

一种凝视红外成像系统联合非均匀校正算法

聂瑞杰, 李丽娟, 王朝林, 徐琰珂

(中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

摘要: 随着红外焦平面阵列技术的发展, 凝视红外成像系统在很多领域得到了大量的应用, 在这些应用中, 非均匀性噪声及其校正方法是人们主要关注的一个问题。为了解决这个问题, 从凝视红外成像系统非均匀性噪声的来源和频域特性出发, 综合考虑了当前几种典型的基于定标和基于场景的非均匀校正算法的优缺点, 结合盲元检测和补偿算法, 提出了一种联合非均匀校正算法, 并进行了实验验证。实验结果表明, 该算法能够较好地解决成像系统非均匀性噪声随时间和工作环境漂移的问题, 又能够保持较高的精度和收敛速度, 具有较大的工程应用价值。

关键词: 非均匀性校正; 凝视红外成像系统; 时域高通校正法; 神经网络法

中图分类号: TN215; TN911.73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)08-2339-08

A combined non-uniformity correction algorithm of IR staring imaging system

Nie Ruijie, Li Lijuan, Wang Chaolin, Xu Yanke

(China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: With the development of IRFPA techniques, IR staring imaging system has been applied in more and more fields. In these applications, the residual non-uniformity and the non-uniformity correction (NUC) algorithms of the output IR images are of major concern. In order to resolve this problem, the non-uniformity sources and their characteristics in spatial frequency domain were studied firstly in this paper, and then the advantages and the disadvantages of both Calibration-based and Scene-based NUC algorithms were taken into account, and finally a combined non-uniformity correction algorithm including Blind-pixel Detection and Compensation was put forward to implement the non-uniformity correction, and the experiments results were given as well. The results shows that the combined non-uniformity correction algorithm can prevent the RNU to increase with the changes of time and working environments well, and has excellent performances in NUC technical applications.

Key words: non-uniformity correction; IR staring imaging system; temporal high pass NUC algorithm; neural network

收稿日期: 2014-12-21; 修订日期: 2015-01-03

基金项目: 总装探索项目(7131466); 科技创新基金(CJK1416)

作者简介: 聂瑞杰(1986-), 男, 工程师, 博士, 主要从事红外探测成像技术的研究。Email: nrj19862008@126.com

0 引言

新型凝视红外成像系统具有分辨率高,探测能力高,抗干扰能力强,功耗低,结构简单无需扫描的特点,因而被广泛地应用于军事,航空航天遥感,医疗,气象,环境,科研等领域。然而,红外成像系统的非均匀性噪声对系统性能造成严重的限制,是在各类新型IR系统应用中人们主要关注的一个问题。为了解决这个问题,在过去的几十年里出现了很多非均匀性校正算法,这些非均匀性校正算法总体来说可以分为两大类:一类是基于标定的非均匀性方法^[1-3],一类是基于场景的非均匀性校正算法^[4-11],即自适应非均匀校正算法。这两类校正算法中,前者具有较高的校正精度,但无法解决探测器非均匀性随时间的漂移问题,后者直接利用每帧图像中的场景信息来进行非均匀性校正,无需大量的辅助器件(黑体光学设备等),可以实时产生和更新校正系数,能够解决非均匀性的时间漂移问题,但这些自适应非均匀校正算法都有一定的缺点,受到适用范围的限制。

文中从红外焦平面阵列非均匀性噪声的来源及其频域特性出发,比较了多种非均匀校正算法的优缺点,提出了一种联合非均匀校正算法,该算法首先采用定标法获得红外焦平面阵列的多点校正系数,并基于该多点校正系数对系统进行盲元检测,将盲元检测结果存入盲元模板中,之后再利用多点校正系数对图像进行非均匀校正,对多点校正算法校正后的图像进行盲元补偿,最后再采用时域高通校正法和神经网络校正法分别对系统输出图像的高频空域噪声和低频空域噪声进行自适应校正。该联合非均匀校正算法具有比这三种方法的任意一种或两种的组合校正算法更优的校正效果。

1 凝视红外成像系统非均匀性噪声的来源和典型非均匀校正方法

非均匀性(NU)是指红外焦平面阵列(IRFPA)上的各探测单元在外界均匀光强照射时的光电响应输出不一致,在图像上表现为空间噪声或固定模式噪声(FPN),这种非均匀性严重影响了红外成像系统的性能,已经成为限制进一步提高图像质量的瓶颈。

1.1 凝视红外成像系统非均匀噪声的来源

凝视红外成像系统的非均匀性噪声主要来源于以下几个方面^[12]:

