

基于成像系统姿态信息的分时积分图像偏移修复

黄凌锋^{1,2,3}, 董峰^{1,2}, 傅雨田^{1,2*}¹中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;²中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对多帧短曝光图像叠加, 提出一种融合成像系统自身的角度信息, 通过光学系统与相机系统的坐标变换计算来获得图像偏移像素的方法。对于每一帧短曝光图像的角度, 利用光学系统几何关系进行亚像素级偏移配准, 再通过傅里叶变换的频移特性构建傅里叶频谱滤波器 $H(u, v)$, 在频域对图像进行亚像素级别的修正, 并使用刃边法对图像进行高频响应评估。对比未修复图像, 经所提算法修正后图像在 50% 调制传递函数 (MTF_{50}) 衰减处的分辨率从 20 lp/mm 提升到 33 lp/mm, 且其修复效果优于传统二次插值算法的修复效果; 所提算法在 40~80 lp/mm 分辨率范围内具有较好的修复效果, MTF 的峰值提升了 4 倍。

关键词 成像系统; 遥感光学系统; 短曝光图像叠加; 数据融合; 傅里叶频谱滤波器

中图分类号 V443+.5

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2411001

Time-Sharing Integral Image Offset Restoration Based on Imaging System Attitude Information

Huang Lingfeng^{1,2,3}, Dong Feng^{1,2}, Fu Yutian^{1,2*}¹Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;²Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Aiming at the multi-frame short exposure image overlay, this paper proposes a method that integrates the angle information of the imaging system and obtains the image offset pixels through the coordinate transformation calculation between the optical system and the camera system. For the angle of each frame of a short-exposure image, the geometric relationship of the optical system is used to perform sub-pixel offset registration, and the Fourier spectral filter $H(u, v)$ is constructed through the frequency shift characteristic of the Fourier transform. The image is corrected at the sub-pixel level in the frequency domain, and the high-frequency response of the image is evaluated by the edge method. Compared with that of the unrepaired image, the line pair of the image corrected by the proposed algorithm is increased from 20 lp/mm to 33 lp/mm at a modulation transfer function (MTF) attenuation of 50% (MTF_{50}), with its repair effect higher than that of the traditional quadratic interpolation algorithm. The proposed algorithm shows a positive repair effect in the line pair part of 40~80 lp/mm, and the peak value of the MTF is increased by four times.

Key words imaging systems; remote sensing optical system; short exposure image overlay; data fusion; Fourier spectral filter

1 引言

在地球静止轨道卫星凝视成像系统中, 为了获得较高的图像信噪比, 往往需要对指定成像区域进行长

时间的曝光积分。在长时间曝光中, 当成像系统的姿态发生变化时, 如抖动或平移等, 成像系统传感器捕获的图像也会因为姿态变化而产生相应的偏移, 使得捕获图像由于抖动而出现不同程度的模糊。目前对于图

收稿日期: 2022-01-24; 修回日期: 2022-03-21; 录用日期: 2022-05-11

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC1400901)

通信作者: *yutianfu@mail.sitp.ac.cn

像模糊的修复有多种方法,如超分辨率重建、多帧短曝光叠加等。国内有相关研究实现了无参考图像情况下的航空图像超分辨率重构^[1],在有参考图像的情况下,使用参考图像作为基础图像组进行图像重构,可将图像配准容错降低到8 pixel^[2]。此外,有研究使用分时稳定平台进行凝视系统的成像实验,用稳定平台进行模拟并使用质心法对图像进行亚像素偏移的计算,实现了图像的分时积分稳像^[3]。

在海洋遥感的凝视系统中,如若遇到观测对象无显著特征目标,或由大气因素如台风、云层等导致特征目标被覆盖,特征目标出现模糊、缺失时,难以对采集图像进行质心计算或特征点提取;同时,图像配准算力要求较大,在算力有限的卫星系统中难以实现实时图像修复。在无特征目标时,可以通过在成像系统中搭载一个与成像系统紧密相连的姿态测量设备,如星敏感器、陀螺仪等,通过姿态测量设备获得成像系统的成像姿态^[4]。在已知姿态数据后,根据姿态测量系统与成像光学系统的刚性连接结构进行对应的坐标系变换,将姿态数据与所得图像进行数据融合^[5],实现无特征目标情况下的多帧短曝光图像配准,进而实现图像的叠加。在短曝光图像配准时,由设备抖动引起的图像像素偏移往往会出现亚像素级别的移动,对此现有的常见方法是使用图像空域重采样的方法进行图像亚像素级别的偏移修正^[6-9],有研究指出对图像进行傅里叶变换,在图像的傅里叶频谱中根据空域和频域的对对应关系进行图像亚像素偏移的计算^[10],通过在频域上进行频域滤波可以实现对空域图像的较为精确的处理。本文以成像系统的姿态角作为输入量,通过模拟成像系统的姿态角度,使用傅里叶频域滤波器,重点探究将成像姿态的角度与亚像素图像偏移进行数据融合并最终实现多帧图像配准叠加的方法。

2 图像分时积分修复原理及模拟实验

2.1 姿态信息分时积分修复原理

高轨海洋遥感卫星位于地球静止轨道,高度为35800 km,如韩国的GOCI系列静止卫星成像仪。高轨海洋遥感卫星大多使用面阵凝视成像的方法,需要用较高的平台稳定度来实现长时间积分,从而获得较高的图像信噪比和较优的图像分辨率,如GOCI系列静止卫星成像仪的单波段积分时间为3~8 s,平台稳定度优于 0.7×10^{-4} (°)/s。在卫星系统中,平台稳定度对工艺的要求较高,若平台稳定度较低,卫星姿态角度会发生较大变化,从而导致图像像素晃动达到数pixel级别,此时再对图像进行长时间积分,会使得图像的分辨率下降。我国高轨海洋卫星设计等效积分时间为800 ms,通过分时积分进行图像读取,光学焦距为3.266 m,像元尺寸为18 μm。根据设计要求,系统需要达到数μrad级别的角分辨率和45 s的最大观测周期,按照空间像元失配不超过1/3像元的标准,单波段平台稳定度需要优于 1.9×10^{-5} (°)/s。该平台稳定度对技术要求较高,而通过分时积分方法,在保证单帧图

