

基于低秩矩阵近似的低噪宽幅热红外成像技术

杨 暄^{1,2}, 王义坤¹, 韩贵丞¹, 刘 敏¹, 姚 波¹, 舒 嵘¹, 齐洪兴^{1*}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为解决强背景弱信号场景下热红外成像系统噪声制约图像信噪比的问题, 提出了一种基于低秩矩阵近似理论的低噪宽幅热红外成像技术. 利用面阵摆扫方式实现宽幅扫描成像并构建严格的观测矩阵, 通过加权核范数最小化方法求解去噪的低秩矩阵形式. 试验证明该技术具有较高的峰值信噪比与降噪鲁棒性, 在宽幅成像的同时也提高了探测灵敏度. 研究成果在红外弱目标识别、广域侦查等领域具有一定应用价值.

关键词: 热红外成像; 降噪; 低秩矩阵近似; 面阵摆扫

中图分类号: TP722.5 **文献标识码:** A

Denoised and wide swath thermal imaging technology based on low rank matrix approximation

YANG Xuan^{1,2}, WANG Yi-Kun¹, HAN Gui-Cheng¹, LIU Min¹,
YAO Bo¹, SHU Rong¹, QI Hong-Xing^{1*}

(1. Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A denoised and wide swath thermal imaging technology based on low rank matrix approximation (LRMA) was proposed to solve the problem of low signal-to-noise ratio (SNR) of thermal imaging system noise in strong background and weak signal scene. This technology utilized array whisk broom mode to realize wide swath imaging and construct strict observations. The denoising low-rank matrix of observations was solved via weighted nuclear norm minimization (WNNM). Experiments showed that the technology had high peak signal to noise ratio (PSNR) and denoising robustness. Both of imaging width and detection sensitivity were improved. The technology has certain application value in the field of weak target recognition and large area investigation.

Key words: thermal imaging, denoising, low rank matrix approximation, array whisk broom

PACS: 93.85.Pq

引言

热红外成像技术可以获得成像场景的温度辐射特性, 在遥感领域具有广泛应用^[1]. 然而受到热红外器件发展技术的制约, 成像系统的噪声仍然较大, 限制了在强背景弱信号场景下的使用, 如探测水体表面温度场细微变化分布^[2]. 为尽可能提高图像信

噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR), 通常需要增加成像积分时间, 获得目标信号更高的累积量. 根据维恩位移定律, 300 K 室温下物体的辐射能量主要集中在 8 ~ 14 μm ^[1], 因此系统光机结构自身产生的大量背景辐射同样被探测器所响应, 增加积分时间易导致信号饱和, 无法有效提高图像信噪比. 此时便需要增加冷光学设计, 对系统光路进行低温制冷^[3], 系

收稿日期: 2017-10-27 修回日期: 2018-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(41601353)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (41601353)

作者简介(Biography): 杨 暄(1990-) 男, 河南南阳人, 博士研究生. 研究方向为红外遥感与图像处理. E-mail: yx90107@sina.com

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: qhx@mail.sitp.ac.cn

Received date: 2017-10-27 revised date: 2018-02-20

统的体积、功耗与复杂度也会大大增加。针对轻小型红外遥感仪器的设计需求而言,需要通过冷光学之外的其他方法降低系统噪声,提升图像信噪比。

目前成像系统的降噪方式主要包括提高探测器性能和后期图像学处理这两方面。探测器性能往往受到综合技术水平的制约,主流的图像降噪算法通常包括域变换和非局部相似性匹配,在强噪声环境下存在变换域参数难以选择和非局部块匹配误差的问题^[4]。跳出探测器性能提高与图像学处理这两个传统角度,可以发现随着信息获取手段的进步,采集的数据维度与数据量也爆发性增加,这些高维数据之间通常存在较多的信息冗余与噪声^[5],如何合理、充分的利用这种冗余性来减少数据中隐含的噪声十分关键。近年来有相关研究从低秩矩阵近似的角度去解决这类问题^[6],它旨在从退化的观测数据中恢复出潜在低秩矩阵形式,目前已有相关文献对图像和视频中的数据相似块进行匹配,再利用低秩矩阵近似从而达到良好降噪效果^[4,7-12]。