(1) 探测器

探测器是红外成像系统的光电转换器件,它将入射的红外辐射光子流转换为电信号,这些电信号通常由一个积分电容收集,并通过一个电路转换为电压信号。在探测器水平上,NU主要来自于IRFPA的各个像素的光电转换函数的差异,如果不采用任何的非均匀校正(NUC)算法,系统很难获得有用的图像。不同像素之间的差异主要来自于积分电容、暗电流、像素形状、光敏区域和量子效率的不同,这些主要与光敏材料和处理技术有关,且不同像素之间的这种差异可能会非常巨大,它们都会导致光谱非线性。此外,读出电路也存在着固有的非线性从而对输出产生影响。

(2) 内部辐射

自然界中只要大于绝对零度的物体都会发出红外辐射,成像系统的机械外壳,光学系统和电子学设备等都会发出红外辐射,这些辐射有的直接入射至探测器,有的经光学系统反射后进入探测器,当这两部分辐射的强度不一样时,会产生非均匀性。

(3) 光学渐晕和阴影效应

在物面辐射亮度均匀的情况下,成像系统轴外像点和轴上像点的照度不一致,反应在最终的图像上即表现为一种固定图案噪声,最典型的如视场的 \cos^4 效应等。

由于内部辐射的存在,实际系统中的光学渐晕和阴影非均匀性是内部辐射和外部辐射渐晕和阴影效应的叠加,这种光学渐晕非均匀性受工作环境影响很大,容易随工作环境的变化而变化。

凝视红外成像系统的非均匀噪声如图1所示。

图1中,图1(a)是凝视红外成像系统非均匀性噪声的三维示意图,图中变化剧烈的尖峰是盲元,图1(b)是红外图像非均匀性噪声的二维示意图,从图1(b)中可以看出,凝视红外成像系统的非均匀性噪声,即包含空间高频分量,也包含空间低频分量,其中空间低频非均匀性噪声在图1(b)中表现为图像的灰度值中间低,四周高,图像的右下部分灰度值整体高于图像的左上部分,为了更明显地看出这种低频空间噪声,将图1(a)的显示动态范围集中在[390, 450]之间,

得到图 1(c)。

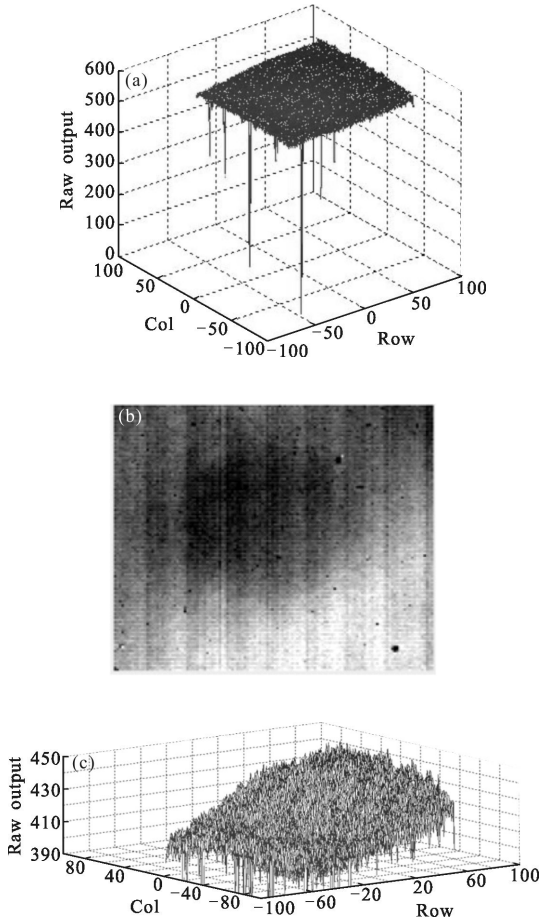


图 1 凝视红外成像系统非均匀性噪声

Fig.1 Non-uniformity noise of IR staring imaging system

1.2 典型非均匀校正算法

目前有很多种非均匀校正算法都能够对凝视红外成像系统的非均匀性噪声进行校正,最简单的如两点校正法^[3],这种校正法采用一个探测器的线性响应模型,即探测器的输出与其接收的入射辐照度成线性关系,如公式(1)所示:

$$X_{i,j} = g_{i,j}^{\det} \phi_{i,j} + o_{i,j}^{\det} \quad (1)$$

式中: $X_{i,j}$ 为探测器第*i*行*j*列像素的原始响应输出; $g_{i,j}^{\det}$ 为第*i*行*j*列像素的响应增益系数; $\phi_{i,j}$ 为第*i*行*j*列像素接收的入射辐照度; $o_{i,j}^{\det}$ 为第*i*行*j*列像素的响应偏移系数。

