

航天 CMOS 相机动态画幅成像瞬时影像像旋分析

王绍恩^{1,2,3}, 杨秀彬^{1,3*}, 徐婷婷^{1,2,3}, 韩金良^{1,2,3}, 常琳^{1,3}, 岳炜^{1,2,3}

¹中国科学院天基动态快速光学成像技术重点实验室, 吉林 长春 130033;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

摘要 为定量分析动态漂移时的像旋对成像质量影响的程度, 基于动态环扫成像理论, 建立一种静态影像与动态漂移间的融合模型。然后结合面阵 CMOS 相机成像特点与动态运动特性, 提出对像旋矢量进行分解处理再融合的仿真模拟方法, 设计了一种动态环扫画幅影像像旋仿真分析方法, 获取了不同动态成像参数下的模拟影像。最后利用成像幅宽、地面分辨率、成像系统信噪比、峰值信噪比及结构相似性等指标对模拟影像进行定量评估分析。仿真结果表明, 相机曝光时间越长, 成像系统信噪比越高, 像旋越大, 成像质量越差, 结构相似性越小。研究结果可为未来多种动态成像模式设计中减小像旋影响、提高相机成像质量提供有效的参考。

关键词 成像系统; 空间光学; 动态成像; 像旋; 峰值信噪比; 结构相似性; 曝光时间

中图分类号 V19

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2111003

Instantaneous Image-Rotation Analysis for Dynamic Format Imaging of Space CMOS Camera

Wang Shaoen^{1,2,3}, Yang Xiubin^{1,3*}, Xu Tingting^{1,2,3}, Han Jinliang^{1,2,3},
Chang Lin^{1,3}, Yue Wei^{1,2,3}

¹Key Laboratory of Space-Based Dynamic & Rapid Optical Imaging Technology,
Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun, Jilin 130033, China

Abstract To quantitatively analyze the influence of image-rotation on the image quality during dynamic drift, a fusion model comprising a static image and dynamic drift is proposed based on the dynamic circular scanning imaging theory. A simulation method of image-rotation vector decomposition and refusion is designed based on the imaging and dynamic motion characteristics of area array CMOS camera. Further, an image-rotation simulation analysis method of the dynamic circular scanning format image is designed. Thus, all simulated images under different dynamic imaging parameters are obtained. Finally, the parameters of image width, ground resolution, signal-to-noise ratio, peak signal-to-noise ratio, and structural similarity are used to quantitatively evaluate and analyze the simulated images. Simulation results show that a longer exposure time of camera corresponds to a higher signal-to-noise ratio of the imaging system, larger image rotation, worse imaging quality, and smaller structural similarity. The results of this research can provide an effective reference for reducing the influence of image-rotation and improving the image quality of the camera in the future design of multiple dynamic imaging modes.

Key words imaging systems; space optics; dynamic imaging; image rotation; peak signal-to-noise ratio; structural similarity; exposure time

OCIS codes 110.2960; 350.6090; 100.1160

收稿日期: 2020-06-02; 修回日期: 2020-07-06; 录用日期: 2020-07-15

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61705222)、科技部国家重点研发计划(SQ2016YFB0501202)

* E-mail: yangxiubin@ciomp.ac.cn

1 引 言

航天相机成像技术是一种不可缺少的重要信息获取手段,是未来军事侦察、地质勘探及气象预测等领域的重点研究方向。传统的航天相机采用静态推扫成像方式,为获得高质量的遥感图像,常使用TDICCD相机进行多级积分成像。根据TDICCD相机的成像原理,需要保证像移速度与电荷转移速度大小和方向相匹配,任何的失配将会使成像调制传递函数下降,图像变得模糊,且成像过程中的电荷多次转移又放大了成像噪声^[1-3],进一步加快了成像质量的退化^[4-6]。

相较于传统静态推扫成像技术,现有航天面阵CMOS新型动态画幅成像模式曝光时间短、集成度高、成本更低,且灵敏度更优的全局快门式面阵CMOS相机不仅可以满足高分辨率和大幅宽的成像需求,还可以瞬时获取单帧图像,在空间动态光学成像上拥有更好的适用性^[7]。但是,在CMOS相机大姿态角动态画幅成像过程中会存在像旋的问题,导致图像畸变、信噪比下降,严重影响成像的质量^[8-9]。针对成像过程中的像旋问题^[10-11],杨雪等^[12]基于像旋检测光路的布置原理,在机械结构优化上解决了像旋精度的补偿;王梅竹等^[13]通过研究电机转角原理,提出一种静态图像消旋算法,实现了图像中像旋的矫正;蒋估松等^[14]从现有装配误差引起的像旋条件出发,选取互相关因子算法作为图像