在热红外成像过程中探测器可以达到很高的帧速率^[13],这意味着在探测器性能有限的条件下,仍然能够在时间维度上获取大量信息,因此利用冗余的时间信息流“换取”更高的成像性能成为一个新的思考角度。当探测器进行有序的扫描成像时,沿扫描方向上多个像元对应的时间序列之间也存在大量的冗余,同时每个像元的观测信号还包含了独立同分布的随机噪声,这一模型满足低秩矩阵近似理论的相关要求。因此提出一种低噪声大幅宽的热红外成像技术,通过面阵探测器的摆扫实现大幅宽的热红外成像,同时利用摆扫方向上多个像元的时间序列来构建观测矩阵,对该矩阵使用加权核范数最小化方法求解低秩矩阵形式。经仿真分析与遥感试验,相较于传统的小波降噪与数字 TDI 技术,文中方法具有更高的峰值信噪比与降噪鲁棒性,实现了宽幅成像并提高了探测灵敏度。

1 低秩矩阵近似

低秩矩阵近似是利用数据中的冗余部分,提炼出数据中有效信息,代替原有的数据或恢复出原有真实的数据结构^[14]。假定一个低秩矩阵为 X^0 ,其受噪声侵蚀的观测矩阵为 Y ,低秩矩阵近似的目标是在已知 Y 的条件下,尽量精确恢复出不含噪声的低秩矩阵形式 \hat{X} 。该问题可以描述为如下关系^[6]:

$$\hat{X} = \operatorname{argmin}_X \|Y - X\|_F^2 + \lambda \operatorname{rank}(X) \quad (1)$$

其中 X 是矩阵变量, λ 是正则化参数, $\|Y - X\|_F^2$ 代

表 Frobenius 范数的平方,即矩阵所有元素的方差 $\sum_{ij} |Y_{ij} - X_{ij}|^2$,从而保证 X 可以较好的拟合到观测矩阵 Y 。由于矩阵的 rank 函数不连续且非凸,直接求解该问题是 NP 难的,因而将式(1)凸松弛为核范数最小化(Nuclear Norm Minimization, NNM)问题^[15]:

$$\hat{X} = \operatorname{argmin}_X \|Y - X\|_F^2 + \lambda \|X\|_* \quad (2)$$

其中 $\|X\|_*$ 是矩阵 X 的核范数,即矩阵的奇异值之和 $\|X\|_* = \sum_i |\sigma_i(X)|$, $\sigma_i(X)$ 是矩阵 X 的第 i 个奇异值。对于式(2) Frobenius 范数的 NNM 问题可以利用奇异值阈值(Singular Value Thresholding, SVT)的方法进行求解^[16],即:

$$\hat{X} = U S_\lambda(\Sigma) V^T \quad (3)$$

其中 $Y = U \Sigma V^T$ 是对矩阵 Y 的奇异值分解, $S_\lambda(\Sigma)$ 代表对角矩阵 Σ 在可变参数 λ 下的软阈值函数。即对角矩阵 Σ 中的每个非零元素 σ_i 有:

$$S_\lambda(\sigma_i) = \max(\sigma_i - \lambda, 0) \quad (4)$$

这种 SVT 方法在解决许多基于 NNM 的问题上被大量使用,如矩阵补全、鲁棒 PCA 分析以及低秩纹理提取^[16-18]等。

尽管 NNM 模型被广泛的应用到低秩矩阵近似上,但它仍有一定的不足。式(4)中的每一个奇异值均会缩减相同的阈值 λ ,而由奇异值分解的先验知识可知,较大的奇异值对应着更主要的投影方向,该奇异值应当缩减较少从而最大化的保留数据主要信息。因此使用一种加权核范数最小化方法^[12](Weighted Nuclear Norm Minimization, WNNM),矩阵的加权核范数定义为,则式(2)改写为 $\|X\|_{w,*} = \sum_i |w_i \sigma_i(X)|$:

$$\hat{X} = \operatorname{argmin}_X \|Y - X\|_F^2 + \|X\|_{w,*} \quad (5)$$

原式(2)中的参数 λ 合并到每个奇异值的权重系数 w_i 中,由于对角矩阵中的奇异值是按照降序排列 $\sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_r$,所以权重系数 $0 < w_1 < w_2 < \dots < w_r$ 。为减少计算复杂度,使用指数形式的加权软阈值函数^[11],令 $\sigma_{\max} = \max[\Sigma]$ 有:

$$S_w(\sigma_i) = \max\left(\sigma_i - \sigma_{\max} \exp\left(-\frac{\sigma_i^2}{2\lambda^2}\right), 0\right) \quad (6)$$

对应的加权 SVT 表达式为:

$$\hat{X} = U S_w(\Sigma) V^T \quad (7)$$

2 观测矩阵构建

2.1 构建方法

目前基于低秩矩阵近似理论的降噪方法往往涉及图像或视频非局部相似性(Nonlocal Self-similarity, NSS)的匹配^[9],它寻找图像中的相似块,并将这些有冗余的图像块堆叠起来组成观测矩阵.当由于噪声等原因导致相似块的估计出现较大误差时,观测矩阵的低秩特性便无法保证,降噪图像会发生模糊^[11],因此构建稳定的观测矩阵十分关键.

