

双通道分频段恒定统计非均匀性校正算法

季尔优, 顾国华, 陈 钱, 柏连发, 隋修宝

(南京理工大学近程高速目标探测技术国防重点学科实验室, 南京理工大学光电技术系, 江苏 南京 210094)

摘要:针对基于定标的两点校正算法无法克服焦平面温漂效应和基于场景的恒定统计算法存在的鬼影现象,在对现有的算法进行了分析的基础上,提出了一种改进的恒定统计非均匀性校正算法。该算法在两点校正的基础上,对图像进行双通道分频段处理,并通过对场景运动状态的判断,有选择性地更新统计参数,最后完成非均匀性校正。实验结果表明,和传统的非均匀性校正算法相比,该算法可以有效地消除红外焦平面温漂效应带来的影响,抑制基于场景的非均匀性校正算法带来的鬼影现象。

关键词:非均匀性校正;恒定统计算法;鬼影抑制;运动检测;分频段处理

中图分类号:TN216;TP391 **文献标识码:**A

Dual channel constant statistic NUC algorithm of separate band

JI Er-you, GU Guo-hua, CHEN Qian, BAI Lian-fa, SUI Xiu-bao

(Ministerial Key Laboratory of JGMT, Nanjing University of Science and Technology Department of Optics and Electronics, NJUST, Nanjing 210094, China)

Abstract: An improved constant statistic NUC algorithm has been presented in this paper. This new NUC algorithm overcomes the shortages of temperature shifting effect on the FPA using the two-point correction method and the ghost phenomenon in the constant statistic correction based on the scene. This algorithm separates the raw images into different bands and two channels, selectively updates the correction parameters and completes the whole process of the NUC by means of the judgment of the scene's movement. The experimental data shows that this algorithm can effectively eliminate the temperature shifting effect of the FPA and suppress the ghosting phenomenon caused by the NUC algorithm based on the scene.

Key words: non-uniformity correction; constant statistics algorithm; ghost suppression; motion detection; separate band processing

1 引言

在红外成像系统中,相比传统的探测器件,红外焦平面器件越来越体现出巨大优势,逐渐成为红外器件发展的主流。但是,由于工艺上的限制,不可避免地存在探测器单元之间存在着响应特性的不一致,也就是非均匀性^[1]。红外成像系统的性能受阵列中探测器单元的空间非均匀性的影响非常强,使得获取的图像模糊不清、畸变,甚至使传感器失去探测的能力,更为严重的是空间非均匀性随时间缓慢变化,这已经成为限制其在军事和民用方面应用的严

重问题^[2]。所以目前所有的红外成像系统在能够使用之前都必须进行非均匀性校正。

目前的非均匀性校正的方法分为两类,一类是基于定标的方法^[3-4],一类是基于场景的方法^[5-6]。基于定标的方法主要有一点校正和两点校正,现在已经发展出多点校正的方法。基于定标的方法的优

基金项目:南京理工大学自主科研专项计划项目(No. 2010ZDJH12)资助。

作者简介:季尔优(1984-),男,博士研究生,主要从事红外弱小目标搜索跟踪及红外图像处理算法研究。E-mail:jieryou@163.com

收稿日期:2010-10-23;**修订日期:**2010-12-09

点是在红外成像系统设计的时候,测量出定标的各种参数,并将这些参数固化到系统里面,在平时使用的过程中直接调用校正就可以。定标的方法简单、计算量低。缺点是探测器在使用的过程中都会有温漂效应的,温漂会使得原有的校正参数失效,最终影响非均匀性校正的效果。基于场景的方法主要有时域高通滤波法、神经网络法和恒定统计法等。基于场景的方法能有效地克服温漂效应,但是基于场景的非均匀性校正的前提是场景在不断地运动。当红外成像系统静止不动时,会误将场景当作非均匀性噪声进行统计,红外成像系统再次运动后,便会在图像中留下“鬼影”^[7]。

