

## 微分约束法红外条纹非均匀校正

华玮平,赵巨峰,崔光芒,公晓丽,朱礼尧  
(杭州电子科技大学电子信息学院,浙江 杭州 310018)

**摘要:**红外成像过程中常出现条纹非均匀性噪声,基于场景的校正方法可以有效地减少条纹噪声的影响。本文提出了一种基于微分约束条纹非均匀噪声校正方法。首先分析了红外图像条纹非均匀噪声的灰度分布特性,根据图像在水平及竖直方向梯度的差异建模并构造惩罚函数;通过引入权重函数,对惩罚函数进行最优化推导求解得到校正图像。通过真实场景的实验,对校正结果的主客观分析表明本文方法较对比方法有所提升,对于图像的细节和边缘的破坏程度较小,同时本文方法运行更快并实现了硬件化测试。

**关键词:**红外图像;条纹非均匀噪声;微分约束

**中图分类号:**TP391 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2018.07.024

### Infrared stripe non-uniformity correction based on differential constraints

HUA Wei-ping, ZHAO Ju-feng, CUI Guang-mang, GONG Xiao-li, ZHU Li-yao  
(School of Electronics and Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Infrared imaging is often disturbed by stripe non-uniformity noise, while scene-based correction method can effectively reduce the influence of stripe noise. A stripe non-uniformity correction method based on differential constraint is proposed. Firstly, the gray distribution of stripe non-uniformity is analyzed and the penalty function is constructed by the difference of horizontal gradient and vertical gradient. By introducing the weight function, the penalty function is optimized to obtain the corrected image. Compared with other methods, experiments on real scenes show that the proposed method performs better in both subjective and objective analysis, and has less damage to image's edge and detail. Meanwhile, the proposed method runs faster, and it is well applied in hardware.

**Key words:** infrared image; stripe non-uniformity; differential constraint

#### 1 引言

红外成像技术在遥感<sup>[1]</sup>、生物<sup>[2]</sup>、军事<sup>[3]</sup>、农业<sup>[4]</sup>等多个方面均有着重要的应用。然而,焦平面阵列传感器受到制造工艺、材料等影响,其非均匀响应导致输出信号包含固定模式噪声,影响了成像质量,通常这种噪声呈现非均匀条纹状。为了提高成

像系统的成像质量,需要校正条纹非均匀性(Non-Uniformity Correction, NUC)。

条纹 NUC 方法一般有两种:基于定标的校正以及基于场景的校正。基于定标的校正算法需将成像系统与标准源对比,操作简单但局限性较大,且需要标准辐射源<sup>[5]</sup>。基于场景的校正是根据场

**基金项目:**浙江省自然科学基金项目(No. LY18F050007);国家自然科学基金项目(No. 61405052);广州市科技计划项目(No. 201704020182);广东省水利科技创新项目(No. 2017-23)资助。

**作者简介:**华玮平(1993-),男,硕士研究生,主要从事光学成像、红外技术方面的研究。E-mail:564810049@qq.com

**通讯作者:**赵巨峰(1985-),男,博士,副教授,主要从事计算成像等方面的研究。E-mail:dabaozjf@hdu.edu.cn

**收稿日期:**2017-11-09;**修订日期:**2017-12-17

景或图像中的特征而提取参数,实现 NUC,应用更广、自适应更强,但相对耗时或收敛时间长,且容易产生鬼影等效应。Qian 等人使用最小均方误差 (Minimum Mean Squared Error, MMSE) 的方法对单帧图像进行 NUC,可直接从图像中提取参数并校正,且较好地克服了收敛时间问题<sup>[6]</sup>。Sui 等人提出了基于神经网络的 NUC 算法,可实现实时校正,但需要事先预备好字典学习<sup>[7]</sup>。Zhao 等人使用梯度约束优化模型对条纹非均匀噪声进行约束,效果较好但需要人工调整参数<sup>[8]</sup>。张盛伟等人利用引导滤波器从列累加平均向量中提取条纹噪声校正项并用该噪声校正项对图像进行校正,但是对于场景运动检测较为严苛,算法收敛较慢,所需时间长<sup>[9]</sup>。Munch 等人结合小波-快速傅里叶变换在频域中处理红外图像中的条纹,复原效果较好,但其在频域处理耗费的时间较长<sup>[10]</sup>。场景法中,包含单帧以及多帧方法。单帧法仅利用单幅图像,结合图像优化理论,实现 NUC,帧内计算耗时长,但不存在收敛时间(帧数)问题;多帧法,基于器件非均匀性不变的特性,根据场景变化迭代获取像元增益与偏置参数等实现校正,帧内计算耗时短,但需要一定的帧数实现收敛。