像短曝光,且探测器接收的光辐射量大于探测器最低响应光辐射量的情况下,可以显著降低平台要求。同时由于平台稳定度降低,单帧图像间出现的像素偏移量增大,因此本文尝试通过卫星的角度姿态信息,使用分时积分的方法对图像进行抖动修复。通常使用欧拉角表征卫星的姿态信息,在获得的欧拉角姿态信息中,存在由微振动及温度等导致的姿态测量误差。有研究指出,可通过采用振动源和相机布局、增加阻尼杆系等方法抑制微振动^[11]。James Webb天文望远镜使用减隔振技术,理论上能将振动影响降至 10^{-3} 量级(2.7×10^{-7} °);国内GF-4相机采取振动抑制措施后,在阻尼杆系不同阶数的基频处主光学振幅均下降至抑制前的3%左右,且抑制后微振动对调制传递函数(MTF)的影响得到有效控制^[12];有研究计算出现有微振动被抑制后,在50~100 Hz的频域内角位移振幅峰值为0.0046" (1.28×10^{-6} °),利用高轨海洋设计参数进行计算,其抑制后的微振动反映在图像上的像素位移为0.004 pixel,远小于1/3像元失配标准。由于平台姿态测量需要的精度较高,因此需要使用特殊姿态测量设备来获取精确的星上姿态,美国的GeoEye-1测绘卫星使用了HAST星相机,其测量误差优于0.4" (1.11×10^{-4} °),利用对应工程参数计算的像素位移约为0.35 pixel;国内有研究通过新型光学结构,设计了亚秒级星相机光学系统以及标定方法,获得的星相机姿态测量精度为0.56" (1.55×10^{-4} °),对应的像素位移为0.49 pixel^[13];同时也有研究使用对抗网络的方法对星相机所得星图的拖尾星斑进行修复,以提高星相机的测量精度^[14]。可见,使用高精度规格的星相机可以获得亚像素偏差级别的角度姿态信息。本文基于卫星的微振动抑制成果,对卫星的低频姿态进行信息采集。首先,通过卫星的姿态信息,解算出每一帧短曝光图像对应的像素偏移;然后,通过算法将每一帧像素偏移进行修复;最后,进行分时积分,以在较低平台稳定度下获得较好的图像信噪比和图像分辨率。

根据地球静止轨道卫星的模型,本文设计了实验进行模拟,如图1所示,通过刚体固连结构来模拟地球静止轨道卫星的成像模式。图像的角度输入,是将观测相机通过刚性连接固定在转动平台上,通过对转动平台进行姿态调控来模拟卫星成像系统的姿态变化,并对其与光轴角度的关系进行换算来获得观测相机的姿态角,所涉及的算法流程如图2所示。使用相机进行短曝光图像采集,同时通过与相机刚性固定的转动平台实现图像的角度输入。通过光学镜组的光学特性和相机的像元参数,计算得到角度在图像坐标系上偏移的像素值;对于图像,通过傅里叶变换得到图像的频谱,在频域上使用傅里叶频谱滤波器,将角度数据融合到图像,对短曝光图像进行偏移修正;图2虚线框所示为短曝光单帧循环,循环得到修正图像后,对修正短曝光图像进行图像叠加,从而获得结果图像,并进行图像评估。

在本文的姿态坐标系中,参考已有坐标系的转换

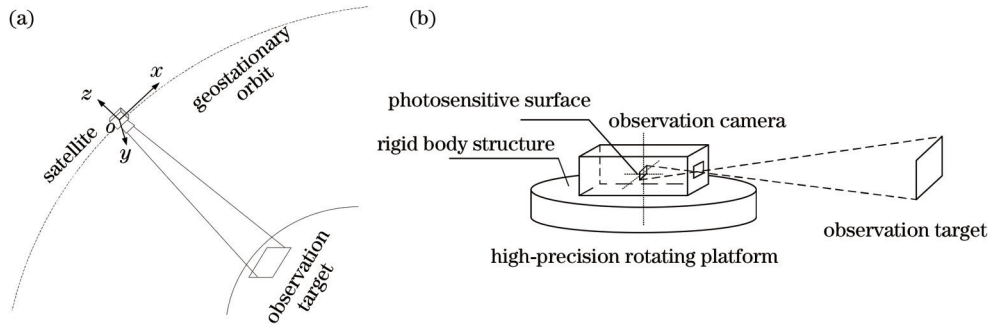


图 1 卫星成像模型与模拟实验结构。(a)静止轨道卫星凝视成像模型;(b)模拟实验结构

Fig. 1 Satellite imaging model and simulation experiment structure. (a) Geostationary orbit satellite staring imaging model; (b) simulation experiment structure

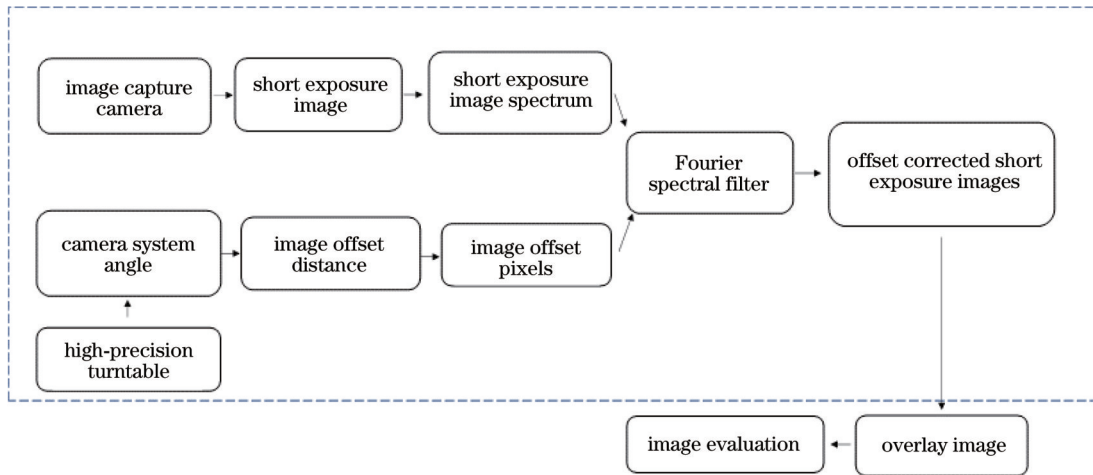


图 2 姿态角解算图像偏移修复算法流程

Fig. 2 Flowchart of image offset repair algorithm for attitude angle calculation

研究^[15],将平台坐标系和相机坐标系严格重合,此时平台转动角度与观测相机角度相同,通过平台转动获得成像系统的转动姿态角。当偏移的角度已知时,可通过观测相机的焦距和像元大小来解算出图像位移的像素,具体原理见图 3,其中: L 为像面到目标的距离(像物距离),由于地球静止轨道高度远大于焦距,因此 L 约等于地球静止轨道高度; F 为系统焦距, S 为目标大小, S_{pixel} 为目标在相机焦面上所占像元的大小。当观测物体距离远大于 100 倍系统焦距时,入射光可近似为平行光,由于运动的相对性,相机姿态角度变化可转化成光路变化的角度,即相机角度固定不变,入射光角度发生变化。有研究指出,可以通过成像系统偏转角度获得图像偏移,然后使用成像系统镜组移动来补偿偏转角度以实现图像修复^[16];同时,温度的变化也会改变镜组的折射率、反射镜曲率半径等,造成镜组系统焦距变化,对于温度变化的大口径光学系统,需要引入温度补偿模型 $f(T)$ 进行系统焦距校正,其中 T 代表温度, $f(T)$ 为对应的补偿模型焦距^[17]。本文假定温度恒定不变,即 $f(T)$ 为固定焦距,对姿态角度进行测量,对比像元尺寸进行像素偏移计算,实现数字图像级别上的图像偏移修复,该方法相比于镜组补偿法具有更好的集成性和可操作性。