为了克服探测器温漂和鬼影现象的影响,本文提出了一种双通道分频段恒定统计非均匀性校正算法,该算法在两点校正的基础上,对图像进行双通道分频段处理,并通过对场景运动状态的判断,有选择性地对统计参数的更新,最后完成非均匀性校正。

2 红外焦平面阵列的线性响应模型

一般假设探测元在一定温度范围内作线性响应,即传感器将目标场景的信号变量 x (辐照度) 通过线性响应转化为测量值 y (灰度值)。第 i 行 j 列和探测元的响应模型可以写为:

$$y_{ij}(t) = G_{ij}(t)x_{ij}(t) + O_{ij}(t) \quad (1)$$

式中, $G_{ij}(t)$ 是探测元响应特性的增益系数; $O_{ij}(t)$ 是偏移系数^[8-9]。

3 传统的非均匀性校正算法

3.1 两点校正算法

在 20 世纪 70 年代, W. M. Helfrich 提出了经典的两点校正算法,直到如今,两点校正算法在工程领域得到了广泛的应用。该算法需要至少两个不同温度的黑体进行标定,假设高温黑体和低温黑体对应的探测器输出分别为 $y_{ij}^H(n, t)$ 和 $y_{ij}^L(n, t)$ 。根据高温黑体和低温黑体的输出 $y_{ij}^H(n, t)$ 和 $y_{ij}^L(n, t)$ 计算其分别对应的均值 \bar{y}^H 和 \bar{y}^L , 将均值作为校正后的高低黑体的响应值,由此计算得到增益系数 G_{ij} 和偏移系数 O_{ij} 。

最后由公式(2)完成校正:

$$x_{ij}(n) = (y_{ij}(n) - O_{ij}) / G_{ij}(n) \quad (2)$$

可以看出,由于两点校正算法使用固定参数进行非均匀性校正,当红外焦平面的增益和偏移随时间和温度的变化发生漂移后,参数并未得到有效更新,因此会产生校正后的残余非均匀性噪声。

3.2 恒定统计算法

恒定统计算法是一种比较经典的非均匀性校正

算法,又称 CS 算法,是通过对实际场景值的分布进行假定,采用统计学的处理方法估计探测器的响应参数,从而对非均匀性进行校正。该算法建立在如下假设之上:①每个探测器单元的输出信号的统计平均值是恒定的;②输入到每个探测器单元的输入信号的统计方差都相等^[10]。

对于红外焦平面阵列的线性响应模型:

$$y_{ij}(t) = G_{ij}x_{ij}(t) + O_{ij} \quad (3)$$

焦平面阵列的输出信号 $y(t)$ 的均值和方差可写成:

$$m_{y_{ij}} = E[y_{ij}] = G_{ij}m_{x_{ij}} + O_{ij} \quad (4)$$

$$\sigma_{y_{ij}}^2 = \text{var}[y_{ij}] = G_{ij}^2\sigma_{x_{ij}}^2 \quad (5)$$

根据恒定统计算法的假设,可以认为目标场景的信号变量 x_{ij} 的均值为零(即 $E(x_{ij}) = 0$)且方差为 1(即 $\sigma_{x_{ij}} = 1$),因此可以根据式(4)和式(5)得:

$$O_{ij} = E[y_{ij}] = m_{y_{ij}} \quad (6)$$

$$G_{ij} = \frac{\sigma_{y_{ij}}}{\sigma_{x_{ij}}} = \sigma_{y_{ij}} = s_{y_{ij}} \quad (7)$$

这里,红外焦平面阵列的输出 y_{ij} 的均值和方差可以通过式(8)和式(9)得到:

$$\hat{m}_{y_{ij}}(n) = \frac{y_{ij}(n) + (n-1) \cdot \hat{m}_{y_{ij}}(n-1)}{n} \quad (8)$$

$$\hat{s}_{y_{ij}}(n) = \frac{|y_{ij}(n) - \hat{m}_{y_{ij}}(n)| + (n-1) \cdot \hat{s}_{y_{ij}}(n-1)}{n} \quad (9)$$