的稳像算法,提高了图像的稳像精度,减小像旋引起的图像平移及旋转程度。上述学者均从不同方面对像旋误差提出了相应的补偿方案,但都未对航天CMOS相机成像运动特性进行分析,其中成像姿态角大小、探测器曝光时间长度等引起的像旋对图像的影响程度尤其重要。

本文首先分析动态成像过程中像旋的产生原理,建立一种静态影像与动态漂移间的融合模型^[15];然后提出一种动态图像融合的仿真方法,建立一种航天面阵CMOS相机动态画幅成像瞬时影像分析模型^[16-18],计算了模拟图像的峰值信噪比(PSNR)与结构相似性(SSIM)指标,评估了动态成像像旋影响下的图像质量。

2 面阵 CMOS 相机动态画幅成像过程分析

2.1 动态成像过程的矢量分解与动态融合

航天面阵CMOS相机在动态成像过程中,多种动态成像因素的耦合产生的动态扰动会引起像面上各向异性的像旋。为简化计算与分析过程,传统的静态成像分析会忽略和限制像面成像单元间微弱运动状态的差异,驱使其在微观上表现为各向同性。但在实际的动态光学成像过程中,成像单元间运动状态显著的差异往往难以忽略,具有各向异性运动状态的成像单元将导致图像产生不均匀的模糊和不规则的扭曲,如图1所示。

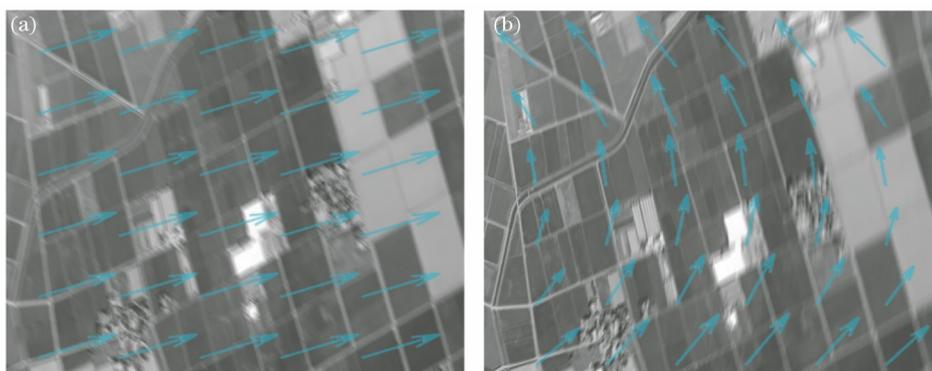


图1 像面成像单元中像的运动状态。(a)成像单元状态具有各向同性;(b)成像单元状态具有各向异性

Fig. 1 Motion state of image in image plane imaging unit. (a) State of imaging units is isotropic;

(b) state of imaging units is anisotropic

图像中的像旋影响表现为图像的不均匀模糊,其实质为各成像单元各向异性的“漂移”运动,在动态成像中表现为各向异性,在静态成像中表现为各向同性。由于动态成像过程中各成像单元的运动状态彼此相互独立同时又存在一定近似的连续关系,

基于矢量分解原理,将复杂的动态成像模型简化为同模型下静态成像系统的像移矢量及相应的动态漂移矢量,实现动态成像过程中的像旋分解。具体步骤为:首先离散化连续的动态成像过程,建立面阵CMOS相机的瞬时静态成像模型,计算静态模型下

的成像结果;然后结合动态成像参数,依据光线追迹原理,建立对应的瞬时动态漂移模型,分析动态过程下的漂移结果;最后将两者结果叠加,完成对动态成像过程中的影像仿真,定量分析模拟影像的成像质量,以此实现完整的像旋分析过程。

航天面阵 CMOS 相机动态画幅成像过程模型如图 2 所示,在相机沿轨平动并伴随有自旋运动的模型下,传统的静态分析方法难以对时间 T 内相机的运动进行跟踪分析。为简化相机的运动模型,结合微积分思想,将时间 T 无限分割至无穷小,使每一段时间都能视为一个瞬时时刻状态,如图 2 中 $T_0 \sim T_4$ 时刻,对它们都可进行动态的瞬时分析,最大限度地简化分析难度。