如果入射辐射为均匀辐射,则理想的探测器响应也应是均匀的,即校正后的探测器响应和探测器的原始输出的关系可以表示为:

$$Y_{i,j} = G_{i,j} X_{i,j} + O_{i,j} \quad (2)$$

式中: $Y_{i,j}$ 为探测器第*i*行*j*列像素的校正后输出; $G_{i,j}$ 为第*i*行*j*列像素的增益校正系数; $O_{i,j}$ 为第*i*行*j*列像素的偏移校正系数;

为了得到增益校正系数,可以采集低温 T_1 和高温 T_2 的两个温度点的均匀黑体辐射源的响应图像,图像大小为 $M \times N$,各自取 F 帧的图像,求得其总的响应均值作为期望的理想输出,这样的做的好处是可以减少时域噪声的影响,如公式(3)和公式(4)所示:

$$\bar{Y}_1 = \frac{\sum_{n=1}^F \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N X_{i,j}^{T_1}(n)}{F \times m \times n} \quad (3)$$

$$\bar{Y}_2 = \frac{\sum_{n=1}^F \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N X_{i,j}^{T_2}(n)}{F \times m \times n} \quad (4)$$

式中: $X_{i,j}^{T_1}(n)$ 和 $X_{i,j}^{T_2}(n)$ 分别对应 T_1 和 T_2 温度点的第*n*帧图像中第*i*行*j*列像素的原始响应输出。

再求得 F 帧图像序列每个像素响应的时域均值作为原始输出:

$$\bar{X}_{i,j}^{T_1} = \frac{\sum_{n=1}^F X_{i,j}^{T_1}(n)}{F} \quad (5)$$

$$\bar{X}_{i,j}^{T_2} = \frac{\sum_{n=1}^F X_{i,j}^{T_2}(n)}{F} \quad (6)$$

接下来便可以利用公式(7)和公式(8)来分别求得增益校正系数和偏移校正系数,如下所示:

$$G_{i,j} = \frac{\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2}{\bar{X}_{i,j}^{T_1} - \bar{X}_{i,j}^{T_2}} \quad (7)$$

$$O_{i,j} = \frac{\bar{Y}_1 \bar{X}_{i,j}^{T_2} - \bar{Y}_2 \bar{X}_{i,j}^{T_1}}{\bar{X}_{i,j}^{T_1} - \bar{X}_{i,j}^{T_2}} \quad (8)$$

将得到的增益校正系数和偏移校正系数代入公式(2)进行非均匀校正。前面提到,两点校正法是基于这样一个假设,即探测器的输出与其接收的入射辐照度成线性关系,然而实际中只有在很窄的动态范围内这种线性关系才成立,简单地采用两点校正并不准确。

为此,可以将探测器的响应温度动态范围分为 N 个子区间 $[T_0, T_1], [T_1, T_2], \dots, [T_{N-1}, T_N]$,在每个子区间内能够用线性响应模型来精确描述,分别计算出各个温度区间的两点校正系数,对不同响应温度子区间的图像分别用其所在区间的两点校正系数进

行校正,即多点校正法^[1]。这种多点校正法是一种基于定标的非均匀校正法,校正结果精确度较高,然而为解决非均匀噪声随时间和工作环境变化而漂移的问题,需要采用周期性标定,定标时需要采用黑体和光学系统等较为笨重的设备,不便于携带,且定标周期较长。

基于场景的非均匀校正算法则可以解决这个问题,典型的如基于神经网络的非均匀校正算法等。然而,基于神经网络的非均匀校正方法对低频占优的非均匀噪声,无法取得很好的校正效果^[5],特别是来源于成像系统内部辐射和光学渐晕效应的非均匀噪声主要表现为一种低频空间噪声,且这种低频空间噪声受工作环境影响较大,需要对其进行自适应非均匀校正,为此,在对原始图像进行多点校正和基于神经网络的非均匀校正后,再采用时域高通校正法对图像进行进一步的校正,这便是文中所提出的联合非均匀校正算法。

2 联合非均匀校正算法的实现过程

联合非均匀校正算法可分为预校正模块和自适应校正模块,其功能结构框图如图 2 所示,联合非均匀校正算法由多点校正模块,盲元检测和补偿模块,基于神经网络的非均匀校正模块,时域高通模块组成。

