

基于梯度场景的非均匀校正方法

周达标^{1,2,3}, 王德江^{1,3}, 霍丽君^{2,3}, 刘 让^{1,2,3}, 贾 平^{1,3}

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

摘要 长波红外探测器经常被用于机载红外预警系统中,常受严重的非均匀性噪声干扰。为了校正探测器的非均匀性,补偿辐射响应非线性,提出了一种基于梯度场景的非均匀性校正方法。给出了探测器辐射响应非均匀性的观测模型;以标准黑体和梯度场景作为参考源,在理论上推导出校正系数表达式;利用原理样机进行了外场实验,并探测民航客机目标。实验结果表明:与基于黑体的两点校正方法相比,利用本文方法进行非均匀性校正后的图像,局部标准差峰值由 8.57 降低到 2.39;对于相距 50.64 km 的空中客车 A319 型客机,目标的信杂比由 4.87 提高到 11.22。本文算法可以有效降低图像局部标准差,适用于机载红外预警系统。

关键词 遥感;非均匀性校正;梯度场景;两点法;标定;预警

中图分类号 TP751.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0528001

Nonuniformity Correction Method Based on Gradient Scenes

Zhou Dabiao^{1,2,3}, Wang Dejiang^{1,3}, Huo Lijun^{2,3}, Liu Rang^{1,2,3}, Jia Ping^{1,3}

¹Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract Long wave infrared detectors are often employed in airborne infrared early warning systems, which are often contaminated the with heavy nonuniformity noises. To correct the nonuniformity and compensate the nonlinearity of detectors, a nonuniformity correction method is proposed. The observation model of radiance nonuniformity is introduced. The correction coefficients are deduced in theory with the reference of a blackbody and a gradient scene. And, an outfield experiment with a proof-of-concept camera is performed to detect the airliners. Experimental results show that the peak value of local standard deviation of the corrected image decreases from 8.57 to 2.39, compared with the two-point correction method based on a blackbody. For the target of Airbus A319 from 50.64 km away, the signal-to-clutter ratio rises from 4.87 to 11.22. The proposed method can decrease the local standard deviation effectively, which has a significant contribution to airborne infrared early warning systems.

Key words remote sensing; nonuniformity correction; gradient scene; two-point method; calibration; early warning

OCIS codes 280.4788; 250.0040; 100.2550; 150.1488

1 引 言

长波红外探测器常用于预警系统中。由于读出电路和每个像元的辐射响应不同,长波红外探测器常受到严重的非均匀性噪声干扰。非均匀性噪声的存在,会降低预警系统探测概率,增大虚警率,缩短探测距离,

收稿日期: 2016-12-07; 收到修改稿日期: 2017-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(61308099)

作者简介: 周达标(1990—),男,博士研究生,主要从事图像处理和模式识别方面的研究。E-mail: dabiao@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 贾 平(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事光学动态成像控制和图像处理技术等方面的研究。

E-mail: jiap@ciomp.ac.cn

是制约预警系统达到背景极限探测的瓶颈。因此有必要研究高精度的非均匀性校正算法^[1-3]。

机载预警系统获得的图像有如下特点:1)图像以天空为背景,无地物等复杂场景;2)场景温度随海拔升高而降低,图像灰度值呈阶梯状下降趋势^[4]。

非均匀性校正方法主要分为两类:基于黑体的两点校正(BBNUC)方法^[5-6]和基于场景的方法。BBNUC法不能满足机载预警系统的高精度要求,原因是:1)长波红外探测器的辐射响应会随时间而缓慢漂移;2)无法在实验室中有效模拟复杂的机载环境。为了提高校正精度,工程中常用嵌入式黑体在线标定法^[7]。该方法除了增加载荷重量、体积和成本之外,还需要中断正常的成像过程;受载荷体积限制,无法对光学系统的主镜进行标定。此外,当待校正场景与参考黑体的辐射通量差异逐渐增加时,校正误差逐渐增加^[8]。多点校正法可以在一定程度上抑制辐射响应非线性的影响,但无法克服响应漂移的问题。

基于场景的校正方法主要分为两类:1)基于统计的校正方法。这类方法通常基于时间和空间上的假设,通过调整校正系数,达到非均匀性校正的目的。典型的方法包括恒定统计法^[9-10]、神经网络法和卡尔曼滤波法等^[11-12]。这类方法缺点是:一些应用场景难以满足此类方法的假设条件,容易产生鬼影现象。2)基于配准的校正方法^[13-15]。这类方法需要复杂的配准算法,误差容易累积传播,难以在工程上实现。

为了补偿探测器辐射响应非线性,校正探测器辐射响应非均匀性,本文提出了一种基于梯度场景的非均匀性校正方法。构建了非均匀校正问题的观测模型,并回顾了基于黑体的两点校正法。引入了基于梯度场景的校正方法并给出了理论推导。通过黑体标定实验和外场实验验证了本文方法在红外预警系统中的有效性。