卫星成像系统姿态的角度可以用 3 个欧拉角表示,即滚动角、俯仰角、偏航角。在对地凝视成像系统中,偏航角所引起的图像干扰为旋转,此类角度在卫星飞行时通常具有一定稳定性并且对凝视系统的高频响应影响较小^[18],可以用极小值来替代。本研究着重讨论滚动角和俯仰角对图像的影响,得出观测相机的角度偏差矩阵,该矩阵可表示为

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{W} = \begin{bmatrix} \theta_x \\ \theta_y \\ 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{J} = \begin{bmatrix} \tan(\theta_x) \\ \tan(\theta_y) \\ 0 \end{bmatrix} \\ L_{\text{pixel},n} = f(T) \times J \\ \Delta L_{nm} = L_{\text{pixel},nr} - L_{\text{pixel},mr} \\ V_{\text{pixel},nm} = \frac{\Delta L_{nm}}{S_{\text{pixel}}} \end{array} \right., \quad (1)$$

式中: \mathbf{W} 为由卫星成像系统输入角度组成的矩阵; θ_x 为俯仰角,相对于图像坐标系 x 轴; θ_y 为翻滚角,相对

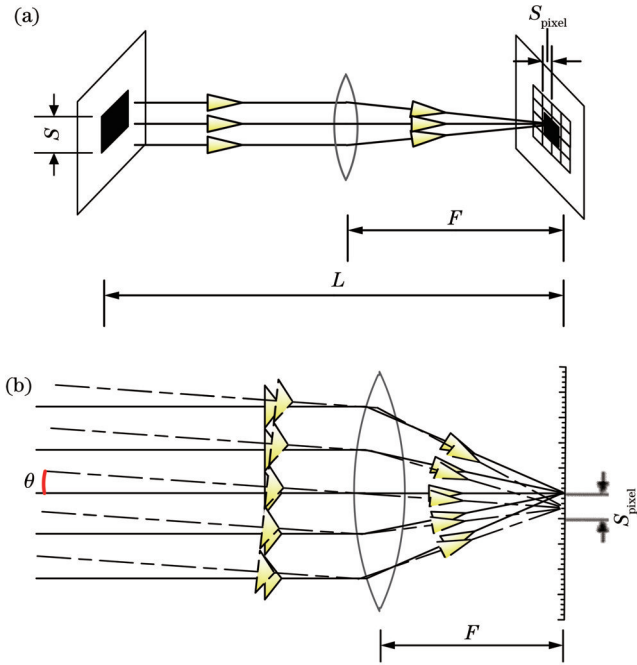


图 3 成像光学系统简化模型。(a) 平行光成像像元对应关系；
(b) 由入射光角度变化导致的像移
Fig. 3 Simplified model of imaging optical system.
(a) Correspondence of parallel light imaging pixels;
(b) image shift caused by the change of incident light angle

于图像坐标系的 y 轴； J 为根据欧拉角计算得到的偏移算子； $f(T)$ 为引入温度补偿模型后的系统光学焦

距； $L_{\text{pixel},n}$ 为 n 时刻 x 轴和 y 轴的偏移距离矩阵； $L_{\text{pixel},nr}$ 为计算出的 n 时刻 x 轴偏离图像中心像素点的距离； ΔL_{nm} 为不同时刻的距离偏移量， n 和 m 为两个不同的时刻； s_{pixel} 为相机像元大小，通过计算不同角度之间的像素中心偏移差值并与图像像元大小进行计算，所获得的 $V_{\text{pixel},nm}$ 即为角度反映在图像上的像素偏移值。

在获得多帧图像相对于原始图像的偏移图像之后，使用上采样-偏移修正-下采样的方法进行抖动修复。其中，上采样可分为两种方法：一是图像像素扩充。仍然在图像的空域进行上采样，之后再行偏移修正，如在亚像素图像重采样过程中，多数图像修正算法需要从亚像素图像中进行图像配准来获得图像的亚像素偏移，因此需要进行图像的空域扩充来保留图像的空域特征^[19-23]。二是使用傅里叶变换。利用傅里叶变换的频域特征以及空域和频域的对应关系，在频域中进行相应的处理，从而实现上采样以及偏移修正。由相机姿态角变化导致的图像偏移光路如图 4 所示。可以看到，光路入射角变化时，会在相机焦平面产生与角度有关的成像偏移，所产生的偏移反映在焦平面的结果如图 5 所示。可见，像素移动距离往往是浮点级亚像素而并非刚好吻合插值重采样中的特定插值级数，如二次插值产生的半像素。由于空域的图像偏移修复受限于上采样扩充图像的像素数值，因此本研究尝试使用傅里叶变换在频域中进行较为精确的浮点级亚像素移动。

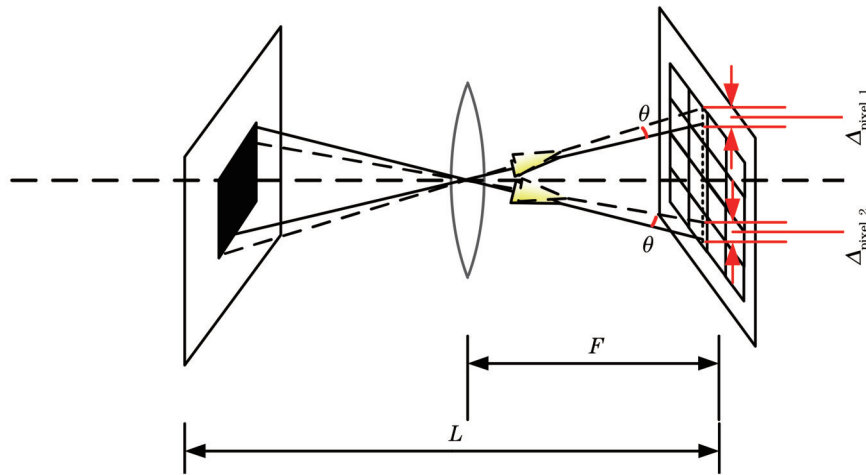


图 4 由入射角微小变化导致的成像像素偏移距离
Fig. 4 Offset distance of imaging pixels caused by small changes in the angle of incidence