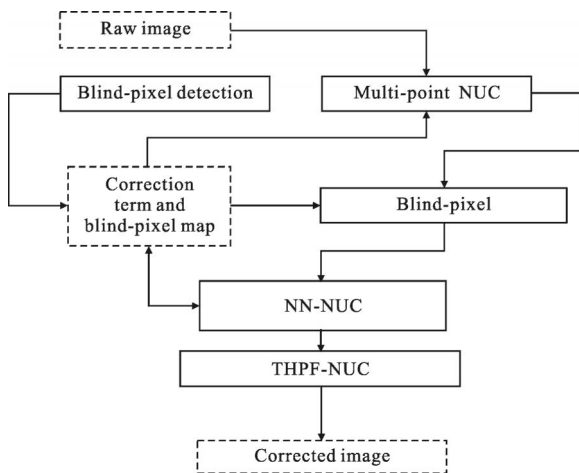


图 2 联合非均匀校正算法功能结构框图

Fig. 2 Block diagrams of combined NUC algorithm

2.1 多点校正和盲元检测模块

首先采用标准均匀黑体辐射源对成像系统进行

定标,根据 1.2 中介绍的方法计算多点校正系数,并在每个温度子区间内采用参考文献[13]中介绍的方法进行盲元检测,得到盲元位置模板,将多点校正系数和盲元信息一并存起来,得到多点校正系数和盲元模板。

2.2 盲元补偿和基于神经网络的非均匀校正模块

如前面所述,在多点校正的每个温度子区间内,红外成像系统的非均匀校正都采用如下式所示的一个线性模型:

$$y_{i,j}(n) = G_{i,j}(n)x_{i,j}(n) + O_{i,j}(n) \quad (9)$$

式中: $x_{i,j}(n)$ 为第 n 帧的第 i 行 j 列的输出; $G_{i,j}(n)$ 为第 n 帧的增益校正系数; $O_{i,j}(n)$ 为第 n 帧的偏移量校正系数; $y_{i,j}(n)$ 为第 n 帧的校正后的像素输出;

传统的神经网络法采用像素的局部空域均值作为期望值^[4],由于实际的红外图像中都存在盲元,为了提高校正精度,先对多点校正后的图像进行盲元补偿,再计算期望值。首先根据盲元模板中的盲元位置信息,采用邻域均值法对盲元进行替换,如果一个邻域内有多个盲元,则用去除盲元后的邻域像素均值来替换当前像素值,也可以采用其他盲元替换方法进行盲元替换。

期望值的计算公式如下式所示:

$$f_{i,j} = (x_{i-1,j} + x_{i,j-1} + x_{i,j+1} + x_{i+1,j}) \quad (10)$$

以均方误差最小准则为判据,定义误差函数如下式所示:

$$E_{i,j} = (y_{i,j} - f_{i,j})^2 \quad (11)$$

采用最陡下降法对校正系数进行迭代更新,校正系数初始值采用多点校正温度子区间内的两点校正系数,系数更新时,盲元所在位置的系数不进行更新。更新公式如下:

$$G_{i,j}(n+1) = G_{i,j}(n) - 2\mu X_{i,j}(n)(Y_{i,j}(n) - f_{i,j}(n)) \quad (12)$$

$$O_{i,j}(n+1) = O_{i,j}(n) - 2\mu [y_{i,j}(n) - f_{i,j}(n)] \quad (13)$$

式中: μ 迭代步长,文中采用自适应调整迭代步长的方法来抑制由于场景静止或运动过慢而导致的目标边缘模糊和鬼影问题,自适应调整迭代步长公式由下式给出^[6]:

$$\mu_{i,j}(n) = \mu_0 / (1 + \lambda \sigma_{i,j}^2(n)) \quad (14)$$

式中: $\mu_{i,j}(n)$ 为第 n 帧(i, j)位置对应的迭代步长; μ_0 为迭代步长的最大值; $\sigma_{i,j}^2(n)$ 为第 n 帧(i, j)位置 3×3 邻域内的方差; λ 为方差影响系数。

2.3 时域高通校正模块

经过多点校正和基于神经网络的非均匀校正之后,图像中依然存在着对环境温度较为敏感的光学渐晕非均匀性噪声,此时可通过时域高通校正法(THPF-NUC)来校正^[8-11],时域高通校正法最早是由美国海军武器装备研究中心的 Scribner 等人提出的,它通过模拟人眼中光感受器、水平细胞和双极细胞之间的信号处理关系,运用原始信号与对应的低通滤波器构建高通滤波器来进行非均匀校正。时域高通校正法的原理框图如图 3 所示。