2 非均匀校正算法

2.1 观测模型和两点校正法

红外探测器辐射响应曲线为非线性曲线,可以利用无穷级数逼近,即

$$I_{i,j} = \sum_{n=0}^{+\infty} a_{n,i,j} \Phi_{i,j}^n, \quad (1)$$

式中 $I_{i,j}$ 是图像 I 的第 (i,j) 个像素的灰度值(单位为 DN), $\Phi_{i,j}$ 是入射到像素的辐射通量, $a_{n,i,j}$ 是逼近系数。 i 和 j 分别是行(水平方向)和列(垂直方向)的索引,坐标原点在左上角。在工程上,常使用线性模型近似(1)式,即

$$I_{i,j} = G_{i,j} \Phi_{i,j} + O_{i,j}, \quad (2)$$

式中 $G_{i,j}$ 是增益, $O_{i,j}$ 是偏置。每个像素的 $G_{i,j}$ 和 $O_{i,j}$ 各不相同,直接导致探测器辐射响应的非均匀性。

在两点校正法中,设定黑体温度为 T_1 和 T_2 ,对应的两幅图像分别为 I_1 和 I_2 ,入射到每一个像素的辐射通量分别为 Φ_1 和 Φ_2 。即 $\Phi_{1,i,j} = \Phi_1, \Phi_{2,i,j} = \Phi_2$,则

$$\begin{cases} I_{1,i,j} = G_{i,j} \Phi_1 + O_{i,j} \\ I_{2,i,j} = G_{i,j} \Phi_2 + O_{i,j} \end{cases} \quad (3)$$

设校正系数为 $k_{i,j}$ 和 $b_{i,j}$ 。则

$$\begin{cases} k_{i,j} I_{1,i,j} + b_{i,j} = \bar{I}_1 \\ k_{i,j} I_{2,i,j} + b_{i,j} = \bar{I}_2 \end{cases}, \quad (4)$$

式中 $\bar{I}_1 = \bar{G} \Phi_1 + \bar{O}$ 和 $\bar{I}_2 = \bar{G} \Phi_2 + \bar{O}$ 是图像 I_1 和 I_2 的均值, $\bar{G}$ 和 $\bar{O}$ 分别是 $G_{i,j}$ 和 $O_{i,j}$ 的均值。根据(4)式,有

$$\begin{cases} k_{i,j} = \frac{\bar{I}_1 - \bar{I}_2}{I_{1,i,j} - I_{2,i,j}} \\ b_{i,j} = \frac{I_{1,i,j} \bar{I}_2 - I_{2,i,j} \bar{I}_1}{I_{1,i,j} - I_{2,i,j}} \end{cases} \quad (5)$$

利用(5)式可以直接计算校正系数。将(3)式和(4)式代入(5)式中,有

$$\begin{cases} k_{i,j} = \frac{\bar{G}}{G_{i,j}} \\ b_{i,j} = \bar{O} - \frac{\bar{G}}{G_{i,j}} O_{i,j} \end{cases} \quad (6)$$

参考图像 I_1 和 I_2 对校正精度有重要影响。受探测器辐射响应非线性影响,当场景温度等于参考黑体温度时,校正误差最小;当场景温度远离参考黑体温度时,校正误差会逐渐增大。换句话说,在红外搜索系统中,对于以天空为背景的梯度场景,参考黑体温度应选取为整幅场景温度的均值,则远离场景温度均值的像素点校正误差逐渐增大。为了在非均匀性校正过程中补偿辐射响应的非线性,提高校正精度,可以利用梯度场景代替两点校正法中的标准参考黑体,使梯度场景与实际场景的温度能够完全匹配,从而提高校正精度。

2.2 基于梯度场景的两点校正法

采用梯度场景和均匀黑体进行非均匀性校正。对于低温黑体,辐射通量在 i 方向和 j 方向均一致。梯度场景的辐射通量全局不一致,只要求辐射通量在 j 方向一致,在 i 方向呈递增趋势。即

$$\Phi'_{2,i,j} = \Phi_2 + \Delta\Phi_i \quad (7)$$

假设梯度场景对应的图像为 I'_2 ,对应的校正系数分别是 $k'_{i,j}$ 和 $b'_{i,j}$ 。则

$$\begin{cases} k'_{i,j} I_{1,i,j} + b'_{i,j} = \bar{I}_1 \\ k'_{i,j} I'_{2,i,j} + b'_{i,j} = \bar{I}'_2 \end{cases} \quad (8)$$

式中 $\bar{I}'_2$ 是图像 I'_2 的均值。解有

$$\begin{cases} k'_{i,j} = k_{i,j} + k_{i,j} r_i \\ b'_{i,j} = b_{i,j} - r_i \left(\bar{G} \Phi_1 + \frac{\bar{G}}{G_{i,j}} O_{i,j} \right) \end{cases} \quad (9)$$

$$r_i = \frac{\sum_{m=1}^M (\Delta\Phi_m - \Delta\Phi_i)}{M(\Phi_2 - \Phi_1 + \Delta\Phi_i)} \quad (10)$$