鉴于多帧法收敛速度较慢,单帧法可从第一帧就实现 NUC。此外,由于条纹非均匀噪声与边缘细节较难区分,传统的单帧条纹 NUC 算法中经常会有误判的情况,导致在校正的同时造成细节模糊;传统单帧法计算耗时较长。为实现第一帧快速 NUC 处理,本文提出一种基于场景的加权微分约束红外条纹非均匀性校正算法。对图像条纹非均匀噪声进行分析并建模,根据灰度微分概率分布等规律,设计引入加权矩阵,构造 NUC 模型的惩罚函数并优化方程,最终求取最优解。实验表明,本文所采用的校正方法较好的校正了图像中的条纹非均匀噪声,有效地克服了细节模糊问题;同时单帧图像校正速度较快。

## 2 条纹非均匀性分析

根据观察,红外条纹非均匀噪声常会导致图像水平方向( $x$  方向)的梯度发生明显的改变,而垂直方向( $y$  方向)的梯度基本不变,因而本文首先对上述现象进行验证。



(a)含有条纹非均匀噪声的原始图像



(b)图1(a)的NUC结果

图1 原始图像及 NUC 图像

Fig. 1 The original image and NUC image

如图 1 所示,(a)和(b)分别是具有条纹非均匀噪声的红外图像以及经过校正后的结果。对图像的水平、竖直方向( $x, y$  方向)梯度做出如下的定义:

$$Hg(i, j) = O(i, j) - O(i, j - 1) \quad (1)$$

$$Vg(i, j) = O(i, j) - O(i - 1, j) \quad (2)$$

其中, $O$  为图像,  $(i, j)$  代表像素坐标;  $Hg(i, j)$  是  $O$  中  $(i, j)$  点  $x$  方向的梯度;  $Vg(i, j)$  是  $O$  中  $(i, j)$  点  $y$  方向的梯度。

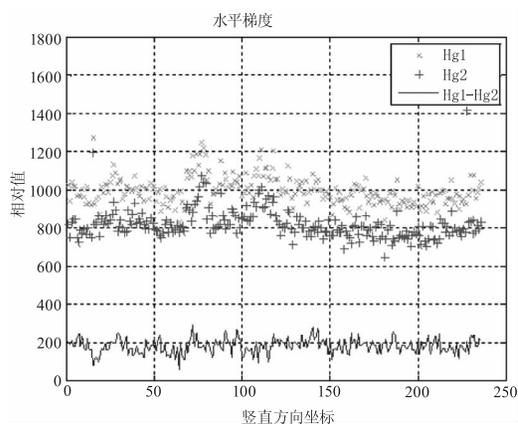
图 1 在  $x$  和  $y$  方向上的梯度分析结果如图 2 所示。 $Hg_1$  为图 1(a) 某一行( $i$  行)的水平梯度之和,  $Hg_2$  为图 1(b) 同一行的水平梯度之和;  $Vg_1$  为图 1(a) 某一列( $j$  列)的竖直梯度之和,  $Vg_2$  为图 1(b) 同一列的竖直梯度之和。

$$\begin{cases} Hg_1 = \sum_j Hg_a(i, j) \\ Hg_2 = \sum_j Hg_b(i, j) \end{cases} \quad (3)$$