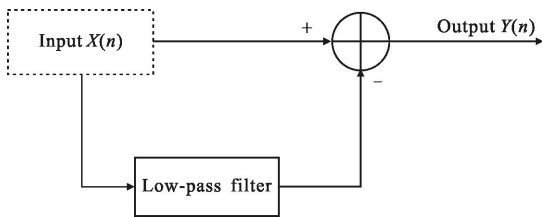


图 3 时域高通校正法原理框图

Fig.3 Block diagrams of temporal high-pass filter NUC algorithm

图 2 中 $X(n)$ 是输入第 n 帧带非均匀性噪声图像, $Y(n)$ 是校正后的输出图像,校正公式如下所示:

$$Y(n)=X(n)-f^L(n)-o(n) \quad (15)$$

式中: $o(n)$ 为 $f^L(n)$ 的空域均值; $f^L(n)$ 为 $X(n)$ 经低通滤波器后的输出,可由下式给出:

$$f^L(n)=\frac{1}{m}X(n)+\left(1-\frac{1}{m}\right)X(n-1) \quad (16)$$

式中: m 为事先设定的时间常数。

m 的大小决定了低通滤波器的截止频率,进而决定了时域高通校正法的效果,由公式(16)决定的低通滤波器的截止频率可由下式给出:

$$f_c=\frac{1}{2\pi}f_s \cdot \arccos\left(\frac{m^2-3m+1.5}{m^2-3m+2}\right) \quad (17)$$

式中: f_s 是成像系统的帧速率。

由公式(17)可以看出, m 越大时,高通滤波器的截止频率 f_c 越低,当图像中的非均匀性主要表现为低频空域噪声时,可以采用大的 m 值,即能够有效地去除非均匀性,又可以降低对场景运动和随机性的要求。

2.4 联合非均匀校正算法的执行步骤

(1) 根据 IRFPA 的响应温度动态范围,取 T_0, T_1, \dots, T_N 温度点,采用定标法获得成像系统的多点校正系数,在由这些温度点所确定的温度子区间内,根据

该温度子区间内的两点校正系数,采用 $3\sigma^2$ 法获取盲元位置信息;

(2) 根据输入图像的响应均值,判断该输入图像在哪个响应温度区间内,并在该温度点区间内,对该区间内的输入图像执行下面的校正公式:

$$X_{i,j}(n)=G_{i,j}^s(n)x_{i,j}(n)+O_{i,j}^s(n) \quad (18)$$

式中: $X_{i,j}(n)$ 为校正后的输出图像; $G_{i,j}^s(n)$ 和 $O_{i,j}^s(n)$ 的上角标 s 表示该校正系数是在 $[T_{s-1}, T_s]$ 温度子区间内的校正系数, $s=1, 2, \dots, N$, 其中 $G_{i,j}^s(1)$ 和 $O_{i,j}^s(1)$ 是采用定标法获得的该温度子区间内的校正系数,即采用多点校正系数作为神经网络法非均匀校正的系数更新迭代初始值,其好处是可以加快收敛速度。

(3) 在温度子区间内,根据前面获取的盲元位置信息,对输入原始图像进行盲元补偿,得到经过第一次盲元补偿的图像 $\hat{x}_{i,j}(n)$,并采用该盲元补偿后的图像计算期望值,期望值的计算公式由下式给出:

$$f_{i,j}(n)=[\hat{x}_{i-1,j}(n)+\hat{x}_{i,j-1}(n)+\hat{x}_{i,j+1}(n)+\hat{x}_{i+1,j}(n)] \quad (19)$$

(4) 计算温度子区间内第 n 帧输入图像的误差函数值,计算公式如下式所示:

$$E_{i,j}(n)=[y_{i,j}(n)-f_{i,j}(n)] \quad (20)$$

(5) 采用最陡下降法,进行系数更新,更新公式如下:

$$G_{i,j}^s(n+1)=G_{i,j}^s(n)-2\mu X_{i,j}(n)(Y_{i,j}(n)-f_{i,j}(n)) \quad (21)$$

$$O_{i,j}^s(n+1)=O_{i,j}^s(n)-2\mu[y_{i,j}(n)-f_{i,j}(n)] \quad (22)$$

式中: μ 的值根据公式(14)进行计算,盲元所在位置的系数不进行更新。

(6) 计算低通滤波器输出,计算公式为:

$$f_{i,j}^L(n)=\frac{1}{m}X_{i,j}(n)+\left(1-\frac{1}{m}\right)X_{i,j}(n-1) \quad (23)$$