对于图像 I'_2 ,利用标准黑体校正后的图像为 J'_2 ,利用阶梯状场景校正后的图像为 J''_2 ,即

$$\begin{cases} J'_{2,i,j} = k_{i,j} I'_{2,i,j} + b_{i,j} \\ J''_{2,i,j} = k'_{i,j} I'_{2,i,j} + b'_{i,j} \end{cases} \quad (11)$$

将校正系数(6)式和(9)式分别代入(11)式中,有

$$J''_{2,i,j} = J'_{2,i,j} + \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N G_{m,n} \Delta\Phi_m - \bar{G} \Delta\Phi_i \quad (12)$$

(12)式等号右端的第二项与坐标 (i,j) 无关,是固定值;而 $-\bar{G} \Delta\Phi_i$ 项恰好可以补偿(7)式中的辐射通量梯度。利用校正系数 $k'_{i,j}$ 和 $b'_{i,j}$ 对图像 I'_2 进行非均匀性校正,校正后图像 J''_2 是一幅均匀的图像。图1为本文算法示意图。

2.3 分析和讨论

根据(6)式, $k_{i,j}$ 在1附近波动, $b_{i,j}$ 在0附近波动。为了分析校正系数 $k'_{i,j}$ 和 $b'_{i,j}$ 的单调性,首先分析 r_i 的单调性。不失一般性,假设 $\Phi_2 > \Phi_1$, $i_2 > i_1$, $\Delta\Phi_2 - \Delta\Phi_1 > 0$ 。则

$$r_{i_2} - r_{i_1} < \frac{\sum_{m=1}^M (\Delta\Phi_{i_1} - \Delta\Phi_{i_2})}{M(\Phi_2 - \Phi_1 + \Delta\Phi_{i_1})} < 0, \quad (13)$$

即 r_i 随 i 的递增而递减。因此,在(9)式中,对于给定的列索引 j , $k'_{i,j}$ 除了保留 $k_{i,j}$ 的局部波形外,其整体波形随 i 增加而递减;同理, $b'_{i,j}$ 除了保留 $b_{i,j}$ 的局部波形外,整体波形随 i 增加而递增。对于相同的行索引 i , $k'_{i,j}$ 和 $k_{i,j}$ 的波形一致。

机载红外预警系统一般采用周扫的工作方式,得益于该系统的特殊工作方式,容易找到 j 方向均匀的阶梯状场景。而在极端天气条件下,无法找到有效的梯度场景,则采用延缓更新校正系数的策略^[16]。

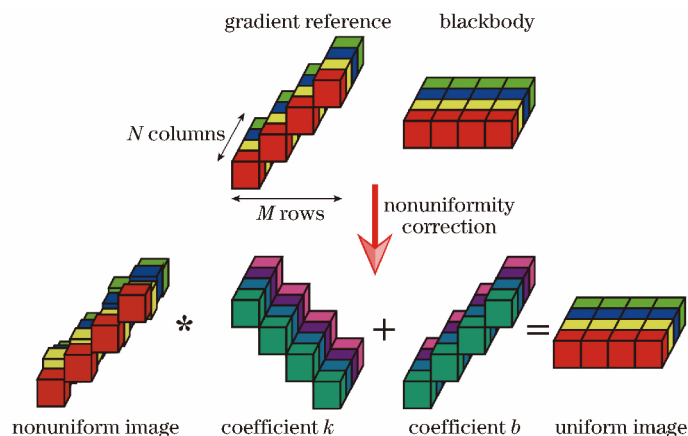


图 1 基于梯度场景非均匀校正算法示意图

Fig. 1 Diagram of the NUC method based on gradient scenes

由于对流层温度相对稳定,则每一行像素的均值基本稳定。对于标定时采用的阶梯状场景 I_2' 和待校正的图像,其每行像素的均值分别近似相等,因此可以解决探测器辐射响应非均匀性的问题。值得注意的是,本文方法会降低图像的动态范围。但在预警系统中,由于探测距离远,飞机目标在探测器靶面上只占有 $1\sim 2$ pixel,目标探测算法仅依赖局部像素,如 $5\text{ pixel}\times 5\text{ pixel}$ 的小区域。因此,本文方法对点目标检测无影响。

3 实际实验

为了证明本文方法的有效性,采用法国 Sofradir 公司生产的制冷型焦平面阵列(FPA)和以色列 CI 公司生产的低温黑体进行实验,探测器材料为碲镉汞。实验分为两个部分:低温黑体标定实验和外场实验。所采用的光学系统参数如表 1 所示。NETD 代表探测器的噪声等效温差, $F/\#$ 代表光学系统的 F 数。

表 1 光学系统参数

Table 1 Parameters of the optical system

Parameter	Value
Spectral band	7.7-11.3 μm
Resolution	320 pixel $\times$ 256 pixel
NETD	19 mK
Bit depth	14 bit
Focal length	38 mm
$F/\#$	2

与一般的成像系统不同,极限探测系统关注的是系统的探测概率、虚警率和作用距离。这些指标直接和目标的信杂比相关。信杂比定义为^[17]

$$S_{\text{CR}} = \frac{I_{\text{T}} - m_{\text{B}}}{\sigma_{\text{B}}}, \quad (14)$$