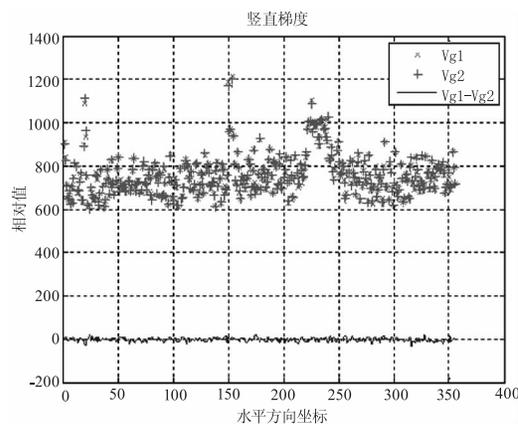
$$\begin{cases} Vg_1 = \sum_i Vg_a(i, j) \\ Vg_2 = \sum_i Vg_b(i, j) \end{cases} \quad (4)$$

在图 2 中,  $Hg$  和  $Vg$  分别相减得到了对应差值曲线。观察可得,  $Hg_1$  和  $Hg_2$  的差在 200 左右波动,即存在一个明显的差值;  $Hg_1$  和  $Hg_2$  的差在 0 附近波

动,即基本不存在差异。这证明了先前的观察,即条纹非均匀噪声使得图像在  $x$  方向上的梯度剧烈变化,而在  $y$  方向的梯度保持不变。



(a)图1中*i*行的水平梯度对比



(b)图1中*j*列的竖直梯度对比

图2 图1的梯度分析

Fig. 2 The gradient analysis for Fig. 1

### 3 条纹非均匀噪声校正

#### 3.1 校正原理及模型建立

在第2节中,分析了条纹非均匀噪声的形成原理及其特征,得出了NUC前后图像竖直( $y$ 方向)与水平( $x$ 方向)的梯度能量变化特性,即 $y$ 方向保持不变, $x$ 方向剧烈变化。根据这一先验知识,使用加权微分约束的方法构造惩罚函数,进行红外条纹NUC。

采用探测器线性响应模型,对于输入的理想图像 $z$ ,可以得到:

$$g = h(z) + k \quad (5)$$

其中, $g$ 为观测图像; $k$ 是加性高斯白噪声; $h(\cdot)$ 为退化函数(如模糊等)。对红外图像进行NUC的目的即从最终被观测到的图像中恢复出理想图像。于是,根据贝叶斯理论以及最大后验概率等效于最小化惩罚函数的原理,对图像复原过程建模,构造惩罚

函数以进行复原。

根据分析,红外图像非均匀噪声会使得图像出现竖直方向的条纹噪声,从而导致图像在 $y$ 方向灰度基本保持不变而在 $x$ 方向变化较大。因此,NUC的目的可以等效于保持 $y$ 方向梯度不变的同时最小化 $x$ 方向的梯度。

由于红外图像的微分概率分布服从于广义高斯分布,有如下公式:

$$-\ln p(g/z) = \|\partial_y z - \partial_y g\|^2 \quad (6)$$

$$-\ln p(z) = \|\partial_x z\|^2 \quad (7)$$

其中, $\partial_x$ 与 $\partial_y$ 都是一阶微分算子。公式(6)为模型的保真项,其目的在于保持原始信号不变;公式(7)为模型的规整化项,用于最小化 $x$ 方向的梯度从而实现NUC。同时,对于规整化项,再引入权重函数 $T_x$ 进行调整,以区分不同梯度信息:

$$T_x = \lambda (|\partial_x g|^\alpha + \beta)^{-1} \quad (8)$$

其中, $\alpha$ 、 $\beta$ 和 $\lambda$ 是固定的常量参数。通过上述保真项、规整化项以及权重函数的建模,可得到惩罚函数模型为:

$$\begin{aligned} f(z) &= -\ln p(g/z) - \ln p(z) \\ &= \|\partial_y z - \partial_y g\|^2 + \lambda (|\partial_x g|^\alpha + \beta)^{-1} \|\partial_x z\|^2 \end{aligned} \quad (9)$$