(7) 执行时域高通非均匀校正,校正公式为:

$$Y_{i,j}(n)=X_{i,j}(n)-f_{i,j}^L(n)-o_{i,j}(n) \quad (24)$$

将时域高通校正法校正后的图像作为最终的输出图像。

3 仿真结果与分析

采用中波制冷 IRFPA 凝视红外成像系统采集的图像对算法进行了性能仿真和验证。结果如图 4 所示,在环境温度为 20° 条件下采集黑体图像,计算多

点校正系数,并基于该多点校正系数对图像进行盲元检测,利用多点校正系数和盲元检测结果依次对所采图像进行非均匀校正和盲元补偿,得到的结果如图 4(a)所示,可以看出图像中的非均匀性噪声和盲元都得到了很好的校正和补偿。保持黑体温度不变,将环境温度调至 40°,断电 2 h 后,重新开机并采集图像,用之前计算的多点校正系数对所采图像进行非均匀校正和盲元补偿,得到的结果如图 4(b)所示,可以看出由于环境温度的变化,以及探测器响应随时间的漂移,原来的多点校正系数已不能够对系统输出的图像进行精确的校正,图像中有明显的散点噪声和光学渐晕非均匀性未得到消除。在多点校正的基础上,再采用基于神经网络的非均匀校正(NN-NUC)算法对多点校正后图像进行处理,第 200 帧的校正输出结果如图 4(c)所示,可以看出,图像中的散点噪声已基本被消除,而低频空间噪声未被消除,这是由于 NN-NUC 的空间低通频率特性所造成的。在此基础上,进一步采用时域高通校正法对图像进行处理,第 200 帧的校正输出结果如图 4(d)所示,

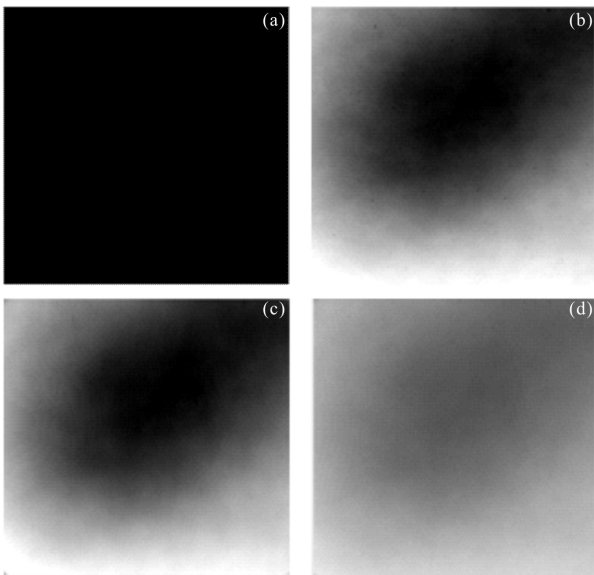


图 4 非均匀校正结果对比

Fig.4 Experimental results of uniform scene with different NUC algorithms

可以看出,低频空间噪声也得到了很好的校正。为了对实验结果进行客观定量的评价,采用国家标准定义来评估图像的非均匀性^[10],即:

$$U = \frac{1}{\bar{Y}} \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (\bar{Y} - Y_{ij})^2} \quad (25)$$

式中: \bar{Y} 为系统输出图像的灰度均值; M 和 N 分别为系统输出图像的行数和列数; Y_{ij} 为图像中第 i 行 j 列像素的灰度值。

不同校正算法的残余非均匀性 RNU 如表 1 所示。

表 1 不同校正算法的残余非均匀性

Tab.1 RNU of real uniform scene IR images corrected by different algorithms

Algorithms	Multi-point NUC	Multi-point NUC and NN-NUC	Combined NUC
RNU	1.84%	1.79%	0.95%

从表 1 中可以看出,联合 NUC 算法的校正性能优于多点 NUC 算法和多点加 NN-NUC 算法。实验中,时域高通校正模块 m 值选为 500,如果选用更小的 m 值,能够得到更快的收敛速度,第 200 帧的校正效果也更好,但这样会增加对场景运动和随机性的要求,否则容易产生模糊和鬼影,特别是对一些随时间变化较大的复杂场景,实际应用中需折中考虑,选取合适的 m 值。实际上,当非均匀性主要表现为低频空域噪声时,可以先将图像分割为高频部分和低频部分,用低频部分来估计校正系数,此时可以采用较小的 m 值,加快收敛速度,并且不容易产生模糊和鬼影,后面将对此进行研究。在参考文献[10]和[11]中虽然都提到了采用空域低通滤波来抑制鬼影,但是他们所采用的算法都是用图像的高频部分来估计校正系数,与文中所提出的算法不同。

真实场景图像的非均匀校正结果如图 5 所示,其中图 5(a)为只采用多点校正的第 100 帧后输出图像,图 5(b)是采用联合非均匀校正算法的第 100 帧后输出图像,可以很明显地看出,图 5(a)中存在有散点非均匀性噪声未得到校正,图 5(b)则具有更好的校正效果,图像更光滑,没有明显的散点非均匀性噪声。