式中 I_{T} 是占 $1\sim 2$ pixel 的目标灰度均值, m_{B} 和 σ_{B} 分别是局部背景的均值和标准差。本文局部背景包含目标周围各向同性的 $5\text{ pixel}\times 5\text{ pixel}$ 。可以看出,对于给定目标和光学系统,为了提高信杂比,需要降低背景的局部标准差。为此,本文采用局部标准差 σ_{B} 定量评价红外预警系统中非均匀校正方法精度。

3.1 低温黑体标定实验

机载红外预警系统以天空为背景进行极限探测,由于场景温度在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,并随季节和天气变化,因此,需要利用低温黑体对整套光学系统标定。实验装置如图 2 所示。

将整套光学系统放入密室中,并以恒定速率通入干燥氮气,防止黑体表面结霜,以此提高实验精度。利用 Dalsa 采集卡采集到的原始数据通过 CameraLink 接口传输到工控机上。整套实验设备放置于光学隔振平台上。探测器积分时间为 $300\text{ }\mu\text{s}$ 。调节黑体温度,从 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 开始,每隔 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 采集一组图像,直至 $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度和图像平均灰度值的对应关系如图 3 所示。

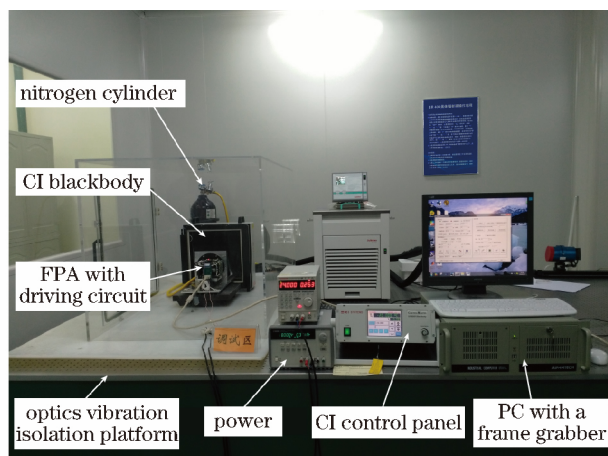


图 2 低温黑体标定平台

Fig. 2 Calibration platform with a low-temperature blackbody

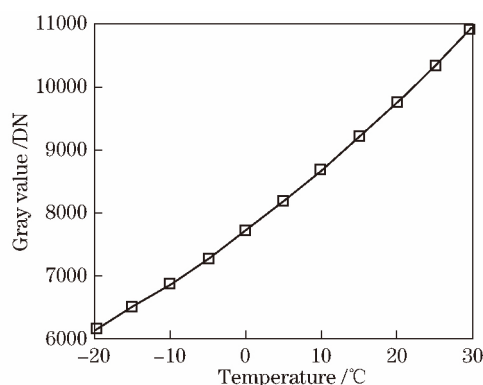
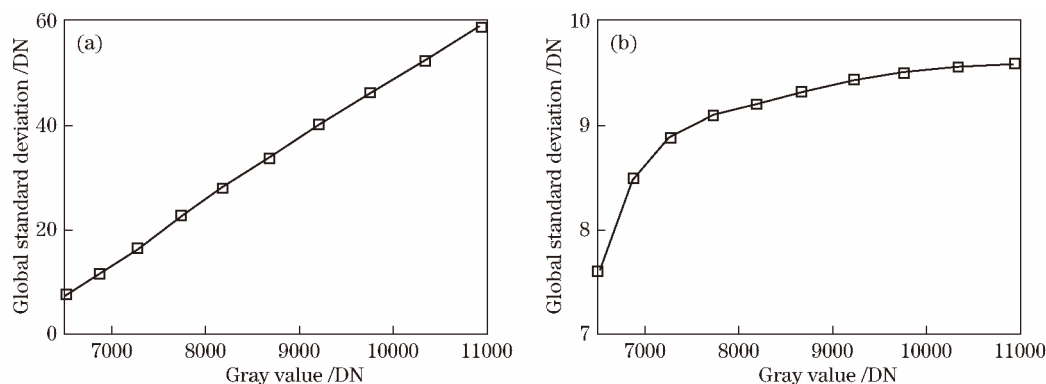


图 3 图像平均灰度值随黑体温度变化曲线

Fig. 3 Mean gray value of the image as a function of the temperature of the blackbody

假设待校正的图像为 I_3 , 对应的黑体温度为 T_3 , 利用两点法校正后的图像为 J'_3 。按以下两种情况进行实验: 1) 只改变图像 I_3 对应的温度 T_3 , 即, $T_1 = -20^\circ\text{C}$, $T_2 = -15^\circ\text{C}$, $T_3 \in [-15^\circ\text{C}, +30^\circ\text{C}]$; 2) 只改变参考温度点 T_2 , 即, $T_1 = -20^\circ\text{C}$, $T_2 \in [-15^\circ\text{C}, +30^\circ\text{C}]$, $T_3 = -15^\circ\text{C}$ 。根据(5)式, 分别利用图像 I_1 和 I_2 计算校正系数。两种情况下, 图像 J'_3 全局标准差随其灰度均值变化如图 4 所示。