2.2 动态过程模型建立与分析

2.2.1 动态过程模型的建立

选取便于分析的相机相面法线方向垂直于轨道方向的瞬时时刻,建立出如图 3 所示的相机动态成像过程中的静态模型。其中, H 为面阵 CMOS 相机的轨道高度(点 P 与点 O 之间), H_i 为成像区域中心到面阵 CMOS 相机的距离(点 O' 与点 O 之间)。当成像区域为星下点成像区域时,有 $H_i = H$;

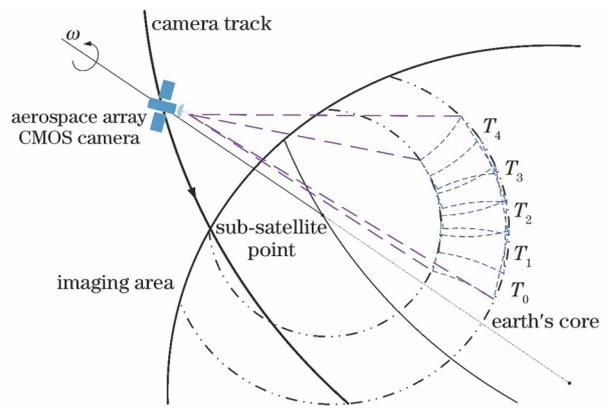


图 2 相机动态画幅成像过程的瞬时分解

Fig. 2 Instantaneous decomposition of camera dynamic format imaging process

$\angle OPO' = \eta$ 为相机的侧摆角,即相机的瞬时姿态角; $\angle OPL$ 、 $\angle O'PL'$ 为相机垂轨方向上的半视场角, $\angle OPM$ 、 $\angle O'PM'$ 为相机沿轨方向上的半视场角,且恒有 $\angle OPL = \angle O'PL'$ 、 $\angle O'PM' = \angle OPM$ 。在相机以一定姿态角成像时,相机姿态角 η 与地球曲率的存在会使实际地面成像区域变成一个近似等腰梯形的封闭图形 $A'B'C'D'$,成像区域的宽度 W (点 N' 和点 L' 之间)可表示为