该算法完全基于场景,同时对增益和偏移进行校正,稳定性好。但当红外成像系统不动或缓慢运动时,会误将场景当作非均匀性噪声进行统计,当红外成像系统再次运动时,便会在原来位置留下该场景目标的反像,形成鬼影。

4 双通道分频段恒定统计校正算法

4.1 场景的运动状态检测

在恒定统计算法中,由于鬼影现象是由成像系统长时间静止造成的,因此是否对场景的运动状态进行的检测关系到算法效果的好坏。检测图像运动的最常用的方法是检测两帧图像的差:

$$d(n) = y(n) - y(n-1) \quad (10)$$

式中, $y(n)$ 为 n 时刻的图像序列。如果不考虑图像序列中存在的时域噪声,当图像运动时,两帧图像差 $d(n)$ 为非零实数。然而由于在实际系统中,时域噪声总是存在的,因此必须给 $d(n)$ 设置一个合适的域值来区分随机噪声的起浮还是实际的运动。域值的确定我们通过式(11)的递推关系得到:

$$\begin{cases} T_0 = \infty \\ T_i = \min \{ T_{i-1}, \text{var}(d(n)) \} \end{cases} \quad (11)$$

当 $\text{var}(d(n)) > 1.2 \cdot T_i$ 可以认为场景发生了运动。

4.2 统计参数的更新

场景的运动检测方法可以有效地阻止场景静止时统计参数的更新。然而,在实际中即使场景在运动,仍然有可能产生我们不希望看到的鬼影现象。产生这种现象的原因在于场景中某些大面积且缺乏细节特征的目标或者存在灰度突变的边缘。这里我们采用可变参数更新率来解决这一问题。

$$\alpha_{\text{learn}} = \begin{cases} \alpha_1, & d_{ij}(n) < 1.2 \cdot \hat{s}_{y_{ij}}(n) \\ \alpha_2, & 1.2 \cdot \hat{s}_{y_{ij}} \leq d_{ij}(n) \leq 2.5 \cdot \hat{s}_{y_{ij}}(n) \\ \alpha_3, & d_{ij}(n) > 2.5 \cdot \hat{s}_{y_{ij}}(n) \end{cases} \quad (12)$$

式中, α_1 为场景中在大面积且缺乏细节特征的目标时的更新速率; α_2 为正常的更新速率; α_3 为场景中在大面积且缺乏细节特征的目标时的更新速率,且 $\alpha_2 > \alpha_1$, $\alpha_2 > \alpha_3$ 。

引入参数改变更新率后将式(6)、式(7)改写成:

$$\begin{cases} O_{ij}(n) = \alpha_{\text{learn}} \cdot \hat{m}_{y_{ij}}(n) + (1 - \alpha_{\text{learn}}) \cdot O_{ij}(n-1) \\ G_{ij}(n) = \alpha_{\text{learn}} \cdot \hat{s}_{y_{ij}}(n) + (1 - \alpha_{\text{learn}}) G_{ij}(n-1) \end{cases} \quad (13)$$

通过这种更新方式,可以调整那些变化幅度与正常变化趋势差异较大的像素的参数更新速率,在这种情况下降低或停止它们的更新。在实际应用中, α_2 为正常的更新速率,值应当为1或略小于1;同时为了使算法的收敛速度尽可能快,在不影响统计值的情况下尽可能大,这里取 $\alpha_1 = 0.01$, $\alpha_2 = 0.95$, $\alpha_3 = 0.3$ 。

4.3 双通道分频段处理方法

通过根据判断场景的运动状态,选择性地更新统计参数的方法,可以有效地消除场景静止和场景内灰度突变带来的影响。这种方法对于图像细节丰富的场景统计参数的更新时收敛速度快,而对于缺乏细节的场景统计参数的更新时收敛速度较慢。在实际场景中这两种情况同时存在,若不加区别地进行统计参数更新,必然导致算法整体收敛速度较慢,细节丰富的区域因参数未及时更新而影响校正效果。我们可以看出这两类场景的最大区别在于图像