图 4 图像 J'_3 的全局标准差曲线。(a) 情况 1; (b) 情况 2Fig. 4 Global standard deviation curves of image J'_3 . (a) Scenario 1; (b) scenario 2

从图 4(a)可以看出, 随着温度 T_3 远离参考温度点 T_1 和 T_2 , 非均匀校正后图像 J'_3 的全局标准差呈线性增长。由此可知, 对于两点校正法, 被标定温度点距离参考温度点越近, 校正精度越高。这一点是本文方法能够补偿探测器辐射响应非线性的理论基础。当 $T_2 = T_3 = -15^\circ\text{C}$ 时, J'_3 的全局标准差为 7.50, 并不为 0,

这主要是受随机噪声的影响,即 I_2 和 I_3 中的随机噪声并不相同。在图 4(b)中,被标定温度点 T_3 和参考温度点 T_1 之间的差值固定为 5°C 。随着 T_2 的增加,非均匀校正后图像全局标准差增加速度逐渐变慢,并最终收敛至 10。由此可知,对于两点校正法,当被标定温度点 T_3 距离其中一个参考温度点不超过 5°C 时,校正后图像全局标准差即可收敛至 10 以下。

3.2 外场实验

为了验证本文算法在红外预警系统中的有效性,利用原理样机进行外场实验,实验装置如图 5 所示。红外光学系统被放置在 FLIR 转台上,利用全球导航系统(GNS)测量飞机的经度、纬度、高度和型号等信息。探测器的积分时间为 $300\ \mu\text{s}$,实验地点的经度为 125.4012° ,纬度为 43.8475° ,海拔为 $0.33\ \text{km}$ 。

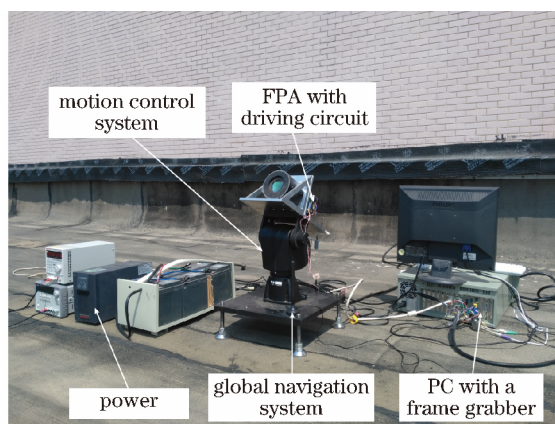


图 5 利用原理样机进行的外场实验示意图

Fig. 5 Outfield experiment with a principle prototype

相机俯仰角被锁定在 23° ,以此探测从长春龙嘉国际机场起飞的民航客机。改变相机的方位角,使视场中没有云。为抑制随机噪声的影响,连续采集 5 帧图像,其均值图像记为 I'_2 ,其平均灰度值为 6425.73。为了验证 I'_2 每行像素的均匀性,利用 $T_1 = -15^\circ\text{C}$ 和 $T_2 = 0^\circ\text{C}$ 的低温黑体对 I'_2 进行标定,标定后图像每行 256 个像素点的标准差均值为 6.42。继续改变相机的方位角,结合 GNS 上的辅助信息,使飞机进入视场中。保持方位角固定不动,连续获得 1200 帧图像序列。捕获的飞机型号为空中客车 A319-115,经度为 124.8058° ,纬度为 43.7138° ,海拔为 $6.97\ \text{km}$,航速为 $740.8\ \text{km/h}$,如图 6 所示。在大地直角坐标系中,计算出该飞机与光学系统之间的距离是 $50.64\ \text{km}$ 。

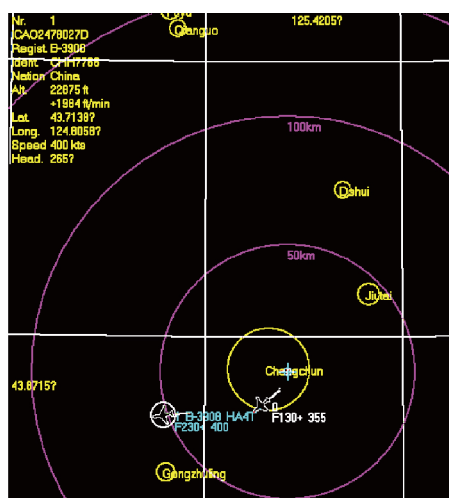


图 6 GNS 系统截屏

Fig. 6 Screen capture of the GNS system

不失一般性,分析第 50 帧图像,其平均灰度值为 6398.24。利用 $T_1 = -15^\circ\text{C}$ 和 $T_2 = 0^\circ\text{C}$ 的低温黑体数据进行两点法校正,校正系数为 k 和 b 。利用 $T_2 = 0^\circ\text{C}$ 的低温黑体数据和 I'_2 进行两点法校正,校正系数为 k'