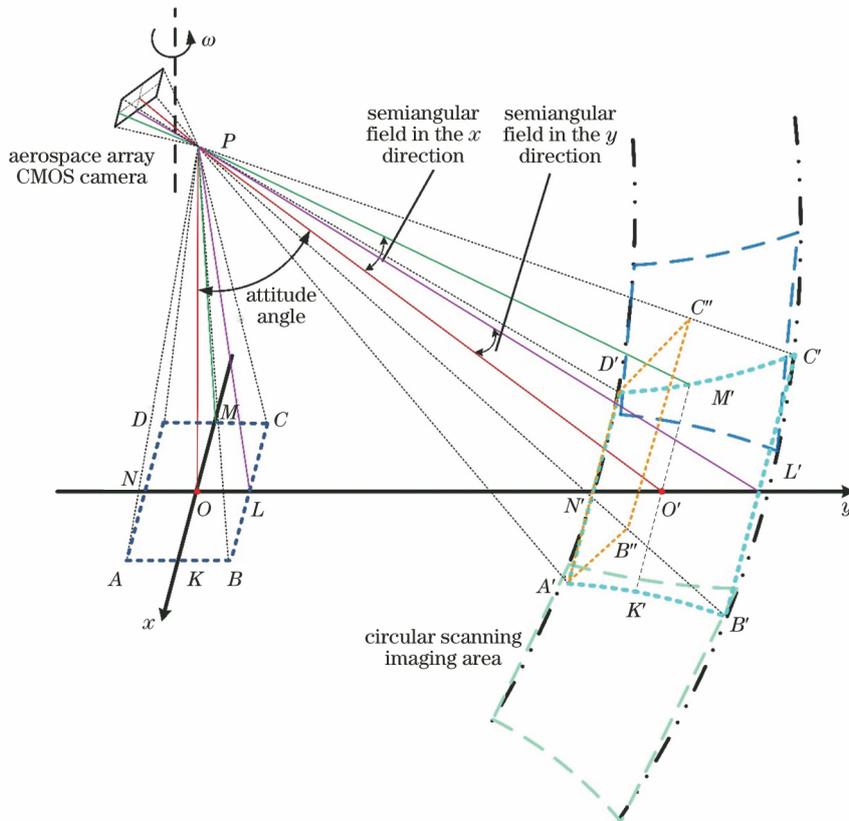


图 3 相机动态成像过程中的静态模型

Fig. 3 Static model in camera dynamic imaging process

$$\begin{cases} l_{ON'} = H \cdot \tan(\eta - \angle O'PN') \\ l_{OL'} = H \cdot \tan(\eta + \angle O'PL') \end{cases}, \quad (1)$$

$$W = l_{OL'} - l_{ON'}. \quad (2)$$

根据视场角不变原则,成像区域的短、长边界

$l_{A'D'}$ 与 $l_{B'C'}$ 可分别表示为

$$l_{A'D'} = 2 \tan \angle N'PD' \cdot H / \cos(\eta - \angle O'PN'), \quad (3)$$

$$l_{B'C'} = 2 \tan \angle L'PC' \cdot H / \cos(\eta + \angle O'PL'). \quad (4)$$

以星下点 O 为坐标原点,沿轨方向为 x 轴正方向,垂轨方向为 y 轴正方向构建右手坐标系,根据(3)、(4)式,得剩余成像区域边界的表达式为

$$\sqrt{(y^2 + H^2)} \cdot \tan \angle O'PM' = |x|. \quad (5)$$

2.2.2 动态成像过程中的动态漂移

在相机动态成像过程中,动态漂移主要有三个来源,一是相机平动前进,二是地球自转,三是相机自旋。当曝光时间较短时,相机前进与地球自转运动对相机成像结果的各向异性影响程度远小于相机自旋运动,故实际计算过程中在误差允许的范围内通常仅考虑相机自旋运动产生的各向异性的动态漂移。

根据图3所示的静态模型,当相机沿地球纬线由北向南飞行,自旋角速度为 ω 时,建立以星下点 O 为坐标原点,沿轨方向为 x 轴正方向,垂轨方向为 y 轴正方向的右手坐标系。用 (x, y) 表示成像区域中的地物单元,取相机自旋产生的地物单元旋动速度 v_r ,则方向垂直于星下点的连线与 x 轴正方向的夹角 θ_r 和速度大小可以表示为

$$\theta_r = \frac{\pi}{2} + \arctan \frac{y}{x}, \quad (6)$$

$$|v_r| = \omega \cdot \sqrt{x^2 + y^2}. \quad (7)$$

2.2.3 瞬时静态与动态漂移过程的叠加融合

根据动态成像过程的实施步骤,在对动态过程进行动态融合前需要首先计算静态模型下的成像结果,需使用图像的重采集操作对静态成像的结果进行提取,如图4所示。

在成像单元重采集过程中,设成像单元尺寸为 a ,成像单元在沿轨方向上有 M 行,垂轨方向上有 N 行,相机的焦距为 f 。根据相机像面特点,以像面中心点为参考原点,相机沿轨前进的反方向为 x 轴正方向,垂轨方向为 y 方向构建左手坐标系,则在像面上坐标为 (X, Y) 的像元对应的沿轨方向上的视场角 β 和垂轨方向上的视场角 φ 可分别表示为

$$\begin{cases} \tan \beta = \frac{\left(X - \frac{M}{2}\right) \cdot a}{f} \\ \tan \varphi = \frac{\left(Y - \frac{N}{2}\right) \cdot a}{f} \end{cases}. \quad (8)$$

根据成像系统的视场角不变特性,可以计算出该成像单元对应的地物单元坐标 (x, y) ,即

$$\begin{cases} x = \frac{H}{\cos(\eta + \varphi)} \cdot \tan \beta \\ y = H \cdot \tan(\eta + \varphi) \end{cases}. \quad (9)$$

