

文章编号: 1672-8785(2022)04-0033-08

一种基于定标的红外图像非均匀性 分区域校正算法

宗永红¹ 高 昕^{1*} 李希宇¹ 李 周² 胡 蕾¹
雷呈强¹ 郑东昊¹ 师 恒^{1,3}

(1. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094;
2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
3. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

摘 要: 红外探测器的非均匀性问题直接影响红外成像质量和测量精度。地基红外辐射测量系统对远距离飞行目标进行成像时往往不能占满全靶面区域。为提高图像质量, 提出了一种基于定标的非均匀性分区域校正算法。以靶面大小为 640×512 的制冷型中波红外探测器为实验对象, 基于黑体定标的两点校正法, 采用全靶面校正算法及本文算法进行了验证。结果表明, 当成像区域小于全靶面的 $1/3$ 时, 分区域非均匀性校正后非均匀性误差低于 0.002% 。与全靶面非均匀性校正算法相比, 此校正算法使非均匀度进一步降低了 30% 至 75% 不等, 非均匀性误差的下降率大于 30% 。采用本文算法后, 各区域的非均匀度进一步下降, 校正目视效果进一步提高。因此该校正方法具有一定的工程应用价值。

关键词: 红外图像; 地基红外辐射测量; 非均匀性校正; 辐射定标

中图分类号: TN215 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.04.005

A Nonuniformity Regional Correction Algorithm for Infrared Image Based on Calibration

ZONG Yong-hong¹, GAO Xin^{1*}, LI Xi-yu¹, LI Zhou², HU Lei¹,
LEI Cheng-qiang¹, ZHENG Dong-hao¹, SHI Heng^{1,3}

(1. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China;
2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
3. Xian Institute of Optics Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xian 710119, China)

Abstract: The nonuniformity of infrared detectors directly affects the quality of infrared imaging and measurement accuracy. Ground-based infrared radiation measurement systems often can not occupy the full surface of the detector when imaging long-distance flying targets. In order to improve image quality, a method of nonuniformity regional correction based on calibration is proposed. Taking the cooled mid-wave infrared detector with a target surface of 640×512 as the experimental object, based on the two-point calibration method of black-

收稿日期: 2021-12-30

作者简介: 宗永红(1991-), 女, 山东临沂人, 硕士, 主要研究方向为光电测量技术及光学装备应用。

E-mail: zongyongh16@163.com

body calibration, the whole surface calibration algorithm and the algorithm proposed in this paper are used for verification. The results show that when the imaging area is less than 1/3 of the surface, the nonuniformity error after region nonuniformity correction is less than 0.002%. Compared with the full-target nonuniformity correction algorithm, this correction algorithm further reduces the nonuniformity by about 30% to 75%, and the reduction rate of the nonuniformity error is greater than 30%. After using the correction algorithm in this paper, the nonuniformity of each area is further reduced, and the visual effect of correction is further improved. Therefore, the correction method has certain engineering application value.

Key words: infrared detector; ground-based infrared radiation measurement; nonuniformity correction; radiometric calibration

0 引言

随着红外探测器及测控技术的发展,越来越多的地基红外辐射特性测量系统被用来对飞行的远距离特性目标进行实时跟踪观测和高精度红外辐射特性测量,并输出红外图像。作为红外辐射测量系统的核心元件之一,红外探测器的非均匀性将影响红外成像质量与辐射测量精度。由于材料、制造工艺和工作环境等因素的影响^[1-3],在辐照均匀条件下各像元的响应灰度值并不相同,导致探测器普遍存在非均匀性问题^[1,4]。成像时,该非均匀性在图像上多以乘性噪声、加性噪声或二者混合的形式表现为明暗不均的图案噪声,使图像中的目标模糊不清^[5]。在红外辐射测量时,非均匀性的存在导致探测器输出的图像灰度无法正确反映目标辐射量的变化,从而影响测量精度^[2]。在实时跟踪不同目标时,尤其对于点目标,成像往往不能占满全靶面区域。为提高目标图像的成像质量,需对探测器成像区域的非均匀性进行重点研究,且在探测器使用前需对非均匀性进行校正。