的空间频率不同,根据恒定统计法的假设,细节丰富的图像空间频率较高,算法对于这类图像收敛速度较快,只需要场景有较小的移动就能完成校正;而缺乏细节图像空间频率较低,为了确保统计的正确性,需要大量的运动和缓慢的更新速率。为此我们需要将这两类场景根据空间频率的不同分开进行处理。

首先,使用一维低通滤波模板对输入图像进行行列滤波,得到低频图像。低通滤波模板为空间域一维低通滤波器,滤波器的截止频率可由图像中空间域的高频成分决定,由于红外焦平面阵列的随着温度的漂移主要表现出来的高频成分为横竖条纹状的高频非均匀性噪声,因此可以根据图像中条纹非均匀性的空间频率来决定低通滤波器的上限截止频率,在实际应用中如果低通滤波器的上限截止频率过高,则会将部分非均匀性噪声作为图像的低频分量,由于低频分量的更新速率较低,因此图像中会有部分残余的非均匀性噪声得不到及时的校正。这里我们使用 MATLAB 中的 FIR 设计工具设计了一个9节点,截止频率为 $2\pi/9$ rad/sample 的 FIR 低通滤波器模板:

$$L = \{0.115, 0.089, 0.1091, 0.12337, 0.12828, 0.123, 0.1091, 0.089, 0.115\} \quad (14)$$

然后,从原始图像中减去低频图像得到高频图像。分别对这两类图像进行统计参数的更新,这样高频图像使用较高的更新速率,而低频图像使用较低的更新速率,得到 O_{ij}^{high} , G_{ij}^{high} 和 O_{ij}^{low} , G_{ij}^{low} 。最后将两类图像统计得到的参数相加,用于对输入图像的校正。

即:

$$\begin{cases} O_{ij} = O_{ij}^{\text{high}} + O_{ij}^{\text{low}} \\ G_{ij} = G_{ij}^{\text{high}} + G_{ij}^{\text{low}} \end{cases} \quad (15)$$

由于高频图像的更新速率较高,统计参数受时域动态噪声影响较大,因此在计算 O_{ij}^{high} 和 O_{ij}^{low} 之前,应当先消除动态噪声。时域均值滤波不会和恒定统计法产生任何的冲突,公式(16)为时域均值滤波算法:

$$Y(t) = 0.8 \times Y(t-1) + 0.2 \times y(t) \quad (16)$$

其中, $y(t)$ 为输入图像序列。

由于非均匀性噪声主要表现为高频噪声,且低频非均匀性噪声对图像质量影响很小,因此在非均匀性校正时可以优先校正高频非均匀性,降低对低频非均匀性校正的优先级。通过以上方式,只要场景有一点运动高频非均匀性噪声就能得到很快地消除,而低频非均匀性噪声需要较长的时间消

除,但由于低频噪声对图像质量影响较小,可以使用较低的优先级进行校正。最后为了减少算法的收敛时间,我们在进行基于场景的校正前先进行两点校正。

4.4 双通道分频段恒定统计校正算法的具体实现

首先,使用高低温黑体对探测器进行标定,计算基于定标的增益和偏移系数。然后根据公式(2)进行两点校正。

接着,对两点校正之后的图像进行运动状态检测。如果场景不存在运动就使用原先的统计参数进行校正;如果场景发生了运动需要在更新原先的统计参数后进行校正。对统计参数的更新需要将图像根据空间频率的不同分解成为高频图像和低频图像。对于低频图像直接更新其增益和偏移系数 G_{ij}^{low} 和 O_{ij}^{low} ;对于高频图像先对其进行时域滤波,再更新其增益和偏移系数 G_{ij}^{high} 和 O_{ij}^{high} ,最后将低频系数和高频系数相加后对输入图像进行校正。综上所述本文提出的改进算法的流程图如图 1 所示。