(9)式反映成像单元与地物单元的映射关系,根据映射关系从地物成像区域中进行成像单元的重采集,得到静态成像模型的计算结果。

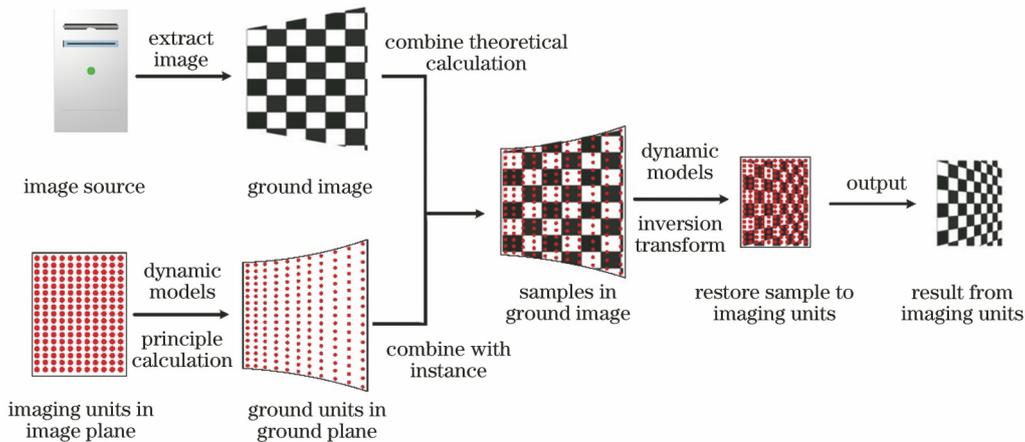


图4 成像单元的重采集

Fig. 4 Reacquisition of imaging units

对于动态漂移结果,设相机的曝光时间为 t ,则地物单元 (x, y) 处瞬时平动速度 v 引入的像旋矢量

大小可表示为 $C = v \cdot t$,与 x 轴正方向的夹角为 θ 。在图像结果中,成像单元的像旋矢量代表成像单元

内像的“漂移”方向和大小,则地物单元 (x, y) “漂移”后的位置 (x', y') 为

$$\begin{cases} x' = x + C \cdot \cos \theta \\ y' = y + C \cdot \sin \theta \end{cases} \quad (10)$$

则地物单元 (x, y) 处最终的图像像素灰度值 M_{xy} 可表示为

$$M_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i \cdot M_i}{\sum_{i=1}^n d_i}, \quad (11)$$

式中: n 为漂移影响到的地物单元个数; M_i 为受影响的地物单元的灰度值; d_i 为受影响的地物单元到漂移轨迹的距离。由(11)式可以计算出成像单元上每一点的动态漂移影响,结合静态成像模型的重采集结果,可以计算得到最终的动态融合图像结果。

3 仿真与分析

以实际航天遥感影像的仿真模拟结果来说明动态成像的矢量分解与动态融合过程,并计算结果图像的峰值信噪比与结构相似性作为分析依据。仿真模拟中,选取大小为 $3000 \text{ pixel} \times 2122 \text{ pixel}$ 的航天遥感影像作为原始图像,相机为全局快门式面阵CMOS相机,焦距为 0.5 m ,像面成像单元选取的规格为 1200×1500 个,波长为 $400 \sim 1000 \text{ nm}$,相机系统 F 数为 5.8 ,透过率为 0.8 ,相机的轨道高度取 500 km ,地球半径取 6400 km ,相机的自旋角速度取 $5.7358 \text{ (}^\circ\text{)/s}$,相机像面上成像单元的尺寸取 $4 \text{ }\mu\text{m}$ 。

3.1 动态过程模型建立与分析

图像地面分辨率是遥感影像重要参数之一,从侧面反映了遥感影像的成像精度与成像幅宽。相机像面成像单元数目一定时,地面像元分辨率数值越大,成像区域越大,空间分辨率越低。常规空间相机地面分辨率的计算公式为

$$R_{\text{GSD}} = \frac{a \times L}{f}, \quad (12)$$

式中: L 为地面目标与相机间距离。依据图3所示的静态模型,实际面阵CMOS相机动态画幅成像的地面分辨率会受相机姿态角 η 的影响而发生变化,可表示为

$$R_{\text{GSD}} = \frac{a \times L}{f \times \cos \alpha}, \quad (13)$$

$$\alpha = \pi - \arcsin \left[\left(1 + \frac{H}{R} \right) \times \sin \eta \right], \quad (14)$$

式中: α 为相机像面与地面的夹角; R 为地球半径。计算得到每一点对应的地面分辨率 $R_{\text{GSD},xy}$ 为

$$R_{\text{GSD},xy} = \sqrt{R_{\text{GSD},x} \times R_{\text{GSD},y}}, \quad (15)$$