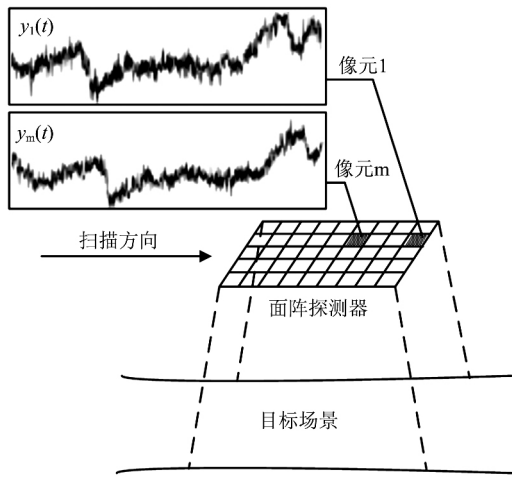


图1 面阵扫描示意图
Fig.1 Schematic diagram of array scanning

在场景信息变化较慢的情况下进行高帧频的凝视成像,很明显多帧图像间存在很高的冗余性.同理如图1所示,面阵探测器沿某一方向进行有序的高帧频扫描成像时,那么沿扫描方向的各个像元可以视为不同时刻对同一目标场景的重复扫描,将每个像元获取的观测信号作为独立的时间序列,那么这些时间序列也具有很高的冗余性且满足如下关系:

$$y_i(t) = x_1(t) + e_i(t) \quad , \quad (8)$$

$$y_m(t) = x_m(t) + e_m(t) \quad , \quad (9)$$

$$x_1(t) = x_m(t + (m - 1) * \tau) \quad , \quad (10)$$

其中 m 是像元数量 $y_1(t)$ $y_2(t)$ \dots $y_m(t)$ 是扫描方向上不同像元的观测信号 $x_1(t)$ $x_2(t)$ \dots $x_m(t)$ 是不含噪声的源信号 τ 是两组信号之间的相位延迟 $e_1(t)$ $e_2(t)$ \dots $e_m(t)$ 是独立同分布的随机噪声.当 $\tau=1$ 时,即每次扫描偏移量恰为一个像元,这些信号可以组成观测矩阵:

$$Y = \begin{pmatrix} y_1(1) & y_1(2) & \dots & y_1(N - m + 1) \\ y_2(2) & y_2(3) & \dots & y_2(N - m + 2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_m(m) & y_m(m + 1) & \dots & y_m(N) \end{pmatrix} = X^0 + E \quad , \quad (11)$$

其中 $0 < m < N$ N 为扫描成像总帧数 X^0 和 E 分别是源信号与噪声信号构成的矩阵.

2.2 硬件实现

为满足 $\tau=1$ 的条件,这就对扫描成像方式提出了两项较为严格的要求:一是扫描方向与面阵探测器的某一空间维方向相吻合;二是扫描角度与成像时刻相匹配,即两次曝光的图像沿扫描方向偏移一个像素.该扫描方式与数字 TDI 扫描方式一致^[19],满足如下关系:

$$\omega = (d/f) * Fps \quad , \quad (12)$$

其中 ω 是扫描角速度 d 与 Fps 分别是探测器像元尺寸和帧频 f 是系统焦距 d/f 代表系统的瞬时视场角.

为满足上述要求,需要精密运动控制机构来保证探测器稳定可靠的扫描成像.如图2所示,将探测器、光学镜头与 45° 反射镜安置于横滚环架上,横滚与俯仰两个轴系由电机、驱动器、反馈编码器组成闭环定位控制,探测器沿横滚轴转动方向摆扫成像,当设备扫描一个瞬时视场角时曝光成像一次.通过这种翼展方向的大角度摆扫,同时实现了宽幅扫描成像与构建观测矩阵所需的有序扫描方式.