目前对探测器的非均匀性研究主要集中在面向全靶面的校正算法上^[6-7],可分为基于定标和基于场景的校正方法两大类^[8-9]。其中基于场景的校正方法往往要求图像场景中存在运动,计算量复杂、鲁棒性差,容易产生“鬼影”^[10],难以在硬件中实现。基于定标的校正方法主要有一点校正、两点校正以及曲线拟合校正等方法,原理简单、计算量小,适用于像元输出特性为非时变的场景。由于制冷型红外

探测器具有良好的线性特性,因此适合采用基于定标的非均匀性校正算法。

为提高局部成像区域的图像质量,本文根据地基红外辐射特性测量系统对远距离飞行目标进行实时跟踪观测时的成像特点,提出了一种基于定标的非均匀性分区域校正算法。利用靶面大小为 640×512 的制冷型 HgCdTe 中波红外探测器进行非均匀性测试实验。按照探测器全靶面不同比例划分区域,采用基于定标的校正法对采集的图像分别进行全靶面校正和分区域校正,并通过各区域校正后的非均匀性及非均匀性误差比较两种算法的性能。实验结果表明,非均匀性分区域校正算法切实有效,为后续地基红外辐射特性测量系统获得高精度目标特性、输出高质量红外图像奠定了基础。

1 基于定标的非均匀性校正原理

1.1 非均匀性两点校正

两点校正法^[11]采用线性时不变响应模型描述像元的响应特性,其使用前提如下:探测器的光电响应是线性的或者局部线性的,具有时间稳定性,且低频噪声的影响较小,非均匀性引入固定模式的乘性和加性噪声^[12]。在此条件下,探测器在均匀辐射背景下的响应可表示为

$$A_{i,j}(\Phi) = U_{i,j}\Phi + Q_{i,j} \quad (1)$$

式中, Φ 为辐射通量, $U_{i,j}$ 为坐标 (i,j) 的像元的响应率, $Q_{i,j}$ 为坐标 (i,j) 的像元的偏移量。对于每个像元来说, $U_{i,j}$ 与 $Q_{i,j}$ 的值是固定、不随时间变化的。由于探测器各个像元的响应不一定,在相同的辐射通量 Φ 下各 $A_{i,j}(\Phi)$ 不同,需对其进行校正,即

$$S(i, j) = G(i, j)A_{i, j}(\Phi) + B(i, j) \quad (2)$$

式中, $S(i, j)$ 为探测器校正后的输出值; $G(i, j)$ 为校正增益; $B(i, j)$ 为校正偏置; (i, j) 为像素的坐标值。

在光路中插入一个均匀辐射黑体。在高温 T_H 和低温 T_L 下, 分别取 M 帧图像, 测得探测器所有像元的平均响应:

$$\begin{aligned} S_L &= G(i, j)A_{i, j}(\Phi_L) + B(i, j) \\ S_H &= G(i, j)A_{i, j}(\Phi_H) + B(i, j) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $A_{i, j}(\Phi_L)$ 为 T_L 时像元 (i, j) M 帧图像数据的平均值; $A_{i, j}(\Phi_H)$ 为 T_H 时像元 (i, j) M 帧图像数据的平均值。计算每个像元的校正系数:

$$\begin{aligned} G(i, j) &= \frac{S_H - S_L}{A_{i, j}(\Phi_H) - A_{i, j}(\Phi_L)} \\ B(i, j) &= \frac{S_H A_{i, j}(\Phi_L) - S_L A_{i, j}(\Phi_H)}{A_{i, j}(\Phi_L) - A_{i, j}(\Phi_H)} \end{aligned} \quad (4)$$

通过将校正系数代入式(2)来进行校正。

1.2 非均匀性度量

非均匀性度量是评价非均匀性校正效果好坏的依据。目前度量方法大致分为主观法和客观法两类^[13]。常用的客观度量法是将红外探测器输出的响应均方根误差与所有像元响应平均值的百分比作为非均匀性(NUC)的度量^[15], 其表达式为

$$\begin{aligned} NUC &= \frac{1}{x_{avg}} \\ &\times \sqrt{\frac{1}{M \times N - d} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M (x_{i, j} - x_{avg})^2} \times 100\% \\ x_{avg} &= \frac{1}{M \times N - d} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M x_{i, j} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $x_{i, j}$ 为图像中某一指定像素点的灰度值; x_{avg} 为图像灰度均值; $M \times N$ 为探测器的像素数; d 为坏元数目。

