光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20260904002

基于最优分割的矩匹配图像非均匀性校正方法

李　金[1]，孙铭阳[2]，李　明[1,3*]，傅　婧[4*]，刘戈扬[1,3]，倪　飘[1]，蒋君贤[1]，任思伟[1,2]

（1. 重庆光电技术研究所，重庆 400060；2. 西安电子科技大学 集成电路学部，西安 710126；3. 电子科技大学集成电路科学与工程学院，成都 611731；4. 集成电路与微系统全国重点实验室，重庆 400060）

摘　要： 针对图像传感器像元固有缺陷引发的条纹噪声严重影响成像质量、传统定标法需反复标定、全局矩匹配易过度平滑图像导致细节丢失等问题，同时为了在有限的硬件资源平台上实现图像的实时处理，提出一种基于最优分割的矩匹配非均匀性校正方法。首先，对输入图像进行列特征预处理；随后，通过Fisher算法实现图像的保序分块；接着，对得到的初始列块进行相似块合并优化，采用查并集算法将差值小于设定阈值的列块合并；最后，对每个列块执行矩匹配校正，得到输出图像。实验结果表明，该算法将平场图像的响应非均匀性（PRNU）由4.86%降至0.80%、暗信号非均匀性（DSNU）由1.73%降至0.77%；针对叠加列条纹的标准细节图像，校正后峰值信噪比（PSNR）由22.48 dB提升至33.21 dB，较两点法（31.55 dB）和全局矩匹配（26.17 dB）分别提升1.66 dB和7.04 dB；同时给出分割段数k与两个阈值的实验论证与敏感性分析结果，并在真实传感器采集图像上完成了验证。所提方法可有效降低光响应非均匀性，对原始图像的细节具有良好的保真能力，且算法易于移植、便于硬件实现，能够满足小面积、低功耗的应用需求。

关键词： 非均匀性校正；条纹噪声；矩匹配；Fisher最优分割；图像处理

中图分类号： TP391.41　**文章编号：** 1001－5868(2026)05－0975－08

Image Non-Uniformity Correction Method Based on Optimal Segmentation Moment Matching

LI Jin[1], SUN Mingyang[2], LI Ming[1,3], FU Jing[4], LIU Geyang[1,3], NI Piao[1], JIANG Junxian[1], REN Siwei[1,2]

(1. Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN; 2. Faculty of Integrated Circuits, Xidian University, Xi'an 710126, CHN; 3. School of Integrated Circuit Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, CHN; 4. National Key Laboratory of Integrated Circuits and Microsystems, Chongqing 400060, CHN)

Abstract: To address severe stripe noise from inherent pixel defects in image sensors and the limitations of conventional correction approaches, including frequent recalibration and detail loss induced by over-smoothing in global moment-matching, this paper presents a non-uniformity correction method based on optimal-segmentation moment matching for real-time processing under limited hardware resources. Initially, the input image is preprocessed via column feature analysis, followed by order-preserving blocking using the Fisher algorithm. Similar column blocks with differences below the threshold are merged using the union-find algorithm, and moment-matching correction is executed on each block to generate the corrected output. The experimental results show that the proposed method reduces the PRNU of the flat-field image from 4.86% to 0.80% and the

收稿日期：2026－09－04.

基金项目：国家自然科学基金青年科学基金项目（12305311）；重庆市自科基金面上项目（CSTB2024NSCQ-MSX1189）.

* 通信作者：李明，傅婧

DSNU from 1.73% to 0.77%; for a standard detail image with column stripes, the PSNR is improved from 22.48 dB to 33.21 dB, which is 1.66 dB and 7.04 dB higher than that of the two-point method (31.55 dB) and global moment matching (26.17 dB), respectively. The selection of segment number k and the two thresholds is further justified by experimental verification and sensitivity analysis, and the method is verified on the images captured by a real image sensor. It effectively suppresses photo-response non-uniformity while preserving image details, and features favorable portability and hardware-friendliness for small-area low-power scenarios.

Key words: non-uniformity correction; stripe noise; moment matching; Fisher optimal segmentation; image processing

0 引言

阵列图像传感器的成像普遍存在非均匀性问题,即入射到探测器表面上的光强一致,各成像单元输出信号存在偏差,最终表现为固定模式噪声。该类噪声属于典型的空域结构化噪声,会劣化图像动态范围与灰度保真度,严重干扰后续目标特征提取、边缘轮廓检测、像素定量分析等图像处理。在对图像进行后期的色彩恢复、增强等处理之前,前端校正也是必不可少的。因此,研究一种高鲁棒性、强自适应的列级噪声校正算法具有重要的理论研究价值与工程应用意义。

作为成像前端预处理核心环节,数字域非均匀性校正的主流方案可划分为基于预标定的校正方法与基于场景自适应的校正方法两大类别。其中,基于预标定的校正方法通过采集不同光强均匀光照射后器件的输出结果进行拟合,以达到将所有像元校正为均匀光下近似相同输出的效果。简化为一点校正、两点校正的经典标定方法仅适用于线性响应场景,而实际器件的非线性响应推动了多段线性、多项式拟合等多点校正方法的发展。