式中: $R_{\text{GSD},x}$ 、 $R_{\text{GSD},y}$ 分别为相机沿轨方向、垂轨方向的地面分辨率。

模型中星下点位置确定后,计算成像模型中每一个地物像元对应的地面分辨率并绘制地面分辨率等值线,如图5所示。根据(15)式,模型运动模式的旋转对称性使得等值线分布表现为以星下点为圆心的同心状分布,依据成像模型,在图5中分别标示出瞬时姿态角分别为 $25^\circ, 35^\circ, 45^\circ$ 时成像区域的相对位置。

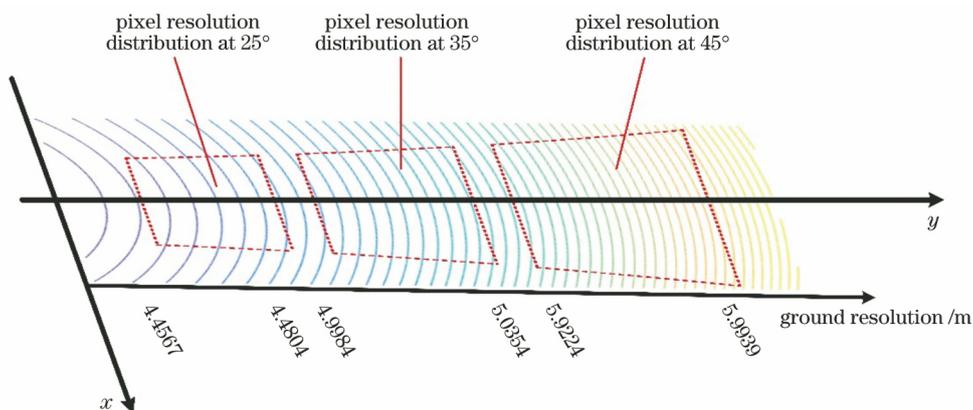


图5 地面分辨率等值线分布图

Fig. 5 Contour distribution map of ground resolution Reacquisition of imaging units

为直观表现不同动态瞬时姿态角下地面分辨率差异带来的成像结果差异,仿真过程中设置不同星下点坐标,对同一区域进行成像仿真模拟,得到动态

瞬时姿态角分别为 $25^\circ, 35^\circ, 45^\circ$ 时的成像仿真结果,如图6所示。将成像结果绘制于同一图像中,得到不同动态瞬时姿态角下的成像区域差异,如图7所



图 6 不同动态瞬时姿态角下的静态成像模拟结果。(a) 25°; (b) 35°; (c) 45°

Fig. 6 Simulation results of static imaging with different dynamic instantaneous attitude angles. (a) 25°; (b) 35°; (c) 45°

示,其中 25°姿态角对应最内侧成像区域,45°姿态角对应整幅图像的成像区域。

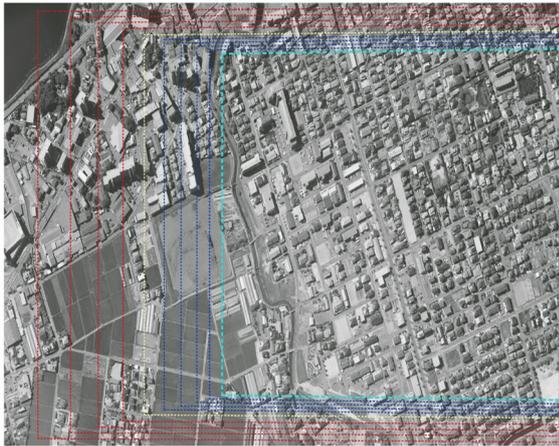


图 7 成像区域的比较

Fig. 7 Imaging area comparison

3.2 不同曝光时间下各向异性的动态漂移融合模拟

相较于各项异性的动态漂移,各项同性的动态漂移对图像的影响表现为静态成像下整体单方向均匀的模糊,并不能表现为动态运动中复杂的漂移,故在模拟仿真中仅模拟各项异性的动态漂移产生的影响。