和 b' 。第 200 列各行校正系数如图 7 所示。

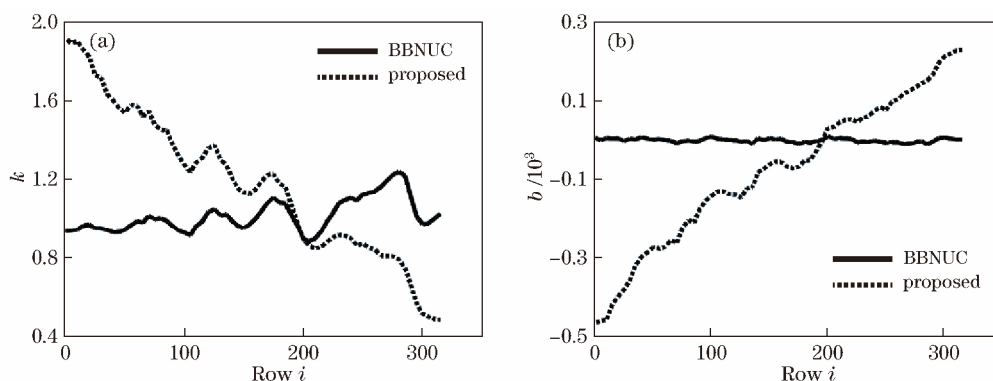


图 7 $j=200$ 时校正系数曲线对比。(a)校正系数 k ; (b)校正系数 b

Fig. 7 Comparison of the correction coefficient curves when $j=200$. (a) Coefficient k ; (b) coefficient b

从图 7 可以看出,对于 BBNUC 法, k 值在 1 附近, b 值在 0 附近。对于本文方法, k' 随行索引 i 增加而减小, b' 随行索引 i 增加而增加,这一点与 2.3 节分析一致。第 200 行各列校正系数如图 8 所示。从图 8 可以看出, k 和 k' 的波形一致。当行索引 i 固定在 200 时, r_i 是定值,由(9)式可知, k 和 k' 之间相差固定比例 $1+r_i$,即理论分析与实际实验一致。

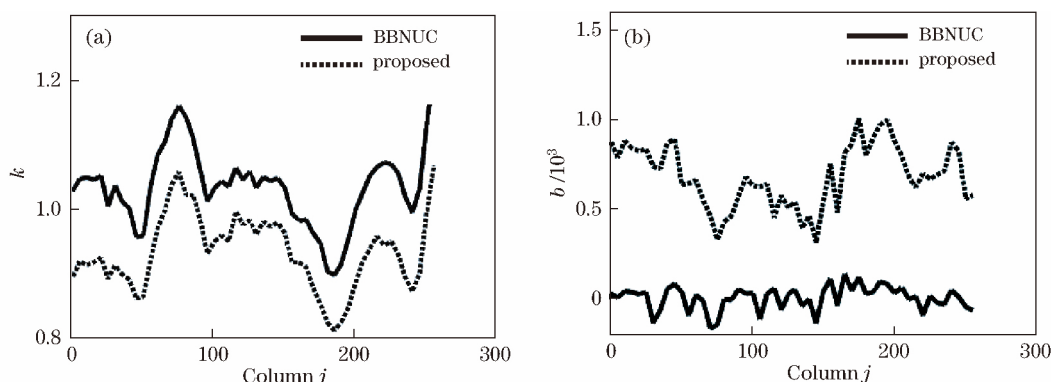


图 8 $i=200$ 时校正系数曲线对比。(a)校正系数 k ; (b)校正系数 b

Fig. 8 Comparison of the correction coefficient curves when $i=200$. (a) Coefficient k ; (b) coefficient b

利用 BBNUC 法和本文方法校正后的第 50 帧图像结果如图 9 所示,第二行子图像是探测到的空中客车 A319。采用文献[18]中的方法,结合 GNS 的辅助信息,确定了飞机目标的位置,如红色框图区域所示,其 S_{CR} 分别是 4.87 和 11.22。根据 3.1 节得出的结论,当待测场景本身分布不均匀时,校正精度下降。具体地,从图 9 可以看出,对于包含云的区域,本文方法的校正效果不亚于 BBNUC 法;对于相对平坦的区域,本文方法能明显提升图像质量。光学系统的艾里斑半径为 $23.18 \mu\text{m}^{[19]}$,与像元尺寸 $30 \mu\text{m}$ 接近,因此飞机在探测器靶面上占据不超过 4 个像元。

为定量评价本文校正方法,逐像素计算图 9 中校正后图像的局部标准差,局部标准差概率密度 $P(x)$ 曲线和概率分布 $F(x)$ 曲线如图 10 所示。其中, $F(x) = P(\sigma_B \leq x)$, σ_B 是 5×5 邻域的局部标准差。

从图 10 可以看出,与 BBNUC 方法相比,本文方法能够有效降低校正后图像局部标准差。利用 BBNUC 法和本文方法校正第 50 帧至第 80 帧,逐帧计算其局部标准差峰值,本文方法可以将局部标准差峰值的均值从 8.57 降低到 2.39。更低的局部标准差意味着更远的探测距离、更低的虚警率和更高的探测概率。可以看出,本文算法在红外预警系统中的有效性。为了进一步定量评价本文方法的有效性,逐帧计算了目标的信杂比,如图 11 所示。可以看出,对于给定的目标,本文方法可以将信杂比提高 5.47 以上。