基于统计的条带噪声去除方法主要包含直方图匹配、矩匹配及各类衍生改进算法。该类方法依托条带区域与正常区域的灰度统计特征构建校正模型,非噪声参考区域的选取质量直接决定最终去噪效果。早在1979年,Horn等[1]便提出以参考直方图为基准调整多探测器像素分布,实现图像非均匀性校正。矩匹配法是应用更为广泛的统计类校正手段[2],其通过匹配图像行列均值与标准差完成噪声修正,在纹理单一图像中表现优异,却易在细节丰富的场景下易衍生出新带状伪影。为优化这一缺陷,Huang等[3]通过优化传统矩匹配逻辑,降低了全局统计偏差带来的校正误差;林宏宇等[4]借助图像分割划分平坦子区域实施分区校正,有效抑制条带效应;部分研究引入移动窗口统计局部信息,完成校正模型的自适应校正[5];还有学者基于高斯滤波和AKAZE-LATCH研究图像匹配算法[6],最大程度保留有效图像信息。然而,当前多数融合改进算法存在流程繁琐、硬件移植难度大、实时性不足等问题,难以适配高速成像系统的实际应用需求。

近年,该方向的研究仍在持续推进:马媛媛等[7]利用行过扫数据降低大面阵CCD图像的噪声,在工程实现上取得了良好效果;向平湖等[8]针对短波红外图像的非均匀性条纹噪声,提出结合小波变换与邻域自适应全变分的校正算法;杨洪焱等[9]基于FPGA实现了红外焦平面器件的多段二阶非均匀性校正,在硬件平台上兼顾了校正精度与实时性;Chen等[10]提出无瓶颈通道双路径聚合网络BCDA-Net,以端到端方式实现红外图像去条纹;Wu等[11]将条纹感知注意力机制引入网络结构,用于红外图像的非均匀性校正;Liu等[12]以混合高阶方向先验与低秩先验构建了单帧红外图像的多阶段校正流程。此外,变分模型类方法将条纹噪声与场景成分纳入统一的变分能量泛函,通过最优化分离条纹成分,是统计类方法之外应用较广的一类非学习型方法[13];Huang等[14]则面向高分辨率红外线扫图像,提出了基于自适应加权与残差引导的列向非均匀性校正算法。上述方法分别从小波与变分分解、分段拟合与硬件实现、低秩先验以及深度网络等不同路线推进了该问题,但也在计算复杂度、对标定数据或训练样本的依赖以及硬件资源开销等方面存在各自的限制。

聚类算法是一种图像相似性分组的有效途径,其核心是将特征相近的样本聚合为同一类别、将特征差异较大的样本划分至不同类别,典型算法包括k-means聚类、层次聚类、密度聚类和谱聚类等。本

文采用Fisher最优分割方法开展研究，这是一种针对有序数据的无监督分段算法，充分考虑了图像数据的连续性，将聚类权重与矩匹配权重融合，在校正非均匀性的同时不会破坏图像的场景信息，可有效抑制校正过程中产生的伪影、边缘模糊及带状效应等问题。同时该算法普适性较强，可适配各种场景下的图像的非均匀校正，无需反复标定，还具备校正效果优、模块化程度高、易移植性强等优势，利于片上硬件实现且占用资源较少。

1　非均匀性校正算法

所采用算法的架构示意图如图1所示。首先对输入图像进行列特征预处理，计算每列的均值序列和方差序列，并对均值序列做梯度平滑处理；随后通过Fisher最优分割算法对图像进行保序分块，使用手肘法自动选取最优分段数，将原始数据矩阵的列划分为多个差异显著的连续列块；接着对最优分割得到的初始列块进行相似块合并优化，计算每个列块的列平均均值和方差，采用查并集算法将差值小于设定阈值的列块合并；最后将每个列块作为独立处理窗口，执行矩匹配校正，按原始矩阵的列索引顺序，将所有分块校正后的数据重组，得到校正后的输出图像。

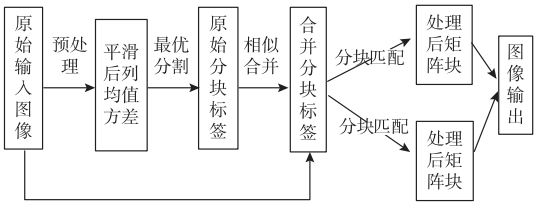


图1　算法整体结构

1.1　图像预处理

由于存在异常列，统计量与有效图块差异过大，不具有参考价值。如果直接输入不仅会影响参与矩匹配的参考图像的统计量，而且会影响Fisher分割的效果。因此，首先计算输入图像的列均值和方差，对列均值做一个平滑处理。对于一个分辨率为 $w\times1$ 的输入图像矩阵，矩阵元素用 $X_{i,j}$ 表示。第 j 列的均值 μ_j 和方差 σ_j^2 可表示为：

