为非线性,如图 1(b)所示。当工作范围发生变化时,探测单元响应特性的非线性变得突出,校正曲线与实际响应曲线差别增大,如图 2(a)所示。此时两点

校正算法基于的响应模型不再成立,两点校正法的精度显著下降。

多点校正算法是两点校正算法的扩展。一般认为探测单元响应特性曲线呈 S 形状。多点校正法将探测单元的响应特性曲线合理分成若干段,每段分别使用两点校正算法,如图 2(b)所示。图中用线段 1、2、3 表示该探测单元的响应曲线,和图 2(a)相比,用折线段可以更加逼近实际探测单元响应特性曲线,且分段越多,其校正误差越小。

多点校正算法在实现时,可以较好地解决两点校正算法动态范围小的缺点,然而却增加了系统负担。本文提出一种改进多点校正算法,并在此基础上给出实现方法。

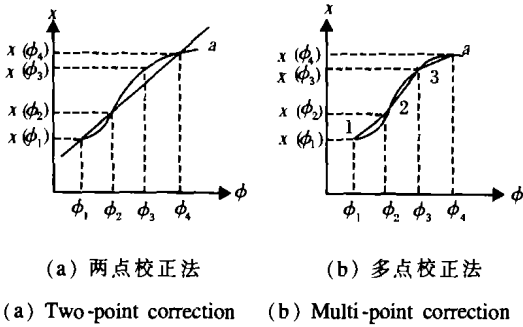


图 2 校正曲线

Fig.2 Correction curve

3 改进的多点校正法及实现

传统的两点或者多点校正算法实现时,都需要预先计算各探测单元的校正增益 G_{ij} 和校正偏移 O_{ij} ,然后把 G_{ij} 和 O_{ij} 存储到相应的存储单元。实际运算时将会把 G_{ij} 和 O_{ij} 放到 RAM 中进行高速运算。

然而,大多数情况下红外成像仪工作环境温度相差不会太大,即工作时焦平面探测单元具有较好的线性。如果可以实时计算当前工作环境两点校正法中的校正参数,就可以取得很好的校正效果。基于这种考虑,采用以下两点校正公式:

$$y_{ij}(\phi) = [x_{ij}(\phi) - B_{ij}] \times K_{ij} \quad (10)$$

式中 K_{ij} 和 B_{ij} 分别为校正增益和校正偏移; y_{ij} 为校正后的输出。

设探测单元在高温 T_H 下的响应 $x_{ij}(\phi_{T_H})$ 和低温 T_L 下的响应 $x_{ij}(\phi_{T_L})$ 为:

$$\bar{\Delta} = \frac{\sum_i \sum_j x_{ij}(\phi_{T_H}) - x_{ij}(\phi_{T_L})}{i \times j} \quad (11)$$

则

$$K_{ij} = \frac{\bar{\Delta}}{x_{ij}(\phi_{T_H}) - x_{ij}(\phi_{T_L})} \quad (12)$$

B_{ij} 为低温 T_L 、辐照度均匀情况下,红外焦平面的多场平均响应 $\overline{x_{ij}(\phi_{T_L})}$ 。

根据公式(10)~(12)实现非均匀性校正过程如图 3 所示。

(1) 根据成像仪将要工作的温度范围,将响应特性曲线划分为几段,划分温度为 T_1, T_2, T_3, T_4 等,取其探测单元的响应 $x_{ij}(\phi_{T_1}), x_{ij}(\phi_{T_2}), x_{ij}(\phi_{T_3}), x_{ij}(\phi_{T_4})$

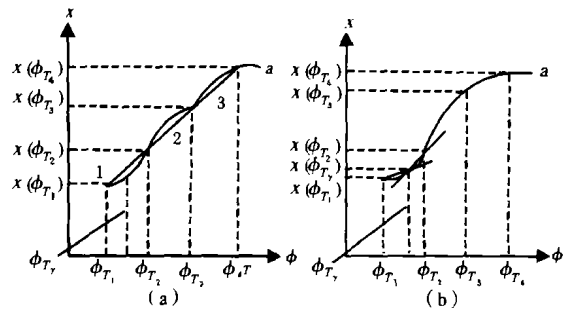


图 3 改进校正法示意图

Fig.3 Improved multi-point correction method

作为校正参数存入系统存储单元内。为了减小误差,可以采取多幅图像平均的方法作为该校正参数。

(2) 成像仪工作前,首先需要进行非均匀性校正预处理。采集 N 幅均匀辐照度的图像,假设辐射温度为 T_τ ,计算每个探测单元的平均响应值:

$$\overline{x_{ij}(\phi_{T_\tau})} = \frac{\sum_N |x_{ij}(\phi_{T_\tau})|}{N} \quad (13)$$