本文算法中基于傅里叶频谱的频移特性可表示为 $f(x - x_0, y - y_0) \Leftrightarrow F(u, v) \exp[-j2\pi(x_0u/M + y_0v/N)]$ ，

$$H(u, v) = \frac{\mathcal{F}[f(x - x_0, y - y_0)]}{\mathcal{F}[f(x, y)]} = \exp[-j2\pi(x_0u/M + y_0v/N)] \quad (2)$$

式中： j 为虚数单位； F 为图像空域谱 f 通过傅里叶变换后的图像频谱； \mathcal{F} 表示傅里叶变换； H 为根据傅里叶频

移特性构建的傅里叶频域滤波器； x_0, y_0 为空域中图像移动的距离； u, v 为频谱中对应的坐标； M, N 为图像尺寸大小，即图像沿各轴方向的像元数量。设计了以图像、图像偏转角度为输入，叠加图像为输出的傅里叶频谱滤波器。根据获得的相机像元大小 s_{pixel} 、图像偏转角度 θ 等，按式(1)的计算方法对短曝光图像进行傅里叶频谱滤波后，再进行图像叠加，最后对所得图像进行质量评估。

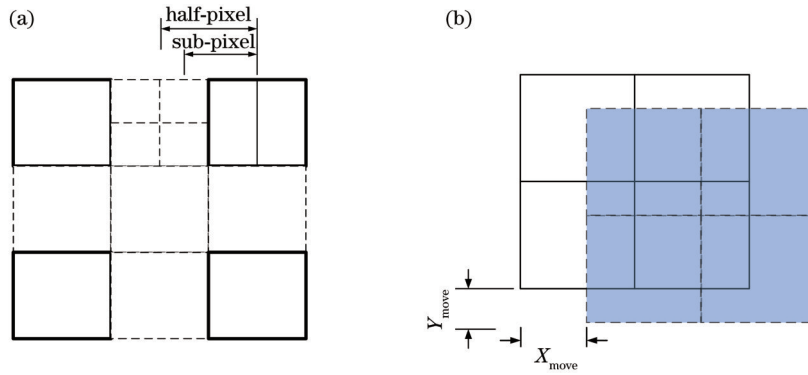


图 5 偏移距离与偏移像素值的量化对应关系。(a)半像素和浮点级亚像素;(b)像素移动距离

Fig. 5 Quantization correspondence between offset distance and offset pixel value. (a) Half-pixel and floating-point sub-pixel; (b) pixel shift distance

使用表征图像各个轮廓边缘清晰度的灰度平均梯度(GMG)进行无源图像评估,同时考虑到光学系统的评估一致性,参考已有在轨调制函数检测方法^[24],使用刃边法对图像进行MTF评估,以评估系统修正后的高频分辨能力。联合两种评估方法对所提算法的效果进行评估,以验证算法的可行性及有效性。

2.2 模拟实验验证

验证实验中使用德国 Physik Instrumente 公司生

产的 H-824 精准 6 轴转动平台来模拟角度抖动,使用海康威视(HIKVISION)公司生产的型号为 MV-CA060 的相机进行图像采集,图像分辨率为 3070 pixel×2048 pixel,像元尺寸为 2.4 μm。为提高图像采集的灵敏度,使用像元组合(Binning),实际使用的像元尺寸为 4.8 μm,最高帧频为 17 frame·s⁻¹,配备焦距为 50 mm 的定焦镜头,实验设备与利用目标刃边法观测的靶标图像如图 6 所示。

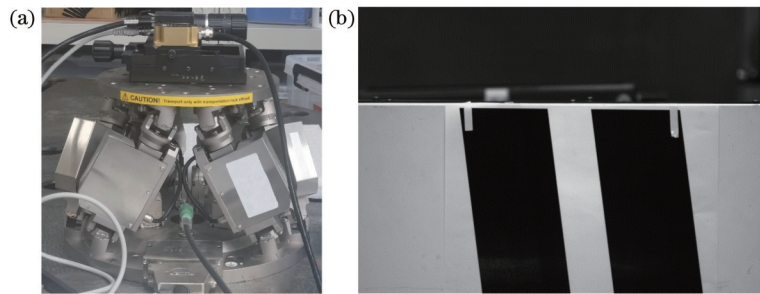


图 6 实验设备与目标图像。(a)实验设备;(b)目标刃边法观测的靶标图像

Fig. 6 Experimental equipment and target image. (a) Experimental equipment; (b) observation target image by target edge method

结合模拟实验的各项参数计算得到的系统综合参数如表 1 所示,实验选取不同的角度分别进行 30 帧图像采样成像,对特定角度和采集的图像进行匹配,模拟某一时刻成像系统的姿态角度。根据遥感平台的像质要求,在多通道凝视成像系统中,像元不能失配超过

1/3 个像元,本实验中针对 3~1/3 像元附近的角度进行了讨论,对所获得的姿态测量结果增加相应的微小振动测量误差,并使用质心提取方法对采集的图像进行系统角度标定,确保转台输入角度与实际角度的精确性,输入角度及其对应偏移量如表 2 所示。

表 1 模拟实验系统综合参数

Table 1 Comprehensive parameters of simulation experiment system

Optical parameter		Camera parameter			System parameter	
Focal length /mm	Object distance /m	Resolution / (pixel×pixel)	Pixel size /μm	Exposure time / ms	Angular resolution /(°)	Line resolution /mm
50	5	1535×1024	4.8	10	0.0056	0.4800

3 分析与讨论

在获得的图像数据中,随机选取 10 帧图像及其对应的角度数据进行处理并进行 GMG 评估;再选取目标图像中的刃边特征区域进行开窗,并对开窗图像进

行 MTF 评估。图 7 所示为拍摄图像经过不同处理后的结果图像。图 7(a)所示为理想无抖动情况下,叠加 10 次单帧图像后的结果,用于模拟成像系统无抖动时,采用长积分时间获得的图像;图 7(b)所示为 10 帧不同的图像通过角度修复算法后所得图像。