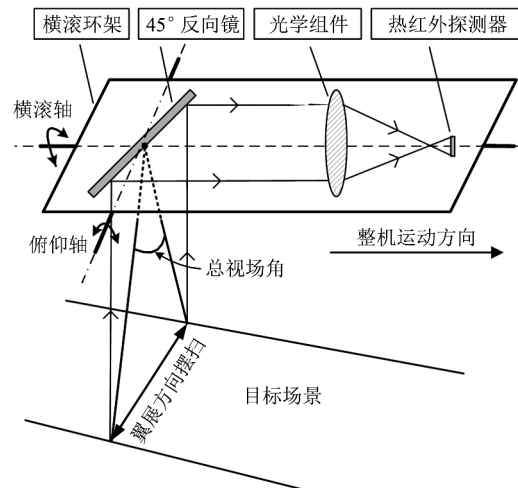


图2 翼展摆扫示意图
Fig.2 Schematic diagram of wingspan whisk broom

最终成像流程包括如下步骤:

- 1) 利用运动控制机构保证探测器沿其面阵的一个空间维方向进行摆动扫描;
- 2) 探测器每扫描经过一个瞬时视场角,曝光成像一次,经过连续有序的扫描成像,每个像元均获得对应的含噪时间序列;
- 3) 选择扫描方向上的一列像元,将每个像元对

应的时间序列按照式(11)格式依次作为观测矩阵 Y 的行向量;

4) 对该观测矩阵进行奇异值分解 $Y = U\Sigma V^T$;

5) 根据式(6)与式(7), 利用加权 SVT 方法进行低秩矩阵近似估计, 得到重构后矩阵 \hat{X} ;

6) 将重构矩阵 \hat{X} 的所有行向量取均值, 作为图像中沿扫描方向的一维信号。

7) 对垂直于扫描方向的所有列像元重复 3) 到 6) 步骤, 最终获得降噪后的宽幅二维图像。

3 试验结果与讨论

3.1 仿真分析

仿真实验如图 3 所示, 首先取无噪宽幅图像作为参考, 使用与图像等高的滑动窗口从图像的一侧开始移动, 每次移动一个像素, 模拟探测器对景物的宽幅扫描成像过程, 这样窗口中每个像元点均获得其对应的时间序列。同时对所有时间序列均添加高斯白噪声, 模拟每个像元所获得的含噪观测序列。

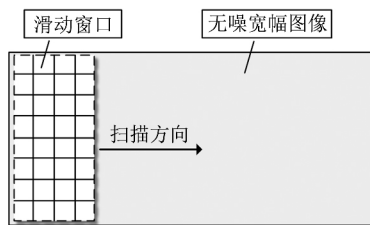


图 3 宽幅扫描仿真示意图

Fig. 3 Simulated scanning with wide swath imaging

将上述含噪的时间序列按照式(11)的格式构建观测矩阵, 并将本方法与小波降噪、PCA 降噪、数字 TDI 方法进行比较分析。评价标准采用图像降噪领域常用的峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR), 定义如下:

$$\text{PSNR} = 20 \log_{10} \left(\frac{2^b - 1}{\text{RMSE}} \right) \quad , \quad (13)$$

其中 b 为像素深度, RMSE 是两幅图像间的均方根误差, 定义为:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i,j} [x(i,j) - \hat{x}(i,j)]^2} \quad , \quad (14)$$

其中 $x(i,j)$ 是真实图像 (i,j) 位置的像素值, $\hat{x}(i,j)$ 是降噪后相同位置像素值, M 和 N 是图像尺寸。PSNR 的单位为分贝(dB), 代表处理后图像与参考图像间的整体差异性, 值越大降噪性能越好, 越接近于参考图像。

本文使用 320×480 像素尺寸的热红外图像作为参考, 扫描方向沿图像长度方向进行, 滑动窗口设定为 320×5 的大小并添加不同强度的高斯白噪声, 这样窗口中每一行的 5 个像元便可以获得 5×476 大小的观测矩阵。图 4 是观测矩阵的奇异值分布, 明显看出首个奇异值远大于其它奇异值, 信号能量主要集中在首个奇异值上, 通过调整每个奇异值的权重系数, 对奇异值进行收缩, 可以较好的恢复出原有无噪图像。