由式(5)算得的结果为探测器的总响应非均匀性, 用于表征非均匀性的整体性能。为表征各个像元的响应非均匀性以及不同响应非均匀性的像元分布情况, 需得到红外探测器每个像元响应的非均匀性。计算方式^[14]如下:

$$NUC_{i, j} = \frac{x_{i, j} - x_{avg}}{x_{avg}} \times 100\% \quad (6)$$

2 非均匀性校正实验及结果分析

2.1 非均匀性测试实验

本文以靶面大小为 640×520 的制冷型 HgCdTe 中波红外探测器为研究对象, 对此探测器的红外成像仪进行测试。该红外成像仪的主要参数见表 1。

表 1 中波红外成像仪的主要参数

参数名称	数值
波段范围	$3.7 \mu\text{m} \sim 4.8 \mu\text{m}$
光圈	$f/2$
像元尺寸	$15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$
位深	12
像元数	$640(\text{H}) \times 512(\text{V})$
工作温度	$-40^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$

以黑体作为均匀光源, 参考国家标准红外焦平面参数测试方法^[15]对该中波红外成像仪进行非均匀性测试。检测示意图及装置图如图 1 所示。

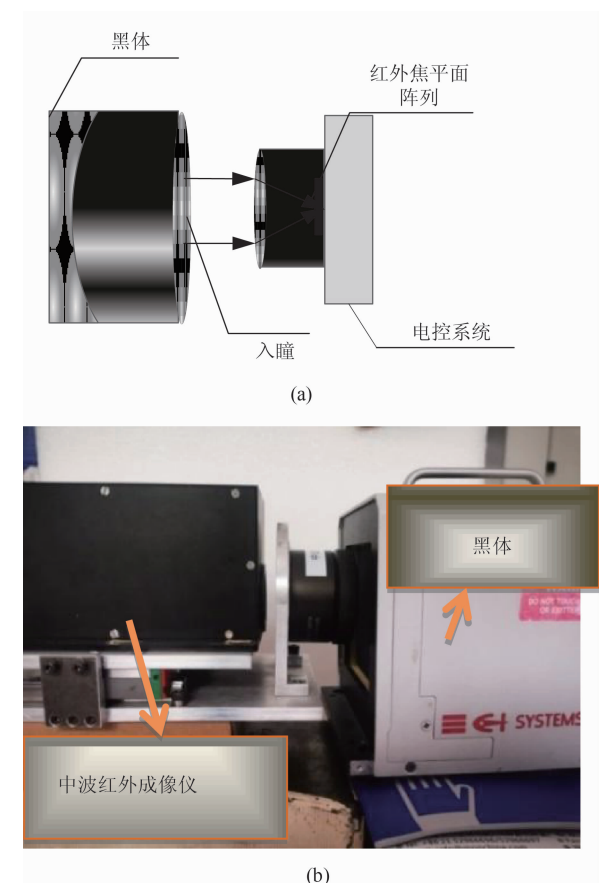


图 1 (a)实验检测示意图;(b)实验检测装置图

表 2 全靶面校正前后的非均匀性对比

273 K			283 K		
校正前非均匀性	校正后非均匀性	下降率	校正前非均匀性	校正后非均匀性	下降率
5.17%	0.27%	94.78%	4.96%	0.23%	95.36%
293 K			303 K		
校正前非均匀性	校正后非均匀性	下降率	校正前非均匀性	校正后非均匀性	下降率
4.88%	0.21%	95.70%	4.87%	0.17%	96.51%

如图 1 所示, 将黑体放置在红外成像仪前面, 覆盖系统入瞳。依次设置黑体温度为 263 K、273 K、283 K、293 K、303 K 和 313 K, 并设置探测器的积分时间为 3 ms。待黑体稳定后, 在各温度点分别采集不少于 20 张的原始图像。利用采集的原始图像进行非均匀性计算及校正分析。文中各采集温度点的非均匀性计算结果为 20 帧图像非均匀性的平均值。

2.2 校正效果分析

2.2.1 全靶面非均匀性校正分析

基于两点校正法, 将定标点选为 263 K 和 313 K。根据式(2)~式(5)计算校正系数, 然后对探测器全靶面非均匀性进行校正, 并计算校正前后的全靶面非均匀性结果(见表 2)。

校正前, 全靶面的非均匀性计算数值在 4.9% 左右, 均匀性较差。采用全靶面校正算法后, 在采集温度点处非均匀性有所下降, 但校正后的非均匀性数值仍较大, 图像校正效果较差。