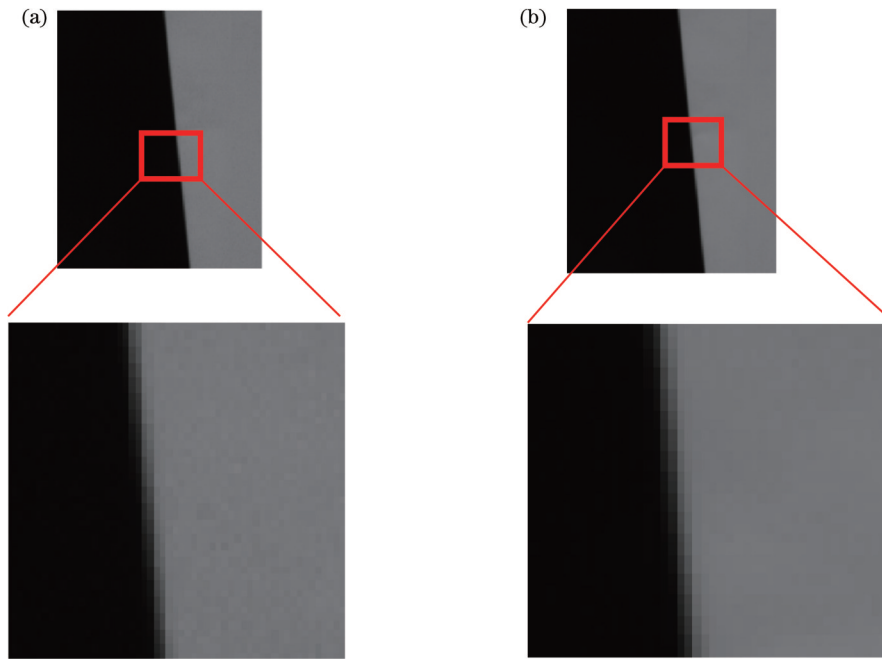


图 7 长曝光图像与分时积分叠加图像。(a)单帧图像重复叠加结果;(b)角度修复后多帧图像叠加结果

Fig. 7 Long exposure image and time-sharing integral superimposed image. (a) Repeated superposition result of single-frame images; (b) multi-frame image superposition result after angle restoration

表 2 模拟实验角度选取值

Table 2 Angle selection value of simulation experiment

Test number	Focal length / mm	Rotation angle / (°)	Deviation distance / μm	Deviation / pixel
1	50	0	0	0
2	50	0.004	3.4906	0.7272
3	50	0.008	6.9813	1.4544
4	50	0.012	10.4719	2.1681
5	50	0.016	13.9626	2.9089
6	50	0.020	17.4532	3.6361

从图 7 可见,当系统无抖动时直接采用长时间积分,相机白噪声等会造成图像的信噪比降低。图 8 所示为单行图像的灰度变化情况,当灰度值较高时,数据 a 的灰度图像出现较多的毛疵噪声,数据 b 的边缘变化则更加平滑且高灰度区域中毛疵噪声较少。可见,在使用分时积分方法后,在图像特征信息得以保留的情况下,图像更平滑,图像噪声减少,信噪比得到了有效提升,因此验证了仿真中使用分时积分方法的合理性。

实验中分别对图像使用频域滤波法修复后叠加、二次插值修复法叠加以及未进行角度修复叠加的情况进行 GMG 评估,结果如图 9 所示。本文使用的角度均为亚像素级偏移,因此抖动偏转对叠加图像的影响较小。图 10 所示为修复前后图像的归一化 GMG 指数提升比。可见,GMG 指数在图像修复后有所提高,提升比峰值约为 0.08%,总体提升较小,对图像清晰度的影响不大。因此可以认为本文算法可以在对图像清晰

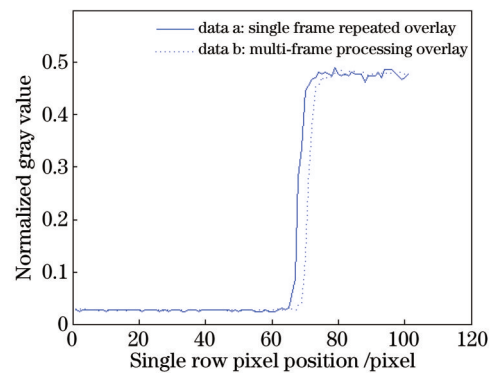


图 8 不同图像的单行线分布函数

Fig. 8 Single line distribution function of different images

度影响较小的情况下,提升图像的信噪比。

本研究使用刃边靶标,利用刃边法对整个相机系

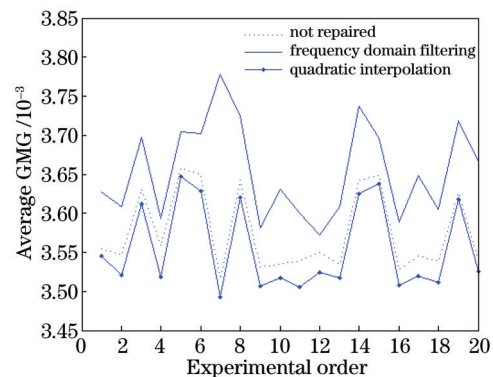


图 9 不同处理方法的图像 GMG

Fig. 9 Image GMG with different processing methods

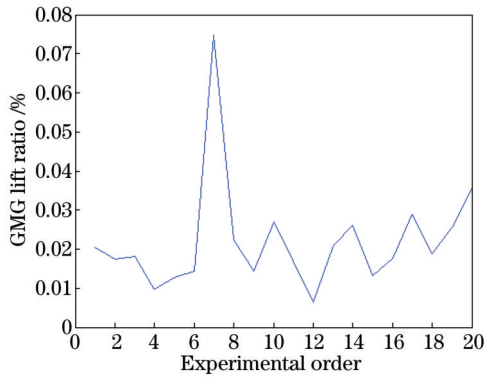


图 10 修复前后图像 GMG 提升比

Fig. 10 Image GMG lift ratio before and after restoration

统的 MTF 进行测算。将图像的斜边部分进行插值超采样,并根据斜边角度进行映射得到边缘扩散函数(ESF),对 ESF 进行求导获得 ESF 的线扩散函数(LSF),对 LSF 进行傅里叶变换即可获得图像的空间频率响应(SFR),图像的 SFR 即可等效为图像系统的 MTF。图 11 为所采用图像中刃边部分的对比图,不同图像处理结果的 MTF 曲线如图 12 所示。

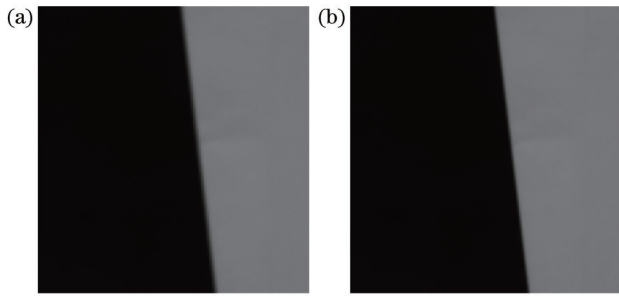


图 11 刃边图局部图像。(a)未修复的刃边图局部;(b)修复后的刃边图局部

Fig. 11 Partial images of edge graph. (a) Part of unrepaired edge map; (b) part of edge map after repair