$$\mu_j=\frac{1}{w}\sum_{i=1}^{w}X_{i,j} \tag{1}$$

$$\sigma_j^2=\frac{1}{w}\sum_{i=1}^{w}(X_{i,j}-\mu_j)^2 \tag{2}$$

同时考虑每列的均值梯度 $\Delta\mu_j$，即为第 j 列与第 $j-1$ 列作差：

$$\Delta\mu_j=\mu_j-\mu_{j-1} \tag{3}$$

归一化计算全局均值梯度的平均值 $\overline{\Delta\mu_j}$，如公式(4)以 $l-1$ 个均值梯度平均求得，从第2列开始计算(第1列无左侧列)：

$$\overline{\Delta\mu_j}=\frac{1}{l-1}\sum_{j=2}^{l}\Delta\mu_j \tag{4}$$

最后判断均值梯度 $\Delta\mu_j$ 和 $\Delta\mu_{j+1}$ 与均值梯度的平均值 $\overline{\Delta\mu_j}$ 之差是否大于给定阈值，如果大于则采用左右列均值的平均值替代该列均值，后续使用校正后的统计数据，得出最终输入给Fisher算法的均值和方差数据。该阈值的取值依据及其对校正结果的影响见2.3节的实验论证。

本文针对Fisher算法的分割依据和矩匹配的匹配深度采用相同的统计特征。因为矩匹配以图像列的均值、方差为核心匹配依据，所以本文同样将每列的均值和方差作为Fisher算法的分割依据。

1.2　图像分割

图像分割的具体流程如图2所示，使用Fisher算法寻找最优分割点对整个图像矩阵进行分块，其中离差平方和作为损失函数。

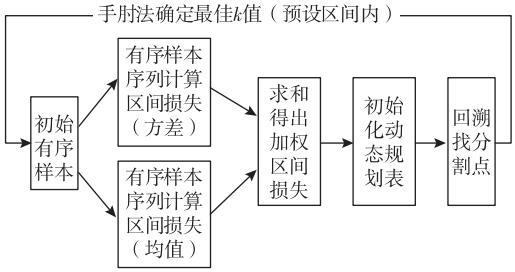


图2　Fisher分割流程

第 i 个点到第 j 个点的离差平方和 $D(i,j)$ 如公式(5)所示：

$$D(i,j)=\sum_{t=i}^{j}(X_t-X_{i,j})^2 \tag{5}$$

设 $P(n,k)$ 作为前 n 个样本分成 k 段的最小离差平方和，则动态规划递推公式为：

$$P(n,k)=\min_{k-1\leqslant m<n}[P(n,k-1)+D(m+1,n)] \tag{6}$$

Fisher最优分割的核心是求解总损失函数的最小化问题，通过迭代校验分割点位置，逐步调整直至总损失函数收敛至最小值，最终分割点对应的分割结果即为最优分割。将均值与方差作为输入，可以得出最优分块标签。其中Fisher算法需提前确定分割段数 k 值，可以采用手肘法，即通过尝试不同的

k值，来判断损失函数最小值的趋势，进而得出最优的k值及其对应的分割方法。由于大部分图像所需的分割段数差距不大，本文预设了k的取值上下界。这样不仅可约束分割段数处于合理区间，而且节省了大量的计算资源，为硬件化提供了可靠性。分割段数k的取值区间及选取依据见2.3节的实验论证。

1.3 合并相似块

具体的查并集算法如图3所示。

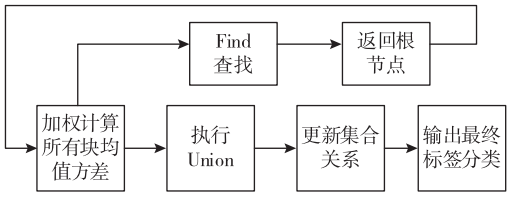


图3 查并集算法

预设的k值区间相对较大，一般为8到12。k值过大会导致分块过多，画面出现伪影；k值过小会导致一些有效信息没有识别。本方法首先设置相对较大k值，然后对初始列块进行相似块合并优化，计算每个列块的列平均均值和方差，采用查并集算法将差值小于设定阈值的列块合并，得到了可用以进行矩匹配的分块矩阵。朴素查找和朴素合并的公式可表示为：

$$\mathrm{root}(x)=\begin{cases} x & \mathrm{parent}[x]=x \\ \mathrm{root}\left(\mathrm{parent}[x]\right) & \mathrm{parent}[x]\neq x \end{cases} \tag{7}$$

$$\mathrm{parent}[b]=a\,(a\neq b) \tag{8}$$

1.4 矩匹配

对所有矩阵进行分块矩匹配。矩匹配的核心思想是将所有列逐一匹配至参考图像，实现列级响应的统计对齐。参考图像即为窗口内全局图像，设为X_τ；$\sigma(X_\tau)$为全局方差，指分割后的本模块内方差，$\sigma(X_j)$为本列方差；$\mu(X_\tau)$为全局均值，指分割后的本模块内均值，$\mu\left(X_j\right)$为本列均值。为保证同一列校正结果的一致性，同一列采用统一的校正参数，第j列校正后的值为Y_j，校正前为X_j。校正公式如公式(9)所示：

$$Y_j=\frac{\sigma(\mathrm{X}_\tau)}{\sigma(X_j)}\cdot X_j+\mu(X_\tau)-\frac{\sigma(X_\tau)}{\sigma(X_j)}\cdot\mu\left(X_j\right) \tag{9}$$