将 $\overline{x_{ij}(\phi_{T_\tau})}$ 作为另一组校正参数存放在内存中。

(3) 分别把 T_1, T_2, T_3, T_4 与 T_τ 比较(实际是比较红外焦平面在 T_1, T_2, T_3, T_4 和 T_τ 的平均响应),取 T_λ ($\lambda=1, 2, 3, 4$),使 $|T_\lambda - T_\tau|$ 最小,由 T_λ 与 T_τ 组成高温 T_H 和低温 T_L 。

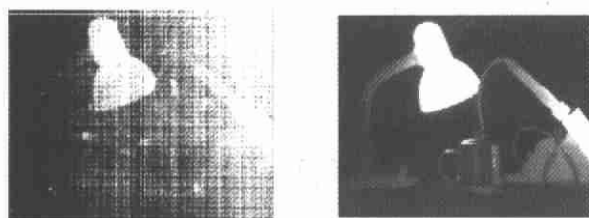
(4) 利用预先存储的一组数据和步骤(2)中获得的一组数据计算增益 K_{ij} 和偏移 B_{ij} 。

(5) 利用公式(10)进行实时校正。

图 3(b)中在 ϕ_{T_1} 和 ϕ_{T_2} 之间插入一个 ϕ_{T_τ} 。根据步

骤(3)选取 T_1 作为低温 T_L , T_2 作为高温 T_H , 在温度 T_1 和 T_2 之间进行两点校正。 T_1 温度下红外焦平面阵列的响应 $x(\phi_{T_1})$ 在成像仪工作预处理时获取。 T_2 温度下红外焦平面阵列的响应 $x(\phi_{T_2})$ 则预存在相应存储单元中。和图 2(b) 比较, 图 3(b) 所示折线段可以更加逼近探测单元响应特性曲线, 因此可以达到更高的精度。图 2(b) 需要预存六组校正参数才能满足三段校正, 而图 3(b) 只需预存四组数据就可以满足六段校正的精度。

上述校正算法, 需要在成像仪工作前获取当前工作环境中 IRFPA 对均匀辐照度的响应, 增加了操作的复杂性。然而却可以在不同环境中获得十分逼近 IRFPA 响应特性曲线的校正系数, 显著提高校正效果。图 4 为采用改进的多点非均匀校正法校正前后的红外图像对比。



(a) 校正前图像

(b) 校正后图像

(a) Image before nonuniformity correction (b) Image after nonuniformity correction

图 4 改进的多点校正法校正前后的图像

Fig.4 IR images before and after nonuniformity correction using improved multi-point correction method

4 结论

非均匀性校正是红外焦平面成像仪关键技术之

一。本文提出了一种改进的多点校正算法以及其实现方法。该算法及实现方法具有下列特点:

(1) 校正精度高, 动态范围大, 显著提高了 IRFPA 的均匀性。

(2) 算法简单, 在线运算量小, 易于工程实现。

本文提出方法的优点已经在红外成像仪工程中得到充分验证, 其优点远远超过该方法操作复杂性带来的缺点。目前, 国内外专家和工程师们的重心依然是完善和改进两点校正法。任何行之有效的两点校正法都可以使用本文的方法实现, 并能增强校正效果。

参考文献:

- [1] Mooney J M, Shepherd F D. Characterizing IRFPA nonuniformity and IR camera spatial noise[J]. Infrared Physics and Technology, 1996, 37: 595-605.
- [2] Harris John G, Chiang Yu-Ming. Nonuniformity correction of infrared image sequences using the constant-statistics constraint[J]. IEEE Transactions On Image Processing, 1999, 8(8):1148-1151.
- [3] 付小宁, 殷世民, 刘上乾. 基于系统非线性的红外焦平面非均匀性校正[J]. 光子学报, 2002, 31(10):1277-1280.
- [4] 殷世民, 刘上乾. 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(6):715-718.
- [5] 胡晓梅. 红外焦平面探测器的非均匀性与校正方法研究[J]. 红外与激光工程, 1999, 28(3):9-12.
- [6] 陈锐, 谈新权. 红外图像非均匀性校正方法综述[J]. 红外技术, 2002, 24(1):1-3.
- [7] 陈宝国, 郑志伟, 黄士科, 等. 利用 FPGA 实现红外焦平面的非均匀性校正[J]. 红外与激光工程, 2000, 29(4):9-12.

书 讯

《熵与信息光学》简介

《熵与信息光学》由美籍华人杨振寰教授著、哈尔滨工业大学陈历学教授、宋瑛林教授等人翻译、《红外与激光工程》编辑部编辑、天津科学技术出版社出版。内容包括: 信息传输导论; 衍射与信号分析; 光学空间信道与编码原理; 熵与信息; 伏魔师与熵耗费; 观测和信息; 像恢复与信息; 信息传播的量子效应; 光学相干理论; 光学小波变换; 光学模式识别; 光学计算和纤维光学通信。

全书共计 20 余万字, 314 页, 定价 46 元。有需求者请与《红外与激光工程》编辑部联系, 电话: (022)23009840。