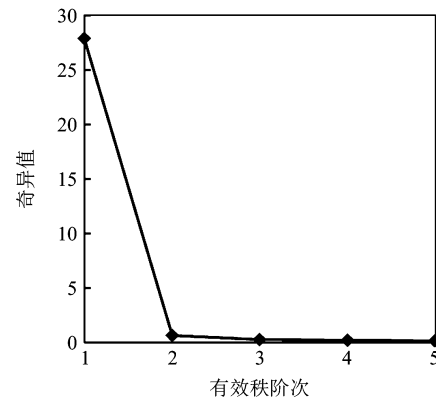


图 4 信号奇异值的分布

Fig. 4 Singular value distribution of experimental signal

降噪效果对比如图 5(a-f) 所示, 其中图 5(a) 为原始图像; 图 5(b) 为加入方差为 $5e^{-3}$ 的噪声后图像, PSNR = 23.03 dB; 图 5(c) 是采用软阈值与 3 级小波的降噪图像, PSNR = 29.36 dB; 图 5(d) 是 PCA 变换后, 取最大特征值重构的降噪图像, PSNR = 30.98 dB; 图 5(e) 是采用数字 TDI 的图像, PSNR = 31.35 dB; 图 5(f) 是本方法降噪后图像, 其中 $\lambda = 2.1$, PSNR = 32.70 dB。可以看出采用小波降噪的图像边缘出现一定模糊, PCA 降噪与数字 TDI 降噪效果有限, 而本方法获得了最高的 PSNR 值。

图 6 是不同方法处理后的图像 PSNR 值随噪声方差变化曲线。在噪声较小的情况下, PCA 降噪、数字 TDI 接近于本方法的降噪性能, 当噪声逐渐增大时本方法的性能衰减趋势较慢, 且仍具有较高的 PSNR 值, 具有一定的算法鲁棒性。

3.2 遥感试验

由于热红外图像获取的是景物温度分布, 因而在海面这类温度小范围波动的场景下噪声的影响更加敏感, 获取的图像存在较低的信噪比。因此为充分验证本方法的实际降噪效果, 于东海海域进行了机载遥感飞行试验。试验装置主要参数及试验条件如

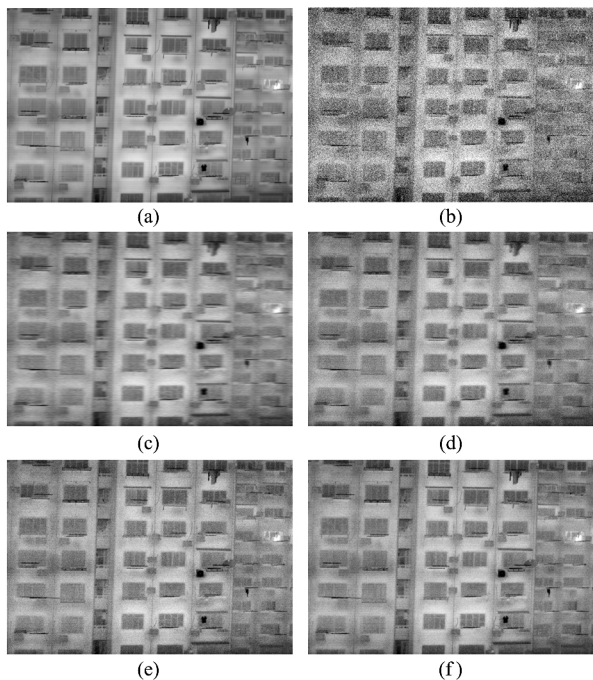


图5 不同方法处理后图像降噪效果对比
Fig.5 The contrast of denoised image with different methods

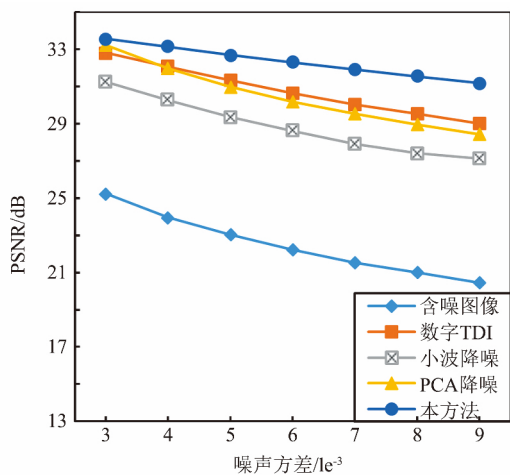


图6 PSNR 随噪声方差变化曲线
Fig.6 The plot of PSNR with different noise variance

表1所示,装置模型如图7所示,利用运动控制组件使探测器进行面阵摆扫和有序的曝光成像,由此获得所需的含噪时间序列。

处理前后的局部对比如图8(a)~(b)所示,其中图8(a)为实际拍摄的单帧原始图像,已进行非均匀性校正消除像元间信号响应的差异;图8(b)是文中方法处理后的对应区域图像,其中原始图像仅能区分海水的高温与低温区域,而处理后图像消除系统随机噪声,获得了清晰的热海水流动状态分布,特别是高低温交界区域的细节得到恢复。试验装置经