3.3 本文算法的稳健性

为了验证本文算法的稳健性,分别在冬季、春季和夏季进行了外场实验,并随机选取一帧校正后的图像,其局部标准差峰值如表 2 所示。不失一般性,重点分析 $F(x)=50\%$ 对应的局部标准差,如表 3 所示。

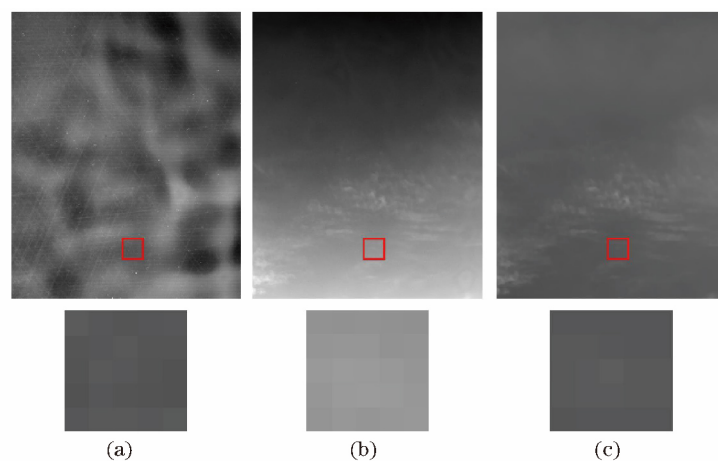


图 9 (a) 原始图像;(b) BBNUC 法校正后图像;(c) 本文方法校正后图像

Fig. 9 (a) Raw image ; (b) image corrected by BBNUC method ; (c) image corrected by proposed method

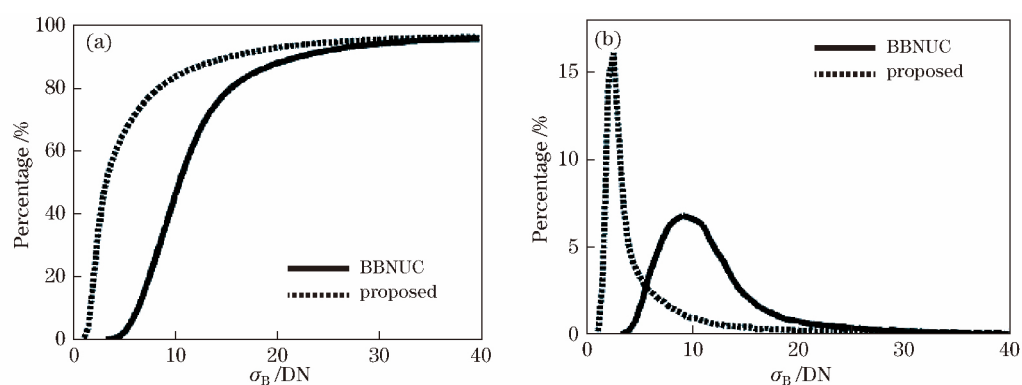


图 10 局部标准差对比。(a)概率分布曲线;(b)概率密度曲线

Fig. 10 Comparison of local standard deviation. (a) Curves of probability distribution ;
(b) curves of probability of density

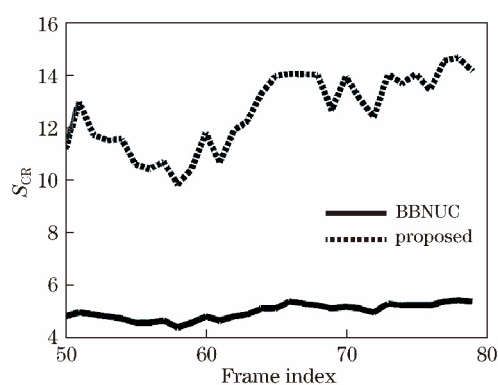


图 11 S_{CR} 随帧索引变化曲线

Fig. 11 S_{CR} as a function of frame index

表 2 不同季节局部标准差峰值

Table 2 Peak value of σ_B in different seasons

Date	BBNUC	Proposed
2016-01-06	4.54	2.35
2016-03-03	6.47	2.52
2016-06-06	9.02	2.47

表 3 不同季节 $F(x)=50\%$ 对应的局部标准差
Table 3 Value of σ_B when $F(x)=50\%$ in different seasons

Date	BBNUC	Proposed
2016-01-06	5.03	3.09
2016-03-03	7.82	3.41
2016-06-06	10.62	3.20

从表中可以看出,局部标准差随季节变化,温度越高,局部标准差峰值越大。在不同季节,本文方法局部标准差峰值均不超过 2.52,优于基于黑体的两点校正法。

值得说明的是,三组实验均是晴朗天气条件下进行。由于每一天的天气、大气透过率等实验条件不可重复,因此在进行重复实验时,实验结果会与表 2、3 存在相对偏差。但在不同的天气条件下,本文算法均优于基于黑体的两点校正法。