根据式(6)计算该中波红外探测器各像元的非均匀性, 并绘制非均匀性曲线(见图 2)。

图 2 中, 非均匀性数值为负数表示像元响应值小于平均响应值, 数值为正数表示像元响应值大于平均响应值。从图中可以看出, 中波红外探测器各个像元的响应非均匀性存在波动, 绝大多数像元的响应非均匀性集中在 $-0.18 \sim 0.15$ 之间, 部分像元的非均匀性较大, 影响整体的非均匀性。

图 3 为该红外探测器在温度为 303 K 的目标均匀辐照下的原始二维非均匀性图。从图中可以看出不同像元的响应差异分布情况。在探测器靶面中心一定范围内, 部分像元的响应值大于平均响应值; 在探测器边缘处, 部分像元

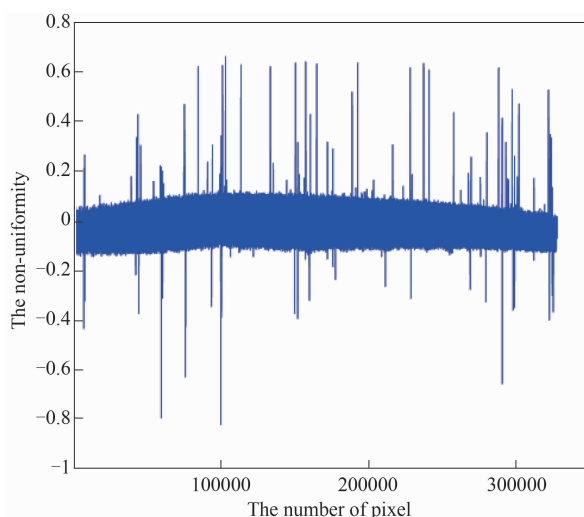


图 2 红外探测器的非均匀性曲线(303 K)

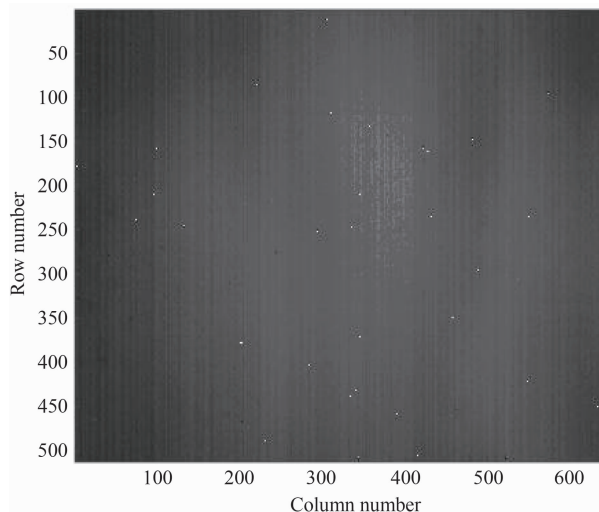


图 3 二维非均匀性图(303 K)

的响应值小于平均响应值, 靶面上局部区域的非均匀性不同。

由上面的分析可知, 探测器不同区域的非均匀性性能不同。根据校正原理, 相应的校正增益、偏置系数存在一定差异, 而全靶面非均匀性校正对探测器每个区域的校正增益、偏置系数相同, 对局部区域的成像校正效果较差。

2.2.2 非均匀性分区域校正分析

对红外图像进行非均匀性校正时, 基于成像区域像元的非均匀性数据对图像的非均匀性校正具有重要意义。由于全靶面非均匀性校正方法对局部区域的成像校正效果不佳, 本文根据地基红外辐射特性测量装备对远距离飞行目标的成像特点, 采用基于成像区域像元的非均匀性数据进行图像非均匀性校正。

本文在探测器靶面中心选取约占全靶面的 1/10、1/6、1/3 和 1/2 (像元数分别为 64×64 、 128×128 、 200×200 和 320×256) 的像元范围, 基于两点校正法进行分区域校正(定标点为 263 K 和 313 K)。校正算法流程如图 4 所示。