图 5(c)是多点校正法与联合非均匀校正法均方根误差 RMSE 曲线,‘- *’表示的是只采用多点定标校正的图像 RMSE 随帧数的变化曲线,‘- -’表示的是采用联合非均匀校正算法的图像 RMSE 随帧数的变化曲线,由于场景变化较为复杂,不同帧之间的场景差异较大,使得实际计算的 RMSE 不是单调下降的,但是可以确定的是,采用联合非均匀校正算法的第 n 帧图像 RMSE 比只采用多点校正算法的第 n 帧

图像 RMSE 更小。

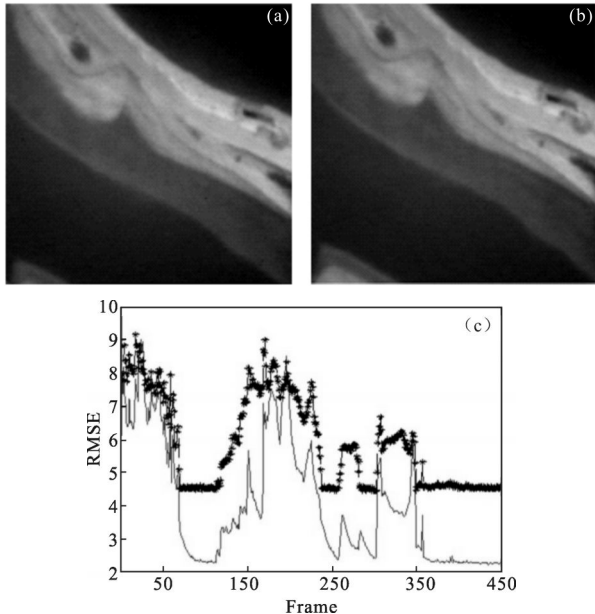


图5 真实场景图像的非均匀校正结果

Fig.5 Experimental results of real uniform scene with different NUC algorithms

文中算法与参考文献[5]中提出的一点加 NN-NUC 算法相比的优点在于,可以解决低频空域噪声随工作环境温度改变而发生漂移的问题,如果参考文献[5]中的算法要实现这个功能,必须在不同的环境温度下更新一点校正模板,较为繁琐。在一些不允许加盖子或遮挡来获取一点校正模板的应用中,参考文献[5]的算法也将无法执行,而文中所提出的算法则不存在这些问题。与参考文献[15]中张小军等人提出的采用 THPF-NUC 加 NN-NUC 算法分别对图像的加性空域噪声和乘性空域噪声进行自适应补偿的算法相比,文中所提算法的出发点和针对性都与之不同,对场景运动的要求也更低,文中算法是采用 NN-NUC 算法和 THPF-NUC 算法分别对图像的高频空域噪声和低频空域噪声进行自适应校正,且采用多点校正算法进行预校正,能够同时解决探测响应非线性和非均匀性随时间以及工作环境改变而发生漂移的问题。

4 结论

非均匀性噪声是影响目前凝视红外成像系统输出图像质量的主要因素,且这种非均匀性噪声会随着时间和工作环境的变化而发生漂移,基于定标的

NUC 算法精度高,但无法解决这种漂移,需要采用基于场景的自适应 NUC 算法。当前常用的且计算量较小易于硬件实现的典型自适应 NUC 算法,如 NN-NUC 和 THPF-NUC,都受到适用范围的限制,如 NN-NUC 对空间高频非均匀性效果很好,而对空间低频非均匀性,特别是光学渐晕非均匀性效果不明显,THPF-NUC 对图像的随机性要求较高,较小的 m 值容易产生鬼影和图像退化,而较大的 m 值则会使收敛速度过慢,但 THPF-NUC 对光学渐晕非均匀性效果显著,较大的 m 值也能够达到很好的校正效果和收敛速度,如果图像中的非均匀性是低频空间噪声占优时,THPF-NUC 是个不错的选择。因此先采用多点定标校正法对系统输出原始图像进行预校正,再分别采用 NN-NUC 算法和 THPF-NUC 算法进行自适应校正,既能够保证校正精度,解决探测器响应非线性问题,又能够很好地解决非均匀性随时间和工作环境的漂移,适用性更强,且它们的组合 NUC 算法计算量增加不大,算法中的两个 3×3 滑动窗口运算和除法操作都可以基于当前的低端主流 FPGA 采用流水线操作来实现,计算和存储资源开销都不大,具有较大的工程应用价值。

参考文献:

- [1] Bai Junqi, Chen Qian. Non uniformity correction for infrared for focal plane arrays based on environment temperature[J]. *J Infrared Millim Waves*, 2010, 29(1): 50-52. (in Chinese) 白俊奇, 陈钱. 基于环境温度的红外焦平面阵列非均匀性校正[J]. *红外与毫米波学报*, 2010, 29(1): 50-52.
- [2] Yin Shimin, Xiangli Bin, Zhou Jinsong, et al. Research on non uniformity 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.
- [3] Mao Xiaoqun, Shi Junsheng. Calibration-based non-uniformity correction in infrared images [J]. *Journal of Yunnan Normal University*, 2009, 29(4): 57-61. (in Chinese) 毛小群, 石俊生. 基于定标法的红外图像非均匀校正[J]. *云南师范大学学报*, 2009, 29(4): 57-61.
- [4] Emanuele Guadagnoli, Claudio Giunti. Thermal imager non-uniformity sources modeling[C]//SPIE, 2011, 8014(80140A):

- 1-12.
- [5] Scribner D A, Sarkady K A, Kruer M R, et al. Adaptive non uniformity correction for IR focal plane arrays using neural networks [C]//Infrared Sensors: Detectors, Electronics, and Signal Processing, SPIE, 1991, 1541: 100-109.
- [6] Zhang Tianxu, Shi Yan, Cao Zhiguo. Study on the property of spatial frequency of non uniformity noise in IRFPA and the important of spatial adaptive non uniformity correction technique [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2005, 24 (4): 255-256. (in Chinese)
张天序, 石岩, 曹治国. 红外焦平面非均匀性噪声的空间频率特性及空间自适应非均匀性校正方法改进 [J]. *红外与毫米波学报*, 2005, 24(4): 255-256.
- [7] Scribner D A, Sakady K A, Caulfield J T, et al. Non-uniformity correction for staring IR focal plane arrays using scene-based techniques [C]//Infrared Detectors and Focal Plane Arrays, SPIE, 1990, 1308: 224-233.
- [8] Li Qing, Liu Shangqian, Wang Bingjian, et al. New non uniformity correction algorithm for IRFPA based on neural network [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(3): 342-344. (in Chinese)
李庆, 刘上乾, 王炳健, 等. 基于神经网络的 IRFPA 非均匀性校正新算法[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(3): 342-344.
- [9] Zhang Qiaozhou, Gu Guohua. Real-time blind-pixel detection and compensation technology based on two-point parameters and self-adaptive window [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(3): 139-145. (in Chinese)
张桥舟, 顾国华. 基于两点参数及自适应窗口的实时盲元检测和补偿技术[J]. *红外技术*, 2013, 35(3): 139-145.
- [10] Shi Changcheng, Zhang Tianxu. Research on the Adaptive algorithm for non uniformity correction of infrared focal plane array based on temporal high pass filter [J]. *Computer & Digital Engineering*, 2007, 35(7): 1-4. (in Chinese)
施长城, 张天序. 基于时域高通滤波的非均匀校正算法研究[J]. *计算机与数字工程*, 2007, 35(7): 1-4.
- [11] Liu Chongliang, Jin Weiqi. A DSP-based neural network non-uniformity correction algorithm for IRFPA [C]//SPIE, 2009, 7383(73832O): 1-7.
- [12] Zhang Shuang, Zhou Huixin. Temporal high-pass uniformity correction algorithm based on non-local means filter for infrared focal plane array [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(1): 1-4. (in Chinese)
张爽, 周慧鑫. 基于非局部均值滤波与时域高通滤波的非均匀校正算法[J]. *光子学报*, 2014, 43(1): 1-4.
- [13] Lei Xiaojie, Gu Guohua, Sui Xiubao, et al. Improved temporal high-pass uniformity correction algorithm based on bilateral filter [J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(7): 831-836. (in Chinese)
雷晓杰, 顾国华, 隋修宝, 等. 红外双边滤波时域高通非均匀性校正[J]. *激光与红外*, 2012, 42(7): 831-836.
- [14] Shanghai Institute of Technical Physics of Chinese Academy of Sciences. GB/T 17444-1998 The technical norms of measurement and test of infrared focal plane arrays [S]. Beijing: China Standard Press, 1998. (in Chinese)
中国科学院上海技术物理研究所. GB/T17444-1998 红外焦平面阵列特性参量测试技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [15] Zhang Xiaojun, Zhao Yigong. Combined algorithm for non-uniformity correction of infrared focal plane arrays [J]. *Infrared Technology*, 2003, 25(6): 34-38. (in Chinese)
张小军, 赵亦工. 红外焦平面非均匀校正的综合处理算法[J]. *红外技术*, 2003, 25(6): 34-38.