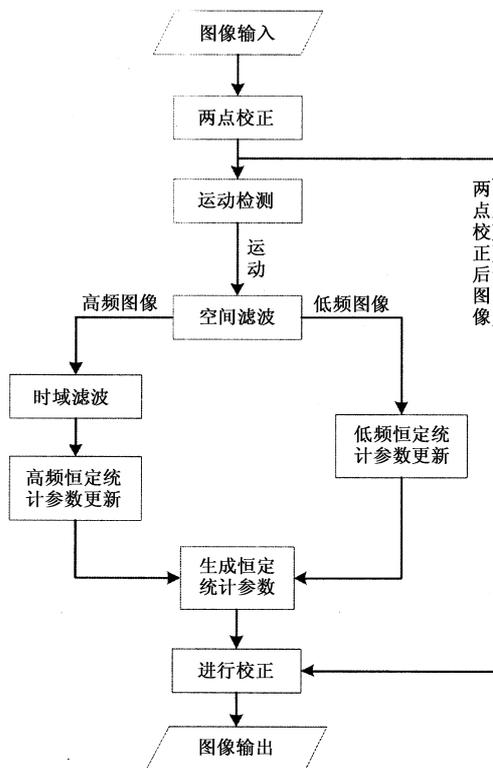


图 1 改进算法的流程图

Fig. 1 flowchart of the improved CS algorithm

5 实验效果与分析

利用某像元数为 320×256 的非制冷型红外热像仪作为信号输入源,在 EVMDM642 图像开发平台上进行算法验证,在场景没有运动时,从图像输入到完成校正需要 14 ms 左右时间;在场景发生运动时,

从图像输入到完成校正需要 133 ms 左右的时间,在实际应用中,可将算法移植入 FPGA 中,通过硬件并行流水线方式实现,以达到实时处理的效果。图 2 (a)为原始图像,由于非均匀性的存在,无法从原始图像中看到场景;图 2(b)为原始图像经过两点非均匀性校正之后热像仪长时间工作之后的图像;图 2 (c)为经过恒定统计法校正之后的图像;图 2(d)为经过本文算法校正之后的图像。

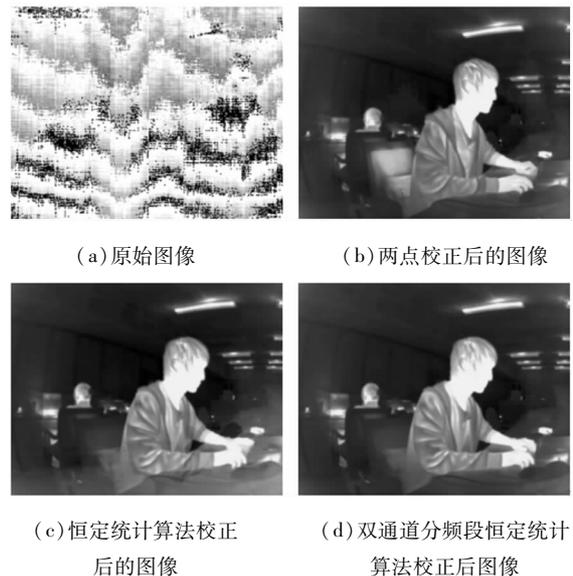


图 2 非均匀性校正实验结果

Fig. 2 experimental results of non-uniformity corrections

从图 2(b)中可以看出,两点校正可以很好地校正原始图像中的非均匀性,但受红外焦平面温漂效应影响,在校正后工作一段时间由于温漂效应的存在,校正参数发生漂移,而在图像中出现了残余的非均匀性。从图 2(c)中可以看出,使用了经典的恒定统计算法,该算法可以很好地消除焦平面温漂带来的影响,但在场景由静止发生运动时出现了之前场景的伪像,即出现了鬼影现象。而使用了本文算法的图 2(d),由于在场景静止时停止了统计参数的更新,并且调整了那些变化幅度与正常变化趋势差异较大的像素的参数更新速率,即消除了温漂带来的影响,又有效地抑制了鬼影现象。