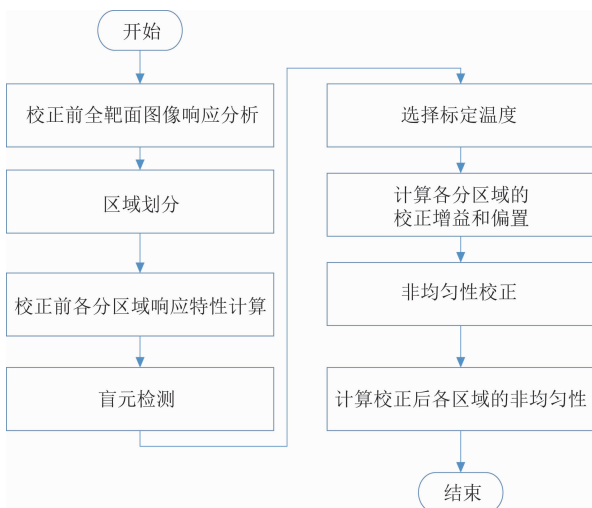


图 4 分区域校正算法的流程图

根据式(5)计算各区域校正前后的非均匀性结果, 并绘制非均匀性曲线。具体结果分别如表 3 和图 5 所示。

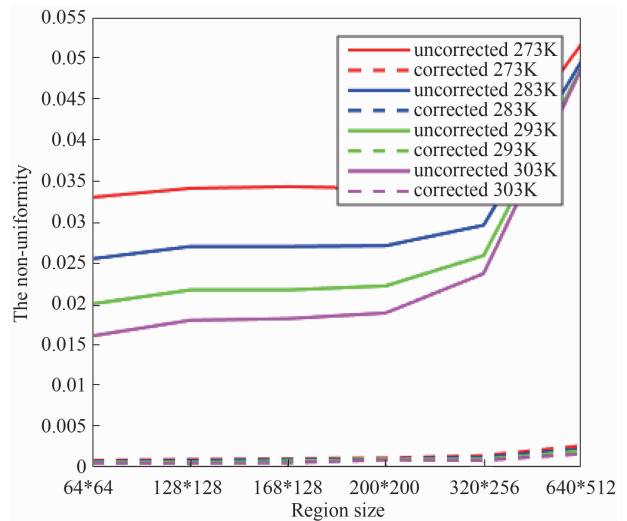


图 5 分区域校正前后非均匀性变化对比

由表 3 和图 5 可知, 校正前, 分区域非均匀性曲线存在多处坡峰, 成像噪声大, 各区域的非均匀性数值较大, 全靶面的均匀性最差。采用分区域校正算法校正后, 各区域的非均匀性数值明显降低。在靶面 1/2 区域范围内, 校正后各采集温度点处的非均匀性比校正前至少降低了 90%, 非均匀性曲线变化更加光滑、稳定。由此可知, 分区域校正算法使探测器各区域均匀性得到改善, 各像元的响应基本一

表 3 分区域校正前后的非均匀性对比

区域大小	温度					
	273 K			283 K		
	校正前非均匀性	校正后非均匀性	下降率	校正前非均匀性	校正后非均匀性	下降率
64×64	3.30%	0.09%	97.26%	2.55%	0.08%	96.93%
128×128	3.41%	0.10%	97.07%	2.70%	0.09%	96.76%
200×200	3.41%	0.12%	96.48%	2.71%	0.11%	95.94%
320×256	3.52%	0.15%	95.74%	2.96%	0.13%	95.61%
	293 K			303 K		
区域大小	校正前非均匀性	校正后非均匀性	下降率	校正前非均匀性	校正后非均匀性	下降率
64×64	2.00%	0.07%	96.57%	1.61%	0.06%	96.48%
128×128	2.17%	0.07%	96.56%	1.80%	0.06%	96.76%
200×200	2.22%	0.11%	95.05%	1.89%	0.10%	94.78%
320×256	2.59%	0.11%	95.75%	2.37%	0.09%	96.13%

致, 区域间的响应差异变小。此校正算法对各区域具有较好的校正效果, 能够较好地满足目前地基红外辐射特性成像的需求。

2.2.3 分区域校正与全靶面校正算法的效果比较

分别采用分区域校正(Regional Correction, RC)算法与全靶面校正(Full Target Surface Correction, FC)算法对测试中采集的每个温度点的 20 帧图像进行处理。计算 20 帧图像的非均匀性均值, 代表该温度点下的非均匀性(NUC)计算结果。计算 20 帧图像的非均匀性标准差, 用于表示该温度点下的非均匀性误差(σ_{nuc})。计算结果见表 4。