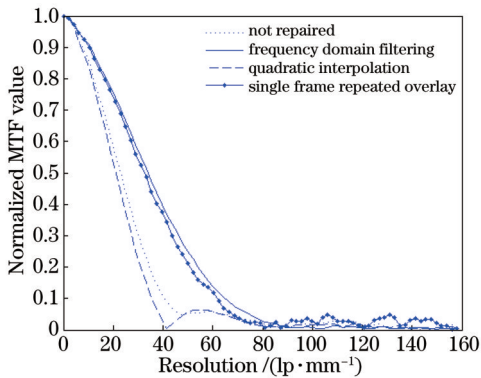


图 12 不同算法处理后的图像 MTF 曲线

Fig. 12 MTF curves of image processed by different algorithms

从图 11 可见,经过本文算法修复后,根据人眼主观观测,图像的边缘模糊情况得到了改善。从图 12 可见,理想情况下使用算法修复后的 MTF 在高频部分明显优于未修复图像,且接近理想情况,相对于二次插

值法,本文算法的修复效果明显提升,一些特征值的计算结果如表 3 所示。在 50% 调制传递函数(MTF50)衰减处,由于姿态测量误差的存在,二次线性插值法易受到姿态测量误差的影响,从而形成插值像素阶跃,如在 1.45 pixel 偏移时,由测量误差导致的返回偏移值大于 1.5 pixel,此时二次插值的阶跃性导致该算法直接进入 2 pixel 处进行修复,像素偏差大于 1/3 pixel,因此修复精度较差、提升效果较小;使用傅里叶频滤波滤波器,只会引入一次测量误差,修复后的分辨率从 20 lp/mm 提升到 33 lp/mm,且由于单帧叠加会带来信噪比的降低,因此实际修复效果要优于单帧叠加图像的 32 lp/mm,即在 5 m 的物距下极限分辨线宽由 25.00 μm 提高到 15.15 μm 。结合项目指标,将地球静止轨道高度 35800 km 及相关参数与本研究选取的模拟实验参数进行对比和等比例换算,结果如图 13 所示。MTF₅₀ 的分辨线宽由 179.00 m 提高到 108.474 m,地球静止轨道卫星线分辨率要求优于 200 m,通过换算得到其在本实验系统对应的分辨率为 17 lp/mm,此处通过多帧短曝光叠加后,在较低稳定度的抖动时获得的 MTF 值为 0.6326,通过抖动补偿修复后,该分辨率处的 MTF 值提升至 0.8103;在保持 MTF 不变的情况下,其分辨率提高至 27 lp/mm(图 13),即线分辨率从 200.00 m 提高到 132.592 mm,因此认定在 200 m 线分辨率处获得一定的提升效果。

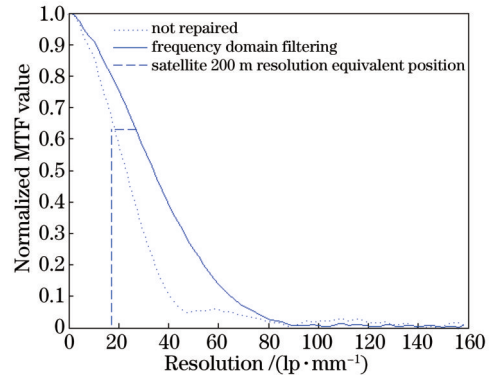


图 13 不同算法处理前后卫星 200 m 分辨率的提升趋势

Fig. 13 Improvement trend of satellite 200 m resolution before and after processing by different algorithms

表 3 算法处理前后特征 MTF 值变化对比

Table 3 Comparison of characteristic MTF values before and after algorithm processing

Type of processing	Resolution / (lp·mm ⁻¹)		
	MTF ₅₀	MTF ₁₀	MTF ₀
Single frame image	32	63	80
Fourier algorithm	33	101	85
Quadratic interpolation	21	48	89
Unprocessed image	20	34	83

通过多次实验并对各分辨率的提升比例进行统计和平均,所得的结果如图 14 所示。可见在姿态测量存在阶跃的情况下,当分辨率为 40~80 lp/mm,本文算

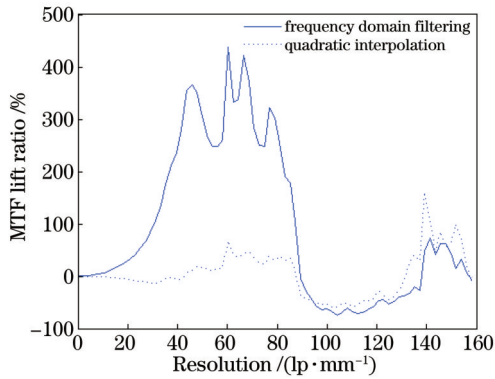


图 14 频域滤波法和插值法的 MTF 提升比例比较

Fig. 14 Comparison of MTF lift ratio between frequency domain filtering method and interpolation method

法提升效果最为显著;当分辨率高于 80 lp/mm 时,观测相机系统本身的 MTF 精度以及目标精度的缺失,

导致 MTF 提升均值呈现的规律性不强,甚至出现减弱。同时,使用所提的傅里叶频谱滤波方法可以避免在姿态测量误差允许的范围内出现二次插值的阶跃情况,在极端阶跃情况下修复效果获得了较大提升,因此可以认为,本文算法可使相机系统的高频响应得到了优化,特别是在 40~80 lp/mm 范围内,即线分辨率为 6.25~12.25 μm ,修复效果显著提升,且在 60 lp/mm 处,其 MTF 峰值提升了 4 倍,使得成像系统的抖动对系统 MTF 的高频分辨率影响减弱。

实际情况中,由于收集到的姿态信息会出现一定的采集误差,且图像曝光时间变短,图像的信噪比降低,本研究对姿态信息人为添加了符合高斯分布的采集误差:误差分布范围均值为 0,标准差为 0.5 pixel,使用本文算法与传统插值算法进行对比实验,实验结果如图 15 所示;同时对所采集的图像进行高斯模糊后,再进行对比实验,实验结果如图 16 所示。