#### 3.2 惩罚函数优化及校正图像求解

对于惩罚函数,通过最小化惩罚函数求解得到 $z$ ,即:

$$\begin{aligned} z &= \operatorname{argmin}_z f(z) \\ &= \operatorname{argmin}_z [\|\partial_y z - \partial_y g\|^2 + T_x \|\partial_x z\|^2] \end{aligned} \quad (10)$$

根据拉格朗日定理可以得到,当:

$$\frac{\partial f(z)}{\partial z} = 0 \quad (11)$$

惩罚函数取到最小值,即此时 $z$ 为所求的最优值。通过推导,可得 $z$ 的最优解为:

$$z = [\partial_y^T \partial_y + (\partial_x^T T_x \partial_x)]^{-1} (\partial_y^T \partial_y g) \quad (12)$$

此时得到的 $z$ 即为最优的NUC结果。这可以使得图像在保证在校正 $x$ 方向条纹非均匀噪声的同时尽可能使 $y$ 方向梯度保持不变,并减少图像的模糊。

### 4 实验结果与分析

#### 4.1 客观评价方法

为评估方法在NUC处理方面的性能,需要客

观评价方法对实验结果进行评价。本文采用两种方法对实验结果进行分析。第一种评价方法为平整度  $\rho$  ,用以判别图像的平滑程度<sup>[11]</sup>,其定义如下:

$$\rho = \frac{\|h * I\| + \|h^T * I\|}{\|I\|} \quad (13)$$

其中,  $h = [1, -1]$  ;  $I$  为待测图像;符号  $*$  代表卷积操作;  $\|\dots\|$  为一阶范数。 $\rho$  的值越小,图像的条纹校正效果越好,但  $\rho$  过小时图像较为模糊。

第二种评价方法为水平梯度  $K$  ,用以判断图像在  $x$  方向上的平整程度。其定义如下:

$$K = \frac{(h * D)^2}{M \times N} \quad (14)$$

同样,  $h = [1, -1]$  ;  $I$  为待测图像;符号  $*$  代表卷积操作;  $M$  和  $N$  分别为图像的行数和列数;  $K$  的值越小,图像在  $x$  方向上的平整程度越高。

#### 4.2 实验过程与结果

本文使用的红外图像为实地拍摄,共采集 20 帧图像,如图 3(a)所示为其中的一帧。所用相机为  $768 \times 576$  分辨率红外定焦(15 mm)相机(M500/M500C 高分辨率红外热成像机芯),由浙江兆晟科技股份有限公司生产。在算法处理中,对参数进行调整及测试,最终设置参数  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\lambda$  的值分别为 2.5、 $10^{-6}$  及 0.5,有关不同参数的讨论,可见 4.3 节。

本文实验运行在 windows10 操作系统中,CPU 为 i5-6300HQ(2.3 GHz),内存为 8G,实验环境为 Matlab 2014a。

同时,本文将所提出的算法与几种现有性能优异的单帧 NUC 算法进行对比,包括最小均方误差法 MMSE<sup>[6]</sup>、L0 约束方法<sup>[8]</sup> 以及频域处理法<sup>[10]</sup>。原始图像及经 NUC 后的图像如图 3 所示。通过观察图像可以发现,L0 及 MMSE 方法对于图像的的校正效果相对较弱,而频域处理法校正效果虽然较好,但对于图像的质量损失较大,不利于后续的观察。本文所提出的方法在尽可能对条纹噪声进行校正的同时较好图像质量损失也相对较小。

将各方法所得到的结果进行客观评价,得到各结果的  $\rho$  值、 $K$  值,如表 1 所示。根据表 1,可以发现本文方法的平整度与水平梯度值最小,间接表明本方法在 NUC 方面优于其他对比方法。