表 4 中, 符号“—”表示分区域非均匀性校正后对比全靶面非均匀性校正后的非均匀性及误差的变化情况。由分析可知, 与全靶面非均匀性校正相比, 采用分区域校正算法处理后各区域的非均匀性数值进一步降低。尤其在小于探测器靶面 1/3 的区域内, 全靶面非均匀性校正算法使非均匀性误差低于 0.012%; 分区

域非均匀性校正算法使非均匀性误差低于 0.002%, 比全靶面校正算法结果的下降率超过 30%, 非均匀性数值下降率高于 30%。由此可知, 分区域校正算法对成像区域的校正效果更好, 针对性更强, 进一步减小了对测量精度与成像质量等性能指标的不良影响。

图 6(a)和 6(b)所示分别为采用全靶面和分区域非均匀校正算法对温度为 303 K、大小约占探测器全靶面 1/2 的成像区域进行校正后的图像能量(未对坏元进行填充等处理)。图中颜色代表像元响应情况。对比两图可知, 与全靶面校正算法相比, 分区域校正后的图像能量更高, 像元响应更加一致, 图像噪声降低, 校正目视效果提高; 另一方面, 分区域校正过程中只需计算并校正区域范围内的像元数(低于全靶面校正的像元数), 复杂度降低, 校正效率提高。由以上分析可知, 分区域校正算法对局部区域图像校正更加有效, 可更好地满足靶场地基红外辐射测量精度、成像质量以及快速应急响应等方面的要求。

表 4 两种算法校正后各区域的非均匀性变化

区域大小	温度						
	273 K			283 K			
		FC	RC	rate	FC	RC	rate
64×64	NUC	0.16%	0.09%	—43.57%	0.20%	0.08%	—60.81%
	σ_{nuc}	0.0075%	0.0012%	—83.66%	0.0049%	0.00086%	—82.46%
128×128	NUC	0.16%	0.10%	—37.50%	0.21%	0.09%	—58.28%
	σ_{nuc}	0.0041%	0.0014%	—65.23%	0.00360%	0.00075%	—79.49%
200×200	NUC	0.18%	0.12%	—33.33%	0.20%	0.11%	—45.00%
	σ_{nuc}	0.0116%	0.0016%	—85.76%	0.0021%	0.00097%	—54.82%
320×256	NUC	0.17%	0.15%	—11.76%	0.17%	0.13%	—23.53%
	σ_{nuc}	0.00649%	0.0028%	—56.80%	0.0017%	0.00142%	—16.42%
区域大小	293 K			303 K			
		FC	RC	rate	FC	RC	rate
64×64	NUC	0.22%	0.07%	—68.84%	0.22%	0.06%	—74.21%
	σ_{nuc}	0.0033%	0.00057%	—82.56%	0.0048%	0.00054%	—88.78%
128×128	NUC	0.22%	0.07%	—68.84%	0.22%	0.06%	—74.21%
	σ_{nuc}	0.0017%	0.00054%	—68.04%	0.0023%	0.00034%	—84.95%
200×200	NUC	0.19%	0.11%	—42.11%	0.17%	0.10%	—41.94%
	σ_{nuc}	0.0013%	0.00083%	—35.43%	0.0012%	0.0006%	—50.54%
320×256	NUC	0.16%	0.11%	—31.25%	0.13%	0.09%	—29.38%
	σ_{nuc}	0.0007%	0.0006%	—19.72%	0.001%	0.0007%	—32.04%