4 结 论

针对长波红外探测器辐射响应非均匀性和非线性问题,提出一种基于梯度场景的非均匀性校正方法。在 BBNUC 法的基础上,利用梯度场景和标准黑体计算出校正系数。一方面,本文方法不需要中断相机成像过程,能够校正整套光学系统的非均匀性;另一方面,由于该梯度场景和待校正的场景的辐射通量能够按行匹配,因此能够有效补偿探测器的辐射响应非线性。外场实验结果表明,与 BBNUC 法相比,本文方法可以将局部标准差峰值由 8.57 降低到 2.39,将相距 50.64 km 的空客 A319 型飞机的信杂比由 4.87 提高到 11.22。本文方法原理简单,易于工程实现,可以降低红外预警系统中图像的局部标准差,为提高探测距离和探测率提供可能。

参 考 文 献

- [1] Sun Hui, Xu Shuyan, Sun Shouhong, *et al.* Research on evaluation method of optical imaging sensors' photon response non-uniformity noise[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(4): 042302.
孙 慧, 徐抒岩, 孙守红, 等. 光电成像传感器光子响应非均匀性噪声评价方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(4): 042302.
- [2] Yang F, Wang Q, Li M. Light source system for high-precision flat-field correction and the calibration of an array detector[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(4): 040402.
- [3] Chen Qian. The status and development trend of infrared image processing technology[J]. Infrared Technology, 2013, 35(6): 311-318.
陈 钱. 红外图像处理技术现状及发展趋势[J]. 红外技术, 2013, 35(6): 311-318.
- [4] Sun Gang, Weng Ningquan, Xiao Liming, *et al.* Profile and character of atmospheric temperature[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(5): 592-596.
孙 刚, 翁宁泉, 肖黎明, 等. 大气温度分布特性及对折射率结构常数的影响[J]. 光学学报, 2004, 24(5): 592-596.
- [5] Perry D L, Dereniak E L. Linear theory of nonuniformity correction in infrared staring sensors [J]. Optical Engineering, 1993, 32(8): 1854-1859.
- [6] Duan Chengpeng, Liu Wei, Chen Yaohong, *et al.* Multiple background sampling adaptive non-uniform correction algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(10): 1020001.
段程鹏, 刘 伟, 陈耀弘, 等. 多本底采样自适应非均匀校正算法[J]. 光学学报, 2016, 36(10): 1020001.
- [7] Sun Z, Chang S, Zhu W. Radiometric calibration method for large aperture infrared system with broad dynamic range[J]. Applied Optics, 2015, 54(15): 4659-4666.
- [8] Zhou H, Qing H, Bai L, *et al.* Nonuniformity correction algorithm with nonlinear model for infrared focal plane arrays[J]. Infrared Physics & Technology, 2010, 53(1): 10-16.
- [9] Qian W, Chen Q, Bai J, *et al.* Adaptive convergence nonuniformity correction algorithm[J]. Applied Optics, 2011, 50(1): 1-10.
- [10] Harris J G, Yu-Ming C. Nonuniformity correction of infrared image sequences using the constant-statistics constraint[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(8): 1148-1151.

- [11] Hardie R C, Baxley F, Brys B, *et al.* Scene-based nonuniformity correction with reduced ghosting using a gated LMS algorithm[J]. *Optics Express*, 2009, 17(17): 14918-14933.
- [12] Leng Hanbing, Yi Bo, Xie Qingsheng, *et al.* Adaptive nonuniformity correction for infrared images based on temporal moment matching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0410003.
冷寒冰, 易 波, 谢庆胜, 等. 基于时域矩匹配的红外图像自适应非均匀性校正[J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0410003.
- [13] Liu N, Qiu H. A time-domain projection-based registration-scene-based nonuniformity correction technology and its detailed hardware realization[J]. *Optical Review*, 2014, 21(1): 17-26.
- [14] Ren J, Chen Q, Qian W, *et al.* Multiframe registration based adaptive nonuniformity correction algorithm for infrared focal plane arrays[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2014, 33(2): 122-128.
- [15] Zuo C, Chen Q, Gu G, *et al.* Scene-based nonuniformity correction algorithm based on interframe registration[J]. *Journal of the Optical Society of America A, Optics Image Science and Vision*, 2011, 28(6): 1164-1176.
- [16] Leathers R A, Downes T V, Priest R G. Scene-based nonuniformity corrections for optical and SWIR pushbroom sensors[J]. *Optics Express*, 2005, 13(13): 5136-5150.
- [17] Dong X, Huang X, Zheng Y, *et al.* A novel infrared small moving target detection method based on tracking interest points under complicated background[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 65(7): 36-42.
- [18] Zhu F, Qin S. A moving IR point target detection algorithm based on reverse phase feature of neighborhood in difference between neighbor frame images[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2006, 9(3): 225-232.
- [19] Trantham K, Reece T J. Demonstration of the Airy disk using photography and simple light sources[J]. *American Journal of Physics*, 2015, 83(11): 928-934.