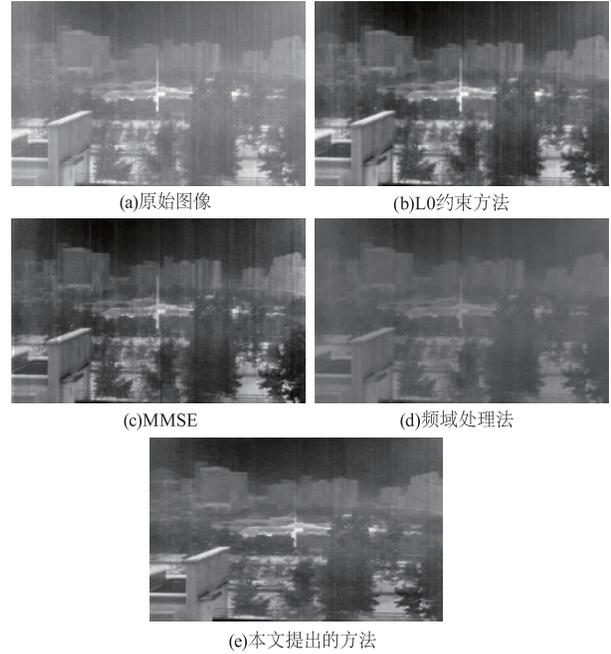


图 3 红外原始图像及实验结果

Fig.3 The original infrared image and the result of the experiment

表 1 客观评价分析

Tab.1 The objective evaluation

|            | L0 约束方法 | MMSE 法  | 频域处理法   | 本文方法    |
|------------|---------|---------|---------|---------|
| 平整度 $\rho$ | 0.0561  | 1       | 0.0397  | 0.0559  |
| 水平梯度 $K$   | 17.8797 | 20.6145 | 16.1809 | 13.4236 |

为了更好地对比各算法,本文对序列视频中的图像逐帧进行处理评价,结果图 4 所示。

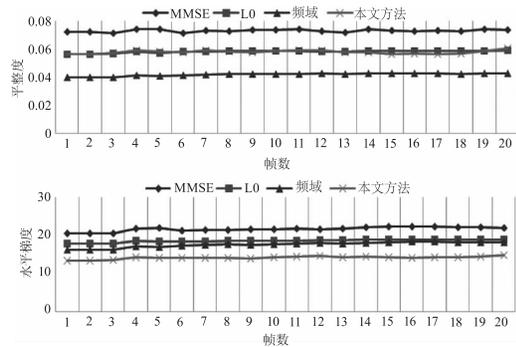


图 4 对于 20 帧图像的平整度及水平梯度分析

Fig.4 The analysis of the roughness and line gradient for 20 frames

此外,本文也对各方法的平均运算时间进行比较,如表 2 所示。

表 2 平均运算时间分析(单位:秒)

Tab.2 The analysis of computational time(unit:second)

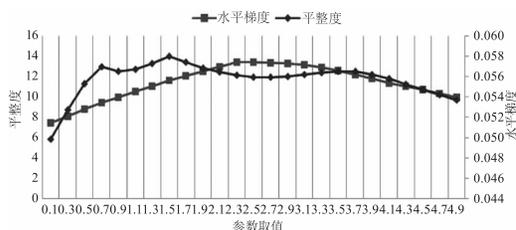
|            | L0 约束方法 | MMSE 法 | 频域处理法 | 本文方法   |
|------------|---------|--------|-------|--------|
| 平均运算时间 $t$ | 0.658   | 2.745  | 1.254 | 0.2947 |

通过图 4 的客观评价与表 2 的运算时间的比较,本文方法在客观评价上基本优于其他方法,运算速度也更快。频域处理法虽然在平整度的评价中较好,但是结合主观评价后可以看出其平整度指标较高是以图像质量的损失为代价的,并不是因为其校正效果更好。另外,L0 约束方法虽然在平整度上与本文方法接近,但结合主观评价以及水平梯度的比较可以发现其在  $x$  方向平滑程度相对较弱,意味着其对于条纹的校正效果相对较弱。