表1 装置参数及试验条件

Table 1 Parameters and conditions of experimental device

技术指标	参数
探测器类型	HgCdTe FPA
像元规模	320* 256
响应波段	8 ~ 12 μm
积分时间	100 μs
帧频	220 Hz
系统焦距	30 mm
F 数	2
摆扫总视场角	60°
实验平台	运5
飞行高度	2 000 m

过一次完整的摆扫得到尺寸为960* 256像素的宽幅海面图像,最终处理结果如图9所示,在宽幅扫描成像的同时也提高了探测灵敏度。

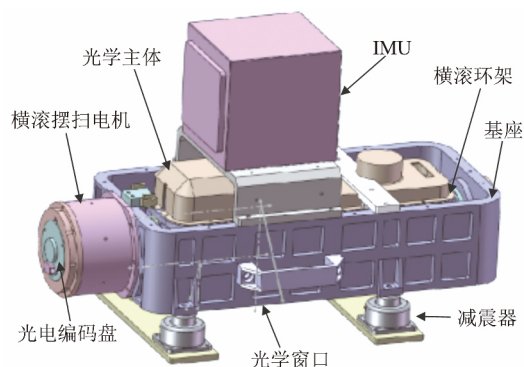


图7 试验装置模型图
Fig.7 Model diagram of experimental device

4 结论

针对强背景弱信号场景下,热红外成像系统噪声制约图像信噪比的问题,提出一种基于低秩矩阵近似理论的低噪宽幅热红外成像技术,利用面阵摆扫方式实现宽幅扫描成像并构建严格的观测矩阵,从含噪冗余的观测矩阵中尽可能精确的恢复出原始信号,减少图像噪声。相比于其他降噪方法,文中方法在不同噪声强度的测试条件下仍具有较高的峰值信噪比与降噪鲁棒性,在海水区域的遥感试验证明了该技术在宽幅成像的同时也提高了探测灵敏度。研究成果在红外弱目标识别、广域侦查等领域具有一定的应用价值。

References

[1] ZHOU Shi-Chun. *Introduction to advanced infrared opto-electronics engineering* [M]. Beijing: Science Press (周世椿).