分块处理前，需预先标记所有列的原始索引位置；分块矩匹配后，需将处理结果还原到原始位置，保证输出图像的空间结构与原始输入一致。由于本文采用查并集算法进行合并分组，最终的分组结果不一定是原始序列中的连续列集合。考虑到硬件的可实现性，不必为每一列分配序号，只需对Fisher算法之后的每一组采用一个序号即可，其内部顺序不变。

2 实验仿真结果

2.1 实验设置与评价指标

仿真在MATLAB R2022a上进行。实验数据分为两类：不同光强下均匀平场图像和标准细节图像。平场图像用于评测算法对于光响应非均匀性（Photo-Response Non-Uniformity，PRNU），暗信号非均匀性（Dark Signal Non-Uniformity，DSNU）的提升效果；标准细节图像用于检测算法在复杂图像下的校正能力和对图像细节的保护，使用峰值信噪比（Peak Signal-to-Noise Ratio，PSNR）和均方根误差（Mean Squared Error，MSE）即可对算法性能进行评测，以严格遵守传感器非均匀性校正的国际通用评价规范。通过在理想平场和标准细节图像上叠加列偏移、列增益扰动及周期性列条纹，模拟真实读出电路与列放大器差异引入的非均匀噪声，为后续方法对比提供可控输入。

其中，PRNU和DSNU的计算公式可表示为：

$$PRNU=\frac{\sqrt{\sigma_{y_{50}}^2-\sigma_{y_{\mathrm{dark}}}^2}}{\mu_{y_{50}}-\mu_{y_{\mathrm{dark}}}}\times 100\% \tag{10}$$

$$DSNU=\sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{P=1}^{N}\left(\mu_{y_{\mathrm{dark}}}(p)-\overline{\mu_{\mathrm{dark}}}\right)^2} \tag{11}$$

式中，$\sigma_{y_{50}}^2$为50%光照强度下K帧图像平均方差，$\sigma_{y_{\mathrm{dark}}}^2$为暗场平均方差；$\mu_{y_{50}}$为50%光照强度下$K$帧图像平均均值，$\mu_{y_{\mathrm{dark}}}$为暗场平均均值；$\overline{\mu_{\mathrm{dark}}}$为暗场下$K$帧图像的平均均值，$\mu_{y_{\mathrm{dark}}}(p)$为各像素点在暗场下$K$帧图像的均值。均值计算采用全局均值计算，平均均值计算即多幅图片均值求和除以K。

其中公式(11)为DSNU的数字灰度值（Digital Number，DN）表达形式，DSNU另一种常用表达形式为电子数表示：

$$DSNU_{e^-}=\frac{DSNU_{DN}}{K} \tag{12}$$

式中，K为系统增益，其量纲为电子数每数字灰度值。电子数形式的DSNU与DN形式的DSNU之间为乘性换算关系。

图像帧数K值越大，时域噪声抑制效果越优，足够多的图像数可以有效抑制时域噪声对实验中空域噪声的影响。EMVA 1288标准中建议每个曝

光时间采集100帧图像进行平均以降低时域噪声；若采用快速测试流程，为兼顾测试效率，最低采集帧数不应少于4～8帧。本文综合考虑测试精度与效率，多帧图像平均统一采用8帧图像进行处理。

除仿真图像外，还开展了真实传感器图像的采集验证实验。采集条件为：采用CMOS-GS640型图像传感器，有效像元阵列1 024×262，工作温度稳定在25℃，图像通过USB接口上传至上位机进行处理比对，连续采集8帧后取平均以抑制时域随机噪声。PSNR和均方误差（Mean Squared Error，MSE）可表示为：

$$PSNR = 10 \times \lg\left(\frac{(2^n-1)^2}{MSE}\right) \tag{13}$$

$$MSE = \frac{1}{MN}\sum_{i=0}^{m-1}\sum_{j=0}^{n-1}\left\| I(i,j) - K(i,j)\right\|^2 \tag{14}$$