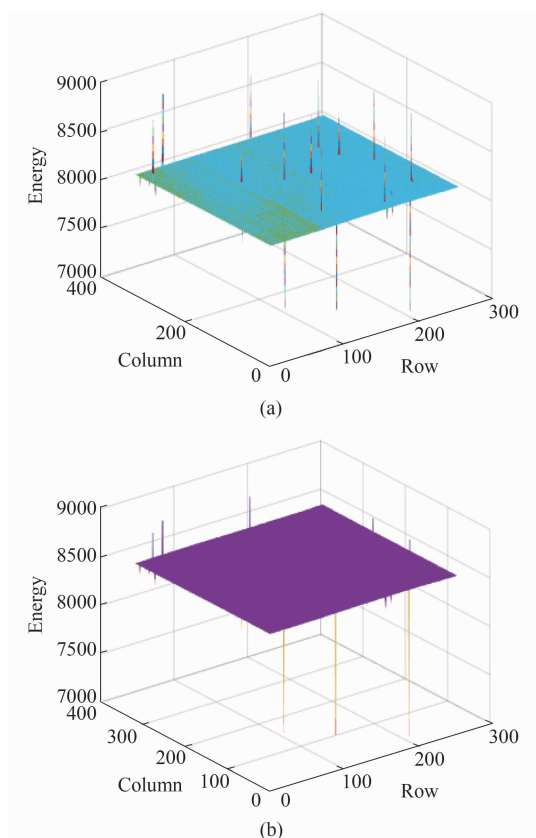


图 6 (a)全靶面校正后的图像能量(303 K, 320×512);
(b)分区域校正后的图像能量(303 K, 320×512)

3 结论

根据靶场地基红外辐射测量装备对远距离飞行目标实时跟踪观测时的成像特点, 本文提出了一种基于两点定标的红外图像非均匀性分区域校正算法。综合考虑目标尺寸、飞行高度、天空背景和光学系统等因素的弥散影响, 按照探测器全靶面尺寸的 $1/10$ 、 $1/6$ 、 $1/3$ 和 $1/2$ 比例进行了区域划分, 并分别通过全靶面非均匀性校正算法和本文算法对各区域进行了校正分析。以靶面大小为 640×512 的制冷型中波红外探测器为例, 进行了非均匀性实验及校正效果分析。

结果表明, 与校正前相比, 在探测器全靶面的 $1/3$ 区域范围内, 用分区域校正算法校正后的非均匀性至少下降了 90% ; 与全靶面非均匀性校正算法相比, 在小于探测器靶面 $1/3$ 的区域内, 分区域校正算法使非均匀性下降了 30% 至 75% 不等, 非均匀性误差下降率大于

30% 。用分区域校正算法校正后非均匀性误差低于 0.002% 。该算法明显改善了各区域的均匀性性能, 降低了图像噪声, 使得图像质量进一步提高, 校正目视效果得到改善。本文算法可为进一步实现地基红外辐射的高分辨率成像、高精度测量及快速应急响应能力等应用提供重要参考, 具有一定的工程应用前景。

参考文献

- [1] 邢素霞. 红外热成像与信号处理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [2] 杨国庆, 乔彦峰. 地基红外辐射测量系统提高测量精度的关键技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2020.
- [3] Qin Y, Li B. Effective Infrared Small Target Detection Utilizing a Novel Local Contrast Method [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, **13**(12): 1890–1894.
- [4] 姬弘楨. 热红外高灵敏度光谱图像信息处理技术研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2016.
- [5] 吕宝林, 佟首峰, 徐伟, 等. 基于配准的机载红外非均匀性校正技术应用 [J]. *中国光学*, 2020, **13**(5): 1124–1137.
- [6] 王明昌, 樊养余, 陈宝国, 等. 基于 SOPC 的红外图像自适应非均匀性校正设计 [J]. *红外与激光工程*, 2017, **46**(6): 0628001.
- [7] 钱润达, 赵东, 周慧鑫, 等. 基于加权引导滤波与时域高通滤波的非均匀性校正算法 [J]. *红外与激光工程*, 2018, **42**(12): 1–6.
- [8] 杨正兴, 谈新权, 尚小冬. 红外焦平面非均匀性校正算法研究与实现 [J]. *红外技术*, 2004, **26**(3): 11–14.
- [9] Perry D L, Dereniak E L. Linear Theory of Non-uniformity Correction in Infrared Staring Sensors [J]. *Optical Engineering*, 1993, **32**(8): 1854–1859.
- [10] 樊凡, 马泳. 基于场景的红外非均匀性校正算法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [11] 韩开亮. 基于两点法的红外图像非均匀性校正算法及其 DSP 实现 [J]. *红外技术*, 2007, **29**(9): 541–544.

- [12] 李旭, 杨虎. 基于两点的红外图像非均匀性校正算法应用 [J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(8): 608-610.
- [13] 毛小群, 石俊生, 何文学. 基于定标法的红外图像非均匀性校正 [J]. *云南师范大学学报*, 2009, **29**(4): 57-61.
- [14] 费晟. 基于国产 InGaAs 焦平面探测器的短波红外成像关键技术研究 [D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [15] 红外焦平面阵列特性参数测试技术规范 GB/Y 17444-2013 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.