### 4.3 参数分析

第 3 节中的惩罚函数模型有三个常数,本文分别对三个常数进行了分析与调试,以期取得最好的条纹校正效果。本节将依次对三个参数  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\lambda$  的取值进行论述。

$\alpha$  为权重函数中梯度的指数项,即通过对梯度的非线性缩放来控制校正结果中图像边缘的锐利程度, $\alpha$  的值越大,规整化项在图像中占的权重越小,校正结果的边缘越尖锐。将  $\alpha$  依照一定间隔取值并进行复原,结果如图 5 及图 6 所示。



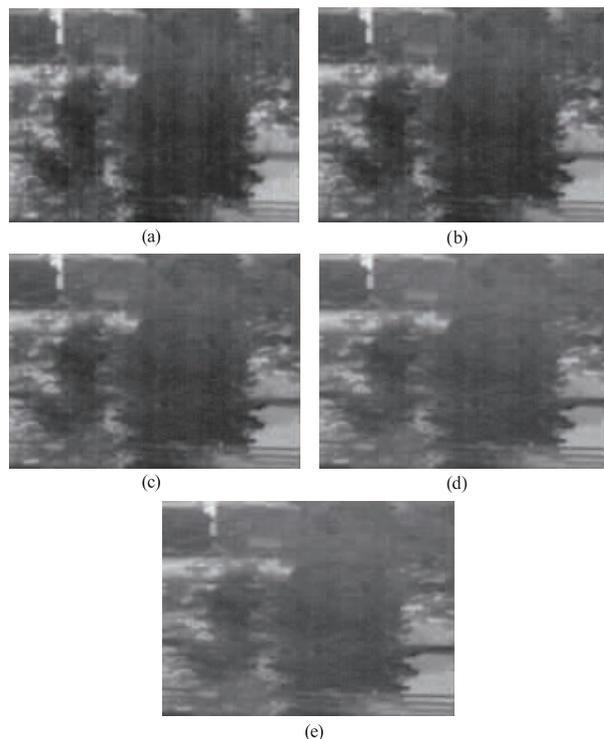


图9 不同 $\lambda$ 值对校正结果的影响,(a)~(e)分别为 $\lambda$ 值是0.01,0.1,0.5,1.5及2.5时图像校正结果的部分

Fig.9 The results of NUC with different  $\lambda$ . (a)~(e) are the results when  $\lambda$  equals 0.01,0.1,0.5,1.5 and 2.5 respectively

可以看到,当图像 $\lambda$ 值越大时,由于规整化项在惩罚函数中的权重越大,图像的校正效果越好,但不可避免的是同时图像的模糊程度也越严重。基于上述情况以及对于图像主观分析,本文取 $\lambda$ 值为0.5。

#### 4.4 硬件实验

本文搭建了硬件系统实际运行并分析。如图10所示,包括红外成像镜头、相机、FPGA电路、计算机以及显示部分。所有的图像采集处理过程都运行在FPGA上并通过数据线显示在电脑屏幕中。