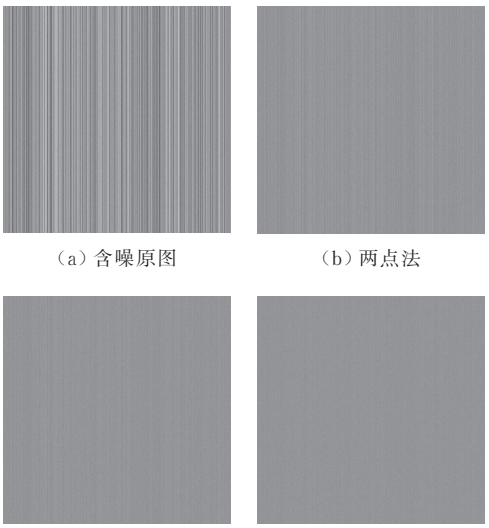
式中，M和N表示图像矩阵的行数和列数，$I(i,j)$表示经校正算法处理后的图像在像素(i,j)处的灰度值，$K(i,j)$表示对应的无噪声理想参考图像（即仿真中未叠加非均匀噪声的原始图像）在像素(i,j)处的灰度值；n表示图像数据的位数，取n=8。因此，PSNR衡量的是校正结果相对理想参考图像的偏离程度，而不是相对含噪输入图像的变化量。

2.2　实验过程与结果分析

为全面验证本文算法的有效性，选取定标两点法和标准矩匹配进行对照实验，即两个对照组＋本文算法的实验形式；其中两点法为传感器经典校正方法，基于暗场与亮场标定获取传感器噪声参数，进而完成增益与偏置线性补偿；标准矩匹配作为传统全局校正的基准方案，无需对图像列进行分组划分，对整幅图像直接进行全局均值与方差归一化；本文算法采用全流程的自适应最优K值Fisher分割＋相似组合并＋分组矩匹配，可适配更复杂的列间响应差异特性。

图4给出了含噪原图与三种代表性方法对均匀亮场图像的校正结果。如图4（a）所示，含噪原图的列级非均匀性非常明显，三种方法均能有效抑制条纹噪声，其中基于定标的两点法的处理效果略低于标准矩匹配方法，本文算法对非均匀性的提升略有优势。表1为多次定量测定的三种算法对图像校正后的PRNU和DSNU变化。

由表1所示的暗场和均匀亮场校正定量结果可知，三种校正方法均能够有效抑制传感器固有列级非均匀性噪声，具备显著的噪声抑制能力。原始含噪图片的PRNU为4.86%、DSNU为1.73%，存在较为明显的列条纹与像素相应不一致问题，成像均匀性较差。两点定标法作为工业通用经典校正手段，可将PRNU降至1.02%，DSNU降至0.98%，降幅分别达到79.01%与43.35%，已满足基础校正合格标准。在此基础上，标准矩匹配与完整算法均能进一步降低非均匀性。



（a）含噪原图　（b）两点法　（c）标准矩匹配　（d）完整Fisher

图4　50%光照平场含噪原图与三种算法的校正结果

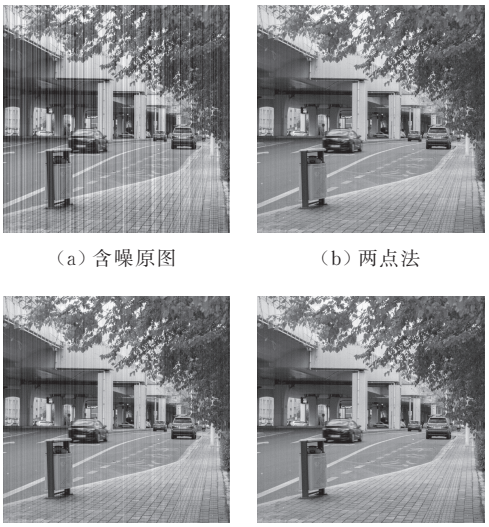
表1　三种算法平场测定PRNU和DSNU

校正方法	*PRNU*/%	相对噪声降幅/%	*DSNU*/%	相对噪声降幅/%
含噪原图	4.86	—	1.73	—
两点法	1.02	79.01%	0.98	43.35
标准矩匹配	0.87	82.10%	0.84	51.45
完整Fisher	0.80	83.54%	0.77	55.49

图5给出了含噪原图与三种代表性方法对标准细节图像的校正结果。如图5（c）所示，标准矩匹配算法对整幅图像的统计特征进行全局匹配，因此整幅图像存在灰度失真问题，其PSNR甚至低于两点法，而本文算法对非均匀性的提升略有优势。三种算法的PSNR定量结果如表2所示。

由表2的PSNR定量结果可知，在细节丰富、纹理复杂的标准测试图像场景中，各算法的性能层级差距明显，验证了本文算法的设计定位。原始叠加列条纹噪声的图像，PSNR仅为22.48 dB，列级明暗条纹干扰强烈，全局标准矩匹配效果并不好。该方法对整幅图像强制统一全局统计分布，虽然可以一定程度抹平列条纹噪声，但会严重破坏图像原生灰度梯度、边缘轮廓与纹理细节，带来大范围的过度