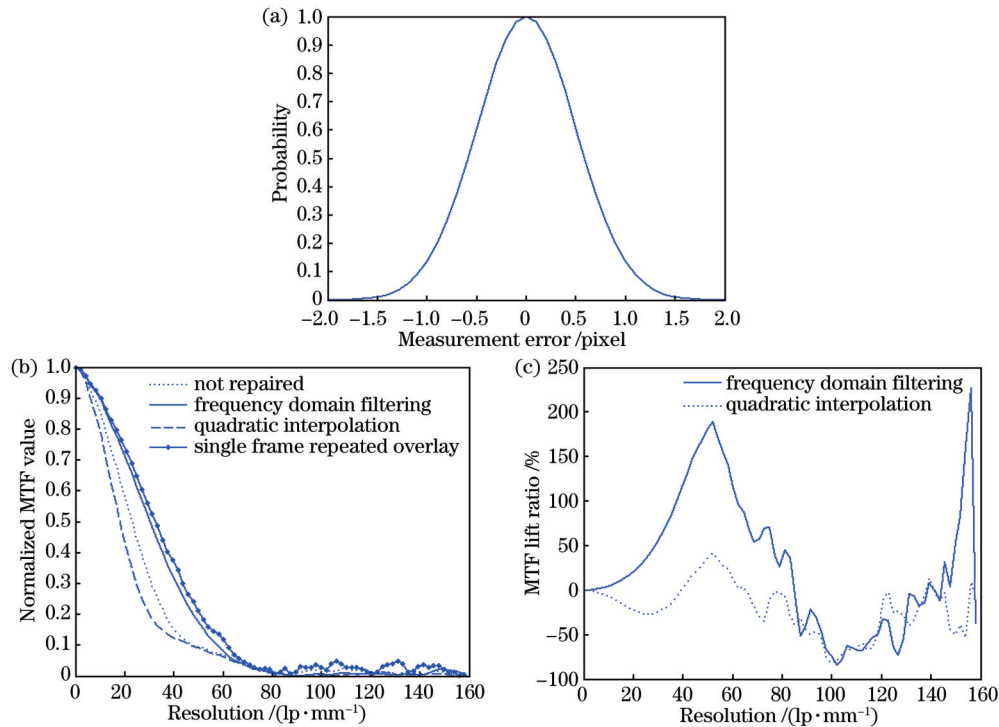


图 15 存在采集噪声时的图像修复结果。(a)符合高斯分布的采集误差概率密度谱;(b)存在采集误差的各算法处理后的 MTF 值;(c)存在采集误差的各算法处理后的 MTF 提升比

Fig. 15 Image inpainting results in the presence of acquisition noise. (a) Probability density spectrum of acquisition error conforming to Gaussian distribution; (b) MTF values processed by each algorithm with acquisition error; (c) MTF lift ratio processed by each algorithm with acquisition error

从图 15 可见:当存在 0~1.5 pixel 测量误差时,由于测量误差符合高斯分布,因此在大多数情况下测量误差不会对算法造成较大影响;当算法输入数值中出现较大的测量误差数据时,MTF 提升比均有所下降,如 40~80 lp/mm 处 MTF 提升比下降至 100% 附近,但其修复效果仍优于传统插值方法。从图 16 可见,低信噪比时图像本身的噪声导致图像高频响应较差,在使用本文算法后,所获得的修复图像在 30~60 lp/mm

范围内的修复效果较好,但大于 60 lp/mm 后的修复效果呈现出随机性,综合图 15(b)中单帧图像叠加的 MTF 曲线可以发现,由于单帧图像叠加的高频响应基本截止于 60 lp/mm,因此判断此时算法修复受限于图像信噪比。综上所述,本文算法在单帧图像保持较好信噪比的情况下,实现了通过分时积分减少平台抖动的的影响,提升成像系统高频响应的目的,从而提高成像系统的高频分辨率。

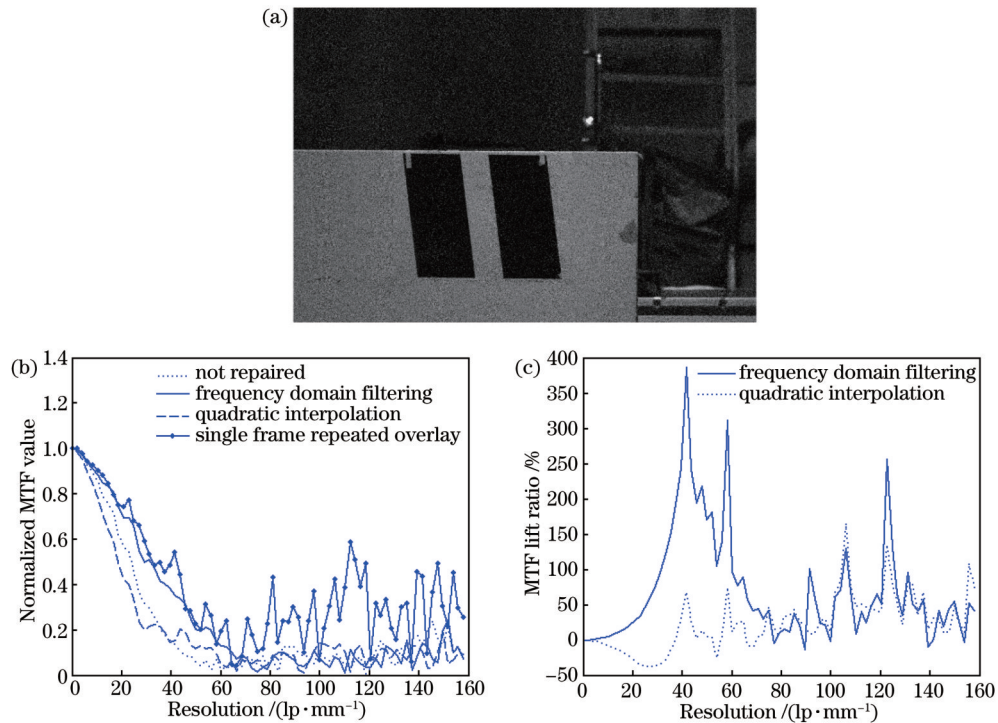


图 16 低信噪比时的图像修复效果。(a)低信噪比图像;(b)低信噪比图像经各算法处理后的 MTF 值;(c)低信噪比图像经各算法处理后的 MTF 提升比

Fig. 16 Inpainting effect for low signal-to-noise ratio images. (a) Low signal-to-noise ratio image; (b) MTF values of low signal-to-noise ratio image processed by each algorithm; (c) MTF lift ratio of low signal-to-noise ratio image processed by each algorithm