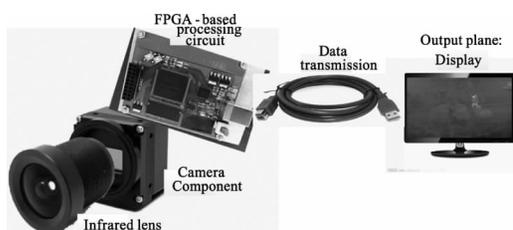


图10 成像系统示意图

Fig.10 The schematic of infrared imaging system

由于硬件系统化实验需要在FPGA上进行,对比方法未能较好在FPGA上实现,因而无法与

本文方法进行对比。本方法在FPGA上处理速度约为15 f/s,基本可以实现实时处理,但是对于高分辨率高帧数画面的实时处理仍有一定的差距。

## 5 结论

本文提出了一种基于单帧图像的条纹NUC方法。本文首先分析了红外图像条纹非均匀噪声的形成原理。根据红外图像的微分概率分布等特性与假设,利用条纹图像在 $X$ 和 $Y$ 方向梯度上的不同特征提出了微分约束模型,通过构造惩罚函数的方法最优化求解得到校正图像。经过实验对比可以发现,相比于传统的方法而言,本文所提出的方法对于条纹非均匀噪声的抑制效果比较好,对于条纹校正中常出现的图像模糊情况也有所改善。此外,基于单帧图像的算法收敛速度较快,从第一帧就可实现NUC。在下一步的工作中,将考虑改进算法,通过提取图像中的信息自适应的设置算法中的参数;此外算法也会导致图像整体能量减少的问题,这也是在之后的工作中需要解决的。

## 参考文献:

- [1] NING Dianyan. Modeling and simulation of spaceborne pushbroom infrared imaging sensor[D]. Xi'an: Xidian University, 2008. (in Chinese)  
宁殿艳. 星载推扫型红外成像传感器建模与仿真[D]. 西安:西安电子科技大学, 2008.
- [2] WANG Qian, JIANG Xiaoting, Xin Yunzi, et al. Characterization of In vitro mineralization of porous poly(L-Lactic Acid)/bioactive glass composites by attenuated total reflectance-Fourier transform infrared mapping[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2014, (2): 221 - 226. (in Chinese)  
王倩,姜小婷,辛韵子,等. 衰减全反射-红外成像研究聚乳酸/生物活性玻璃复合材料的体外矿化过程[J]. 分析化学, 2014, (2): 221 - 226.
- [3] FAN Jingxiang. Development analysis of infrared imaging seekers of kinetic kill vehicles in America[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(1): 1 - 6. (in Chinese)  
范晋祥. 美国动能拦截弹红外成像导头的发展分析[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(1): 1 - 6.
- [4] XU Xiaolong, JIANG Huanyu, HANG Yuelan. Study on detection of tomato mosaic disease at early stage based on

- infrared thermal imaging[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, (5): 145 – 149. (in Chinese)
- 徐小龙, 蒋焕煜, 杭月兰. 热红外成像用于番茄花叶病早期检测的研究[J]. 农业工程学报, 2012, (5): 145 – 149.
- [5] CHEN Shiwei, YANG Xiaogang, ZHANG Shengxiu et al. Single infrared stripe nonuniformity correction algorithm based on adaptive diffusion models[J]. Chinese Optics, 2016, (1): 106 – 113. (in Chinese)
- 陈世伟, 杨小冈, 张胜修, 等. 基于自适应扩散模型的单帧红外条纹非均匀性校正算法[J]. 中国光学, 2016, (1): 106 – 113.
- [6] QIAN Weixian, CHEN Qian, GU Guohua. Minimum mean square error method for stripe nonuniformity correction[J]. Chinese Optics Letters, 2011, (5): 34 – 36.
- [7] Sui J, Dong L, Jin W, et al. A new adaptive nonuniformity correction algorithm for infrared line scanner based on neural networks[J]. Chinese Optics Letters, 2007, 5(2): 74 – 76.
- [8] Zhao J, Zhou Q, Chen Y, et al. Single image stripe nonuniformity correction with gradient-constrained optimization model for infrared focal plane arrays[J]. Optics Communications, 2013, 296: 47 – 52.
- [9] ZHANG Shengwei, XIANG Wei, ZHAO Yaohong. Stripe noise removal method for infrared images based on guided filtering[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2017, (8): 1434 – 1443. (in Chinese)
- 张盛伟, 向伟, 赵耀宏. 基于引导滤波的红外图像条纹噪声去除方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2017, (8): 1434 – 1443.
- [10] Münch B, Trtik P, Marone F, et al. Stripe and ring artifact removal with combined wavelet—Fourier filtering[J]. Optics express, 2009, 17(10): 8567 – 8591.
- [11] Vera E, Meza P, Torres S. Total variation approach for adaptive nonuniformity correction in focal-plane arrays[J]. Optics letters, 2011, 36(2): 172 – 174.