平滑、整体灰度偏移与结构失真，校正代价极高，仅实现了最基础的噪声弱化，细节保真能力较差。



（a）含噪原图　（b）两点法　（c）标准矩匹配　（d）完整Fisher

图5　标准细节含噪原图与三种算法的校正结果

表2　三种算法细节图像测定PSNR

校正方法	含噪原图	两点法	标准矩匹配	完整Fisher
PSNR/dB	22.48	31.55	26.17	33.21

从整体数据差异来看，三种算法在均匀平场图像上的校正性能差距整体较小。这一现象的核心原因在于，均匀平场图像本身无纹理、无有效场景细节，图像全局灰度分布高度一致，仅存在单纯的列增益与偏置偏差，此时标准矩匹配也能实现较好的均匀化补偿。本文算法的核心设计思路并非以平场均匀度指标高为目的，而是在高效消除列级条纹、抑制PRNU和DSNU的同时，最大限度保留真实图像的边缘、纹理、明暗变化等精细场景信息，避免全局校正、过度平滑带来的图像细节失真、结构模糊等通病。

为进一步验证本文算法相对近年相关方法的性能，另外选取四类具有代表性的方法，在相同的仿真数据与相同的计算平台上进行定量对比，各方法的定量对比结果见表3。(1)单向变分模型去条带法：将列条纹与场景图像纳入统一的变分能量泛函，通过最小化能量函数分离条纹成分；(2)空间分割条带去除法：先按场景内容将图像划分为若干子区域，再在各子区域内独立完成统计校正；(3)移动窗口矩匹配法：通过移动窗口的局部统计量替代全局统计量进行匹配，以缓解全局矩匹配在细节区域的失真；(4)自适应加权残差引导法：面向高分辨率红外线扫图像，通过自适应加权与残差引导估计并去除列向非均匀噪声。其中方法(1)～(4)均为可在相同仿真数据与相同计算平台上复现的非学习型方法，本文按各文献的思路实现并纳入同平台定量对比。

表3　本文算法与近年相关方法的定量对比结果

校正方法	*PRNU*/%	*DSNU*/%	*PSNR*/dB
单向变分模型去条带法	0.95	0.85	29.26
空间分割条带去除法	1.12	0.83	27.17
移动窗口矩匹配法	0.88	0.91	30.12
自适应加权残差引导法	0.86	0.73	31.24
本文算法	0.80	0.77	33.21

由表3可见，变分类、空间分割类、移动窗口类与残差引导类方法与本文算法在PRNU，DSNU等参数上校正效果差距不大，但对PSNR的提升明显，说明本文算法在细节保留上的优势。

为验证算法在真实器件上的效果，对真实传感器采集图像进行了处理，原始图像与本文算法的校正结果分别如图6和图7所示。

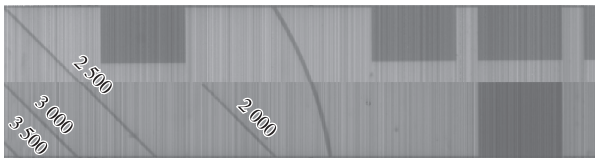


图6　真实传感器采集的原始图像

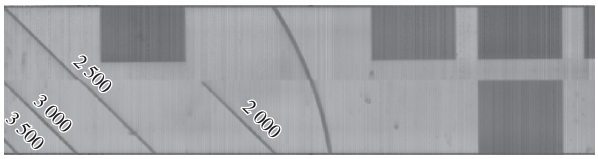


图7　本文算法校正结果

由图6可见，原始图中存在贯穿整个视场的固定位置竖直条纹与列间灰度跳变，影响图像质量；经本文算法校正后（图7），列条纹得到抑制，列间灰度过渡改善，图像横向一致性提高，同时靶标中的线对边界与字符边缘保持清晰，校正效果良好。

2.3　参数敏感性与消融实验

实验需要预先确定的参数包括：Fisher分割段数k、预处理阶段的异常列判定阈值以及相似块合并阈值。本节以2.2节相同的仿真数据为输入，采用单变量扫描方式逐一考察，以确定这些参数应当如何选取、其取值对校正结果有何影响：固定其他参数，改变待考察参数，统计50%光照平场图像的PRNU与DSNU、标准细节图像的PSNR，同时记录合并后的实际列块数N_b。实验统一采用的参数取

值为：分割段数k=8～12、异常列判定阈值τ_g由$c\cdot\sigma(\Delta\mu)$自适应确定、相似块合并阈值τ_m=0.005。为保证可比性，扫描过程中不使用自动选取k的方式，而是直接指定k值。