6 结论

针对基于定标的两点校正算法无法克服焦平面温漂效应和基于场景的恒定统计算法存在的鬼影现象,提出了一种改进的恒定统计非均匀性校正算法。该算法在两点校正的基础上,对图像进行双通道分频段处理,并通过对场景运动状态的判断,有选择性地对统计参数的更新,最后完成非均匀性校正。实验表明该算法可以有效地消除焦平面温漂效应带

来的影响,并可以抑制经典的恒定统计算法产生的鬼影现象。

参考文献:

- [1] Chen Boyang, Wen Luhong, Yu Jiancheng. Scene-based non-uniformity correction for infrared imaging scanner [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37 (Sup): 611-614. (in Chinese)
陈博洋, 闻路红, 俞建成. 红外扫描仪中基于场景的非均匀性校正[J]. *红外激光工程*, 2008, 37 (增刊): 611-614.
- [2] Zhou Huixin, Bai Liping, Qin Hanlin, et al. Nonuniformity correction algorithm for infrared focal plane arrays based on adaptive-filter [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 22(11):1611-1614. (in Chinese)
周慧鑫, 拜丽萍, 秦翰林, 等. 基于自适应滤波的红外焦平面阵列非均匀性校正算法[J]. *强激光与粒子束*, 2009, 22(11):1611-1614.
- [3] Milton A F, Barone F R, Kruer M R. Influence of nonuniformity on infrared focal plane array performance[J]. *Opt Eng*, 1985, 24:855-862.
- [4] Yin Shimin, Xiang Libin, Zhou Jinsong, et al. Research on nonuniformity correction of IRFPA based on radiation source scaling[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37 (5): 992-995. (in Chinese)
殷世民, 相里斌, 周锦松, 等. 辐射源标定红外焦平面阵列非均匀性校正算法研究[J]. *光子学报*, 2008, 37 (5):992-995.
- [5] Li Qing, Liu Shangqian, Lai Rui, et al. A scene-based nonuniformity correction algorithm of Irpfa[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(5):720-723. (in Chinese)
李庆, 刘上乾, 赖睿, 等. 一种基于场景的红外焦平面阵列非均匀性校正算法[J]. *光子学报*, 2006, 35(5):720-723.
- [6] Bai Liping, Yin Shimin, Liu Shangqian. A new scene-based nonuniformity correction algorithm in IRFPA [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33 (1):109-112. (in Chinese)
拜丽萍, 殷世民, 刘上乾. 一种新的基于场景的红外焦平面阵列非均匀性校正算法[J]. *光子学报*, 2004, 33 (1):109-112.
- [7] Zhang Junju, Sun Lianjun, Wang Shiyun, et al. A nonuniformity correction algorithm based on scene techniques [J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(3):174-177. (in Chinese)
张俊举, 孙恋君, 王世允, 等. 一种基于场景的非均匀校正算法[J]. *激光与红外*, 2006, 36(3):174-177.
- [8] Zhao Yan, Zhang Yan, Shen Zhenkang. Improved detector nonuniformity correction Based on S-curve model [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(3):226-229. (in Chinese)
赵岩, 张焱, 沈振康. 改进的探测器 S 形曲线的非均匀校正算法研究[J]. *激光与红外*, 2008, 38(3):226-229.
- [9] Zheng Fengxun. An improved algorithm for adaptive nonuniformity correction [J]. *Science Technology and Engineering*, 2010, 10(12):2984-2986. (in Chinese)
郑逢勋. 一种改进的自适应非均匀性校正算法[J]. *科学技术与工程*, 2010, 10(12):2984-2986.
- [10] Xu Huihui, Zhang Guiling, Jiang Jing. Scene-based non-uniformity correction method of analysis for infrared detector [J]. *Computer And Engineering Institute*, 2007, 35(9):27-29. (in Chinese)
许慧慧, 张桂林, 姜瑾. 基于场景的红外探测器非均匀性校正方法的分析[J]. *计算机与数字工程*, 2007, 35(9):27-29.