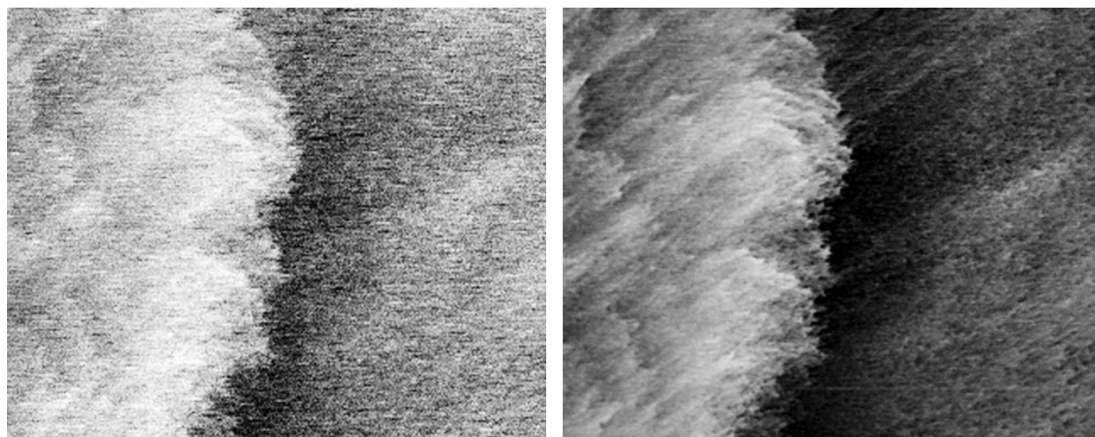


图 8 图像局部降噪前后对比

Fig.8 Partial denoised image (a) before , (b) after



图 9 海面宽幅降噪图像

Fig.9 Wide swath and denoised thermal image of sea surface

- 高级红外光电工程导论. 北京: 科学出版社) 2014: 8.
- [2] GUO Yan, WANG Jiang-An, HE Ying-Zhou. Study of detecting thermal track of submarines by infrared image. [J]. *Journal of Naval University of Engineering* (国妍, 王江安, 何英洲. 红外热像水面寻迹探测的理论分析. 海军工程大学学报) 2002, **14**(3): 89-92.
- [3] WANG Jian-Yu, LI Chun-Lai, JI Hong-Zhen, et al. Status and prospect of thermal infrared hyper-spectral imaging technology [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (王建宇, 李春来, 姬弘桢, 等. 热红外高光谱成像技术的研究现状与展望. 红外与毫米波学报) 2015, **34**(1): 51-59.
- [4] Protter M, Elad M. Image sequence denoising via sparse and redundant representations [J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 2009, **18**(1): 27-35.
- [5] PENG Yi-Gang, SUO Jin-Li, DAI Qiong-Hai, et al. From compressed sensing to low-rank matrix recovery: Theory and applications [J]. *Acta Automatica Sinica* (彭义刚, 索津莉, 戴琼海, 等. 从压缩传感到低秩矩阵恢复: 理论与应用. 自动化学报) 2013, **39**(7): 981-994.
- [6] Ye J P. Generalized low rank approximations of matrices [J]. *Machine Learning*, 2005, **61**(1): 167-191.
- [7] Elad M, Aharon M. Image denoising via sparse and redundant representations over learned dictionaries [J]. *TIP*, 2006, **15**(12): 3736-3745.
- [8] Ji H, Liu C, Shen Z, et al. Robust video denoising using low rank matrix completion: Proceedings of the 2010 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]. San Francisco, 2010.
- [9] Gu S, Zhang L, Zuo W, et al. Weighted nuclear norm minimization with application to image denoising: Proceedings of the 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]. Columbus, 2014.
- [10] Yin K, Lei Z, Zhang Y. An adaptive rank-sparsity K-SVD algorithm for image sequence denoising [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2014, **45**: 46-54.
- [11] Furnival T, Leary R K, Midgley P A. Denoising time-resolved microscopy image sequences with singular value thresholding [J]. *Ultramicroscopy*, 2017, **178**(1): 112-124.
- [12] Gu S H, Xie Q, Meng D Y, et al. Weighted nuclear norm minimization and its applications to low level vision [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2017, **121**: 183-208.
- [13] Garceau S: TDP MARS LW K508 [R]. France: Sofradir Corporation, 2013.
- [14] WANG Zhen-Ping. Research of image denoising using low-rank matrix Recovery [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University (王圳萍. 基于低秩矩阵恢复的图像去噪算法研究, 成都: 西南交通大学) 2012.
- [15] Recht B, Fazel M, Parrilo P A. Guaranteed Minimum-Rank Solutions of Linear Matrix Equations via Nuclear Norm Minimization [J]. *SIAM Review*, 2010, **52**(3): 471-501.
- [16] Cai J F, Candès E J, Shen Z. A singular value thresholding algorithm for matrix completion [J]. *SIAM J. Optim*, 2010, **20**(4): 1956-1982.

(下转第 306 页)

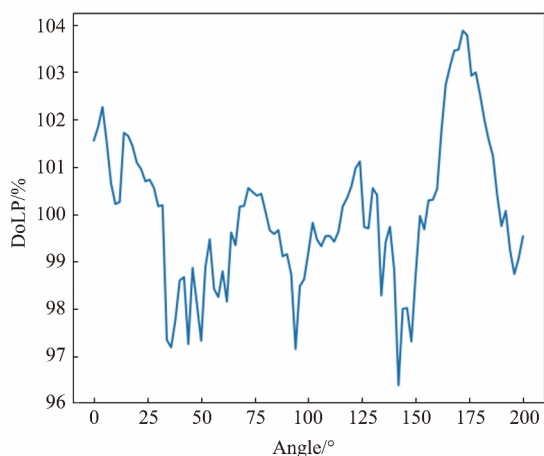


图7 透射率和角度校正后偏振度随角度变换图

Fig. 7 The degree of polarization varies with angle after transmittance and angle calibration