4 结 论

对于在轨的地球静止轨道凝视系统的分时积分稳像技术,通过图像本身进行特征匹配等会消耗大量的算力,且可能存在目标特征丢失,从而难以实现图像的实时处理。通过引入卫星系统的姿态数据,将其与图像进行数据融合,并使用傅里叶频率滤波方法实现亚像素级图像偏移,将姿态数据与图像的亚像素偏移建立计算关系,使用算法实现基于卫星系统角度姿态的图像亚像素级偏移修复。本文方法通过引入外部姿态数据,减少了图像特征匹配以及配准等计算步骤,从而降低图像修复算法的算力需求。同时,设计了基于傅里叶频谱滤波器图像亚像素级偏移修正算法,将其效果与符合图像配准条件的图像直接叠加以及传统的二次插值修复方法的效果进行比对,发现相对于二次插值方法解决了由姿态误差导致的插值像素阶跃的情况,本文方法只引入了测量误差,提高了图像修复效果。本文方法能够将长曝光图像的等效积分时间拆分,通过短曝光图像修复后叠加的方式,降低了长曝光图像下对平台稳定度的需求。针对本文方法设计了精准转动平台下的实验,从角度输入、数据融合、图像亚像素修复等方面进行了验证,用实际输入的角度和图像验证了本文方法的可行性。此外,本文方法虽优化了图像修正的算力成本,一定程度上解决了目标特征丢失情况下的配准失配问题,但其修复效果依赖于系统测量精度,要达到理想的修复效果,需要姿态测量精

度足够高,且像元精度也将直接影响算法的有效性,较为依赖测量控制设备,同时高频微小扰动、温度以及图像采集设备自身信噪比等因素可能对修复算法产生影响,对于系统集成度有较高的要求,因此本文方法的适配性还有发展空间。

参 考 文 献

- [1] 杨文波. 航空图像超分辨率重构技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2014.
Yang W B. Research of the techniques of super-resolution reconstruction of aviation images[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [2] 何林阳. 航空图像超分辨率重建关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2016.
He L Y. Research on key techniques of super-resolution reconstruction of aerial images[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [3] 陶小平. 地球静止轨道凝视成像系统分时积分稳像技术验证[J]. 光学学报, 2014, 34(s1): s111002.
Tao X P. Technology of vibration suppression based on multiple integration for staring imaging system in geostationary orbit[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(s1): s111002.
- [4] 康国华, 范凯, 周琼峰, 等. 基于 Gauss-Newton 和 UKF 结合的微小卫星姿态确定算法[J]. 中国空间科学技术,

- 2018, 38(2): 16-23.
- Kang G H, Fan K, Zhou Q F, et al. Attitude determination algorithm for micro-satellite based on Gauss-Newton and UKF[J]. Chinese Space Science and Technology, 2018, 38(2): 16-23.
- [5] 范宇浩. 双目测距辅助下的数字图像稳定系统[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- Fan Y H. Digital image stabilization system aided by binocular ranging[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [6] 穆绍硕. 基于多帧影像的航空超分辨成像技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
- Mu S S. Research on super-resolution imaging techniques of multi-frame aerial images[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [7] Chen Y, Jin W Q, Wang L X, et al. Sub-pixel processing algorithm based on boundary recursion and error optimization in staring FPA nonuniform micro-scanning imaging[J]. Optik, 2011, 122(15): 1341-1348.
- [8] Fattal R. Image upsampling via imposed edge statistics[J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3): 95.
- [9] Nakazawa A. Noise stable image registration using RANdom RESAmple Consensus[C]//2016 23rd International Conference on Pattern Recognition (ICPR), December 4-8, 2016, Cancun, Mexico. New York: IEEE Press, 2016: 853-858.
- [10] 唐春菊. 基于频谱分析的运动模糊图像参数检测[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015, 13(1): 148-153.
- Tang C J. Parameter detection method of motion blur images based on spectrum analysis[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015, 13(1): 148-153.
- [11] 于登云, 练敏隆, 周峰, 等. 微振动对高轨(GEO)遥感卫星图像质量的影响[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(1): 74-86.
- Yu D Y, Lian M L, Zhou F, et al. Influence of micro-vibration on the image quality of a GEO remote sensor[J]. Scientia Sinica: Informationis, 2019, 49(1): 74-86.
- [12] 邓长城. 飞轮微振动对星载一体化卫星成像质量影响研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
- Deng C C. Effects of the flywheel micro-vibration on the image quality of a integration satellite[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [13] 王伟之, 王妍, 于艳波, 等. 亚角秒级星相机的精度测定[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(9): 0917002.
- Wang W Z, Wang Y, Yu Y B, et al. Accuracy determination for sub-arcsec star camera[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(9): 0917002.
- [14] 王奇, 傅雨田. 用于高轨卫星精密稳像的拖尾星斑复原[J]. 光学学报, 2020, 40(13): 1311002.
- Wang Q, Fu Y T. Restoration of smearing stars in fine image stabilization of high-orbit satellites[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(13): 1311002.
- [15] 龚辉. 基于四元数的高分辨率卫星遥感影像定位理论与方法研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2011.
- Gong H. Study on theory and method of geopositioning for high-resolution satellite imagery based on quaternion [D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2011.
- [16] 魏传新. 空间望远镜稳像系统动力学关键技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2016.
- Wei C X. Research on kinetics of the image stabilization system in space telescope[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [17] 梁倩, 张涯辉. 大口径光电设备温度补偿模型研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(19): 1912003.
- Liang Q, Zhang Y H. Temperature compensation model for large-aperture optoelectronic devices[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(19): 1912003.
- [18] 余成伟, 谌德荣, 杨建峰, 等. 卫星姿态抖动对 LASIS 成像质量的影响[J]. 光电工程, 2004, 31(5): 4-6, 13.
- Yu C W, Chen D R, Yang J F, et al. Influence of satellite attitude jitter on LASIS imaging quality[J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(5): 4-6, 13.
- [19] 徐全飞. 海洋遥感图像亚像素配准算法关键技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2017.
- Xu Q F. Research on key techniques of sub-pixel registration algorithm for marine remote sensing image [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [20] 袁铭举. 基于 MATLAB 视频监控图像插值算法研究[J]. 信息通信, 2019, 32(11): 23-26.
- Yuan M J. Research on image interpolation algorithm based on MATLAB video surveillance[J]. Information & Communications, 2019, 32(11): 23-26.
- [21] 彭安杰, 曾辉, 康显桂. 基于多方向差分的重采样取证技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2016, 46(5): 627-642.
- Peng A J, Zeng H, Kang X G. Resampling forensics based on multi-directional difference[J]. Scientia Sinica: Informationis, 2016, 46(5): 627-642.
- [22] Xiong T, Wang S, Hou B, et al. A resample-based SVA algorithm for sidelobe reduction of SAR/ISAR imagery with noninteger nyquist sampling rate[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(2): 1016-1028.
- [23] Koen M, Bart B. Resample hardware for 3D graphics [EB/OL]. [2022-01-05]. <http://dx.doi.org/10.2312/EGGH/EGGH02/017-026>.
- [24] 徐伟伟, 张黎明, 杨宝云, 等. 光学卫星相机在轨调制传递函数检测方法[J]. 光学学报, 2020, 40(22): 2228001.
- Xu W W, Zhang L M, Yang B Y, et al. On-orbit modulation transfer function estimation of optical satellite camera[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(22): 2228001.