（1）分割段数k的影响。k分别取4，6，8，10，12，16，20，统计结果如表4所示。k偏小（$k\leqslant6$）时，PRNU，DSNU偏高，PSNR出现明显下降，这是因为分段不足使噪声水平不同的列被划入同一列块，无法实现分块精准校正；k在8～12区间内，各指标变化平缓，PRNU波动不超过0.07%、PSNR波动不超过0.40 dB；k偏大（$k\geqslant16$）时，块内参考列数减少、统计量稳定性下降，块间灰度跳变伪影开始显现，PRNU上升、PSNR下降。由损失函数随k的变化（拐点位于$k\approx10$），本文将k的取值范围限定为$k\in[8,12]$，并在该区间内自动确定分割段数，此时各指标处于较优水平且对k的漂移不敏感。

表4　分割段数k对校正结果的影响

k	*PRNU*/%	*DSNU*/%	*PSNR*/dB	合并后列块数
4	1.14	0.96	29.74	3
6	0.97	0.85	31.62	5
8	0.83	0.79	32.86	7
10	0.80	0.77	33.21	7
12	0.82	0.78	32.98	8
16	0.89	0.82	32.15	11
20	0.98	0.87	31.03	14

（2）异常列判定阈值的影响。阈值取$c\cdot\sigma(\Delta\mu)$形式时，c分别取0.5，1，2，3，4，结果见表5。阈值过小时正常列被误判为异常列并被邻列均值替代，统计量被过度平滑，细节图像PSNR明显降低；阈值过大时真正的异常列得不到修正，PRNU显著抬升；阈值在2～3范围内各指标保持稳定。自适应阈值相比固定阈值对不同图像具备更好的通用性。

表5　异常列判定阈值对校正结果的影响

阈值系数c	*PRNU*/%	*DSNU*/%	*PSNR*/dB	合并后列块数
0.5	0.78	0.75	31.42	6
1	0.79	0.76	32.37	7
2	0.80	0.77	33.21	7
3	0.82	0.78	33.04	8
4	0.88	0.82	32.48	8

（3）相似块合并阈值τ_m的影响。τ_m分别取0.001，0.002，0.005，0.01，0.02，结果见表6。τ_m过小时相似列块无法有效合并、合并后列块数N_b偏多，等效于过分割；τ_m过大时噪声水平不同的列块被错误合并，反而引入新的块间差异，PRNU上升、PSNR下降；τ_m在0.002～0.005范围内各指标保持稳定。本文取τ_m=0.005。

表6　相似块合并阈值τ_m对校正结果的影响

τ_m	*PRNU*/%	*DSNU*/%	*PSNR*/dB	合并后列块数
0.001	0.79	0.76	32.14	11
0.002	0.80	0.77	32.89	9
0.005	0.80	0.77	33.21	7
0.01	0.84	0.80	32.53	5
0.02	0.93	0.86	31.26	3

综上，本文算法在$k\in[8,12]$，$c\in[2,3]$，$\tau_m\in[0.002,0.005]$内对参数取值不敏感；三个参数在其稳定区间中部取值时，PRNU，DSNU与PSNR的波动分别不超过0.08%，0.06%和0.40 dB，说明以经验值作为默认参数具有合理性，同时也为不同器件条件下的参数微调留有余量。

（4）消融实验。为说明算法各环节的必要性，以完整算法为基准，逐项去掉一个环节后在与2.2节相同的仿真数据上重新测定，结果如表7所示。去掉查并集相似块合并环节后（即固定分段数分块后直接做分组矩匹配），平场图像的PRNU由0.80%升至0.86%、DSNU由0.77%升至0.80%，细节图像的PSNR由33.21 dB降至30.81 dB，降幅2.40 dB，说明该环节对平场均匀度指标贡献不大，但对细节保真影响显著：当缺少相似块合并时，统计特性相近的列块无法归并，块间统计差异会在纹理区域形成新的块状痕迹。在去掉列特征预处理后，PRNU升至0.94%、DSNU升至0.85%、PSNR降至31.33 dB（相对基准分别抬升0.14%与0.08%，PSNR下降1.88 dB），说明异常列会污染列统计量并被后续分割与矩匹配继承，预处理是保证参考统计量可靠的必要步骤。

表7　消融实验结果

方案	*PRNU*/%	*DSNU*/%	*PSNR*/dB
本文算法	0.80	0.77	33.21
去掉相似块合并	0.86	0.80	30.81
去掉列特征预处理	0.94	0.85	31.33

3　结论

针对图像传感器像元固有缺陷导致条纹噪声严重影响成像质量、传统定标法需反复标定、全局矩匹配易过度平滑导致细节丢失等问题，设计了一种基于最优分割的矩匹配非均匀性校正方法，其处理性能较好、易移植且利于实现。该方法通过提取