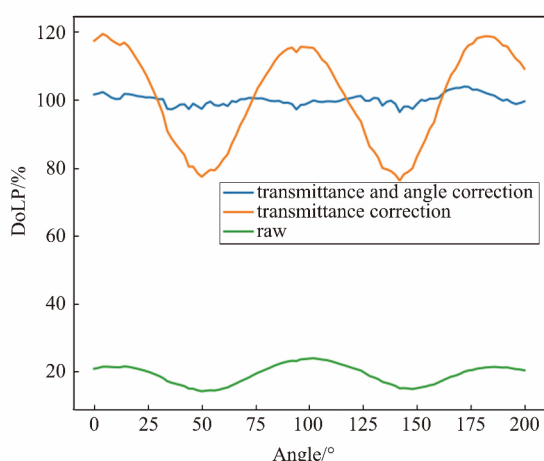


图8 偏振度随角度变换图

Fig. 8 The degree of polarization varies with angle

法 搭建了光栅透射率与光栅角度标定的实验系统. 使用高温黑体和可以旋转的偏振片, 标定了每个光栅的最大透射率, 最小透射率和与角度. 标定结果表明光栅透射率测量值与理论值有较大的偏差, 角度也有一定的偏差, 影响了偏振计算准确性. 随后对标定前后的结果进行了对比, 透射率标定修正了偏振度均值的误差, 角度标定修正了偏振度有规则上下浮动的误差, 表明了该方法可以消除光栅透射率和角度不均匀性对偏振度计算的影响, 更能体现目标

原有的偏振度信息, 对以后的偏振成像有较大帮助.

References

- [1] Playle N, Port D M, Rutherford R, *et al.* Infrared polarization sensor for forward-looking mine detection [C]. *Aero-sense*. 2002: 11-18.
- [2] Gartley M G. Polarimetric modeling of remotely sensed scenes in the thermal infrared [J]. 2007.
- [3] WANG Xi, CHEN Yang, HU Xiao-Yan, *et al.* Fabrication and signal-to-noise ratio analysis of an integrated polarization focal plane detector for near-infrared light [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser* (王玺, 陈扬, 胡小燕, 等. 集成偏振近红外焦平面探测器研制与信噪比分析. 光电子 • 激光), 2017(3): 250-255.
- [4] Malone N R. Detection comparisons between LWIR and MWIR polarimetric sensors [J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2008, **6972**: 69720P-69720P-9.
- [5] Tyo J S, Goldstein D L, Chenault D B, *et al.* Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications [J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(22): 5453-69.
- [6] LIAO Yan-Biao. *Polarization optics* [M]. Beijing: Science Press (廖延彪. 偏振光学. 北京: 科学出版社), 2003: 58.
- [7] Baker G, Wilson M, Coulter P. Development and results of NIR polarization camera [C] // Defense and Security Symposium. International Society for Optics and Photonics, 2007: 89-93.
- [8] Jones M W, Persons C M. Performance predictions for micro-polarizer array imaging polarimeters [J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2007, **6682**: 668208-668208-11.
- [9] Azzam R M A, Elminyawi I M, Elsaba A M. General analysis and optimization of the four-detector photopolarimeter [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1988, **5**(5): 681-689.
- [10] Zhang J, Luo H, Hui B, *et al.* Non-uniformity correction for division of focal plane polarimeters with a calibration method [J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(26): 7236.
- [11] WEI Xue-Tong, CAI Ying-Bo, Li De-Biao *et al.* Research on Image Processing in InGaAs Near-infrared Camera [J]. *Optics & Optoelectronic Technology* (魏学通, 蔡迎波, 李德彪, 等. InGaAs 近红外图像非均匀性处理研究. 光学与光电技术) 2011 **9**(04): 31-34.
- [12] ZHANG Hai-Yang, ZHANG Jun-Qiang, Yang Bin, *et al.* Calibration for Polarization Remote Sensing System with Focal Plane Divided by Multi-Linear Array [J/OL]. *Acta Optica Sinica* (张海洋, 张军强, 杨斌, 等. 多线阵分焦平面型偏振遥感探测系统的标定. 光学学报), 2016, **36**(11): 318-325.
- [13] *Computer Vision*, 2012, **99**(1): 1-24.
- [14] YANG Yu-Zhou. Research of Scanning Imaging Method with Focal Plane Array on the Base of Digital TDI Technology [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science (杨育周, 基于数字 TDI 技术的面阵扫描信息获取方式研究, 北京: 中国科学院大学) 2014.

(上接第 301 页)

- [17] Candès E J, Li X D, Ma Y, *et al.* Robust principal component analysis [J]. *Journal of the ACM*, 2011, **58**(3): 1-37.
- [18] Zhang Z D, Ganesh A, Liang X, *et al.* TILT: transform invariant low-rank textures [J]. *International Journal of*