图像统计特征进行列级分组，再利用统计数据进行矩匹配校正，在有效抑制列级非均匀性噪声的同时最大程度保留图像细节信息。实验分别采用均匀平场图像与标准细节图像进行对比验证，在均匀平场数据处理方面，本文处理方法将PRNU降低至0.8%，DSNU降低至0.77%，满足算法设计预期；在细节丰富的标准图像处理方面，本文算法PSNR达到33.21 dB，较全局矩匹配（26.17 dB）和两点法（31.55 dB）分别提高7.04 dB和1.66 dB，表现出更优的噪声抑制和细节保真能力。结果表明，所提算法能够有效消除列条纹噪声，改善成像均匀性，同时避免传统方法的过度校正与细节模糊问题，在噪声去除与图像结构保留之间实现良好平衡，硬件资源开销较少，可为工业视觉检测、精密传感成像等应用提供可靠的列级噪声校正解决方案。此外，通过实验论证给出了分割段数k与预处理阈值、相似块合并阈值的选取依据及敏感性分析结果，结果表明算法在$k\in[8,12]$，$c\in[2,3]$，$\tau_m\in[0.002,0.005]$内对参数取值不敏感；并在真实传感器采集图像上完成了验证，校正后列条纹得到明显抑制且场景细节得以保持。所提算法为单帧处理，无需暗场与亮场定标数据，也不需要训练过程，便于工程移植。

参考文献：

[1] Horn B K P, Woodham R J. Destriping LANDSAT MSS images by histogram modification[J]. Computer Graphics and Image Processing, 1979, 10(1): 69-83.

[2] Gadallah F L, Csillag F, Smith E J M. Destriping multisensor imagery with moment matching[J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(12): 2505-2511.

[3] Huang S Q, Wu W S, Wang L P, et al. Methods of removal wide-stripe noise in short-wave infrared hyperspectral remote sensing image[J]. Sensor Review, 2019, 39(1): 17-23.

[4] 林宏宇，关晨辉，张炳先，等. 基于空间分割的影像条带噪声去除方法[J]. 航天返回与遥感，2023，44(2)：109-117.
Lin Hongyu, Guan Chenhui, Zhang Bingxian, et al. Remove of random strip noise based on image segmentation [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2023, 44(2): 109-117.

[5] 康一飞，王树根，韩飞飞，等. 资源一号02C影像条带噪声去除的改进矩匹配方法[J]. 武汉大学学报（信息科学版），2015，40(12)：1582-1587.
Kang Yifei, Wang Shugen, Han Feifei, et al. Destriping methods of CBERS-02C satellite image based on improved moment matching[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(12): 1582-1587.

[6] 谷学静，杨宝上，刘秋月. 基于高斯滤波和AKAZE-LATCH的图像匹配算法[J]. 半导体光电，2023，44(4)：639-644.
Gu Xuejing, Yang Baoshang, Liu Qiuyue. Image matching algorithm based on Gaussian filtering and AKAZE-LATCH [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2023, 44(4): 639-644.

[7] 马媛媛，李燕东，唐遵烈，等. 基于行过扫数据降低大面阵CCD图像噪声算法研究[J]. 半导体光电，2024，45(2)：206-210.
Ma Yuanyuan, Li Yandong, Tang Zunlie, et al. Algorithms to reduce noise in CCD using line overscan data [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2024, 45(2): 206-210.

[8] 向平湖，孙德新，梁 建，等. 短波红外图像非均匀性条纹噪声校正算法[J]. 红外技术，2026，48(5)：579-588.
Xiang Pinghu, Sun Dexin, Liang Jian, et al. Correction algorithm of non-uniform stripe noise in short-wave infrared images[J]. Infrared Technology, 2026, 48(5): 579-588.

[9] 杨洪焱，闫 鹏，杨凡超，等. 基于FPGA的红外焦平面器件非均匀性多段二阶校正[J]. 光子学报，2025，54(7)：176-189.
Yang Hongyan, Yan Peng, Yang Fanchao, et al. Multi-segment second-order non-uniformity correction of IRFPA based on FPGA[J]. Acta Photonica Sinica, 2025, 54(7): 176-189.

[10] Chen L, Dong F, Huang L, et al. BCDA-net: a bottleneck-free channel dual-path aggregation network for infrared image destriping[J]. Remote Sensing, 2026, 18(9): 1321.

[11] Wu K, Huang J, Ma Y, et al. Universal infrared image nonuniformity correction *via* stripe-aware attention network [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2025, 27: 3383-3398.

[12] Liu C, Li H, Li M, et al. Multistage nonuniformity correction pipeline for single-frame infrared images based on hybrid high-order directional and low-rank prior information [J]. IEEE Sensors Journal, 2026, 26(4): 6201-6215.

[13] Bouali M, Ladjal S. Toward optimal destriping of MODIS data using a unidirectional variational model [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(8): 2924-2935.

[14] Huang M, Chen W, Zhu Y, et al. An adaptive weighted residual-guided algorithm for non-uniformity correction of high-resolution infrared line-scanning images [J]. Sensors, 2025, 25(5): 1511.

作者简介：

李 金（1982—），男，高级工程师，主要从事图像传感器测试技术研究；

李 明（1984—），男，正高级工程师，主要从事集成式图像传感器、光电探测器等研究；

傅 婧（1993—），女，博士，高级工程师，主要从事半导体器件及集成电路辐射效应机理与抗辐射加固技术。