空间中相机绕地球沿轨平动,引入的动态漂移速度在全成像区域中是各向同性的。地球自转引入的动态漂移速度与成像区域的纬度有关,根据图 3 所示的模型计算,在 45°瞬时姿态角下,视场角为 15°的空间相机成像区域中能够引入的最大漂移速度差为 13.3910 m/s,当曝光时间为 10 ms 时,实际在成像单元上产生的漂移差为 0.13391 μm ,不会对成像单元产生实质性影响,即地球自转引入的漂移速度在全成像区域中也可认为是各项同性的。由此,在各向异性的动态漂移融合模拟中,可以忽略相机平动与地球自转带来的影响。

根据所提成像过程动态融合方法,选取图 6 中动态瞬时姿态角为 25°与 45°的仿真图像作为静态成像结果并进行动态漂移融合模拟。取曝光时间为

0.01~10.00 ms,进行动态漂移的融合模拟仿真,同时计算成像过程中成像系统的信噪比(SNR)。图 8 和图 9 分别表示当动态瞬时姿态角为 25°和 45°时,曝光时间为 0.01,0.10,1.00,10.00 ms 的模拟结果。

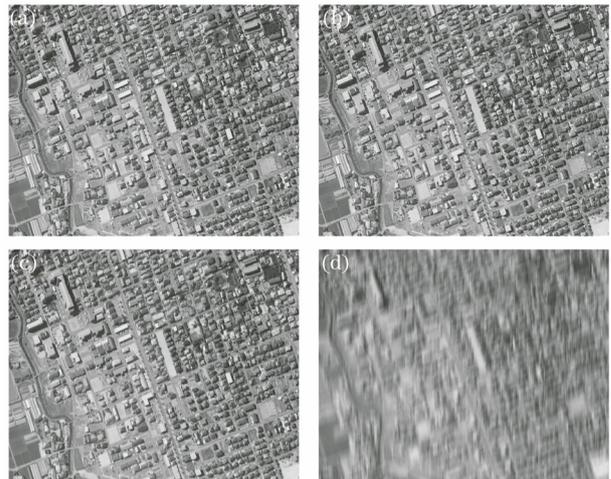


图 8 25°下不同曝光时间的成像模拟结果。(a) 0.01 ms; (b) 0.10 ms; (c) 1.00 ms; (d) 10.00 ms

Fig. 8 Imaging simulation results of different exposure time at 25°. (a) 0.01 ms; (b) 0.10 ms; (c) 1.00 ms; (d) 10.00 ms

记录所有曝光时间下动态漂移融合的结果,分别以图 6(a)和图 6(c)作为参考图像,计算得到仿真结果的峰值信噪比与结构相似性的变化趋势如图 10 所示。

除结果图像的峰值信噪比与结构相似性外,成像系统信噪比也受曝光时间长短的限制,会直接影响到相机成像系统中能量的大小,间接影响到相机成像的质量^[19]。在太阳高度角为 30°、地表反射率为 0.05 的条件下,根据模型中的相机参数,计算得到成像系统信噪比的变化趋势,如图 11 所示。

3.3 仿真结果与分析

分别记录图 9 与图 10 中模拟仿真的数据结果,结果如表 1 所示。

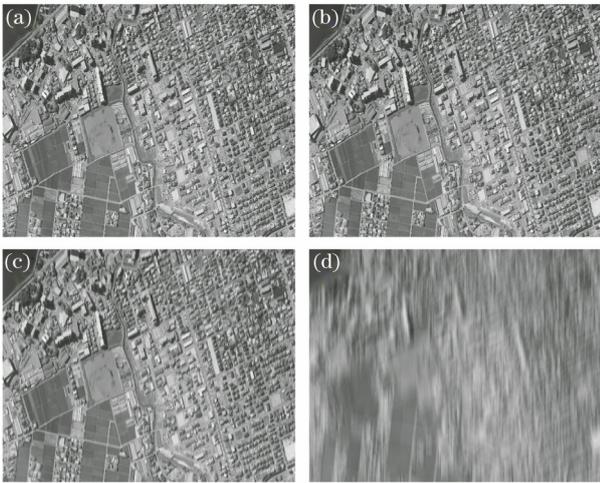


图 9 45°下不同曝光时间的成像模拟结果。(a) 0.01 ms; (b) 0.10 ms; (c) 1.00 ms; (d) 10.00 ms

Fig. 9 Imaging simulation results of different exposure time at 45°. (a) 0.01 ms; (b) 0.10 ms; (c) 1.00 ms; (d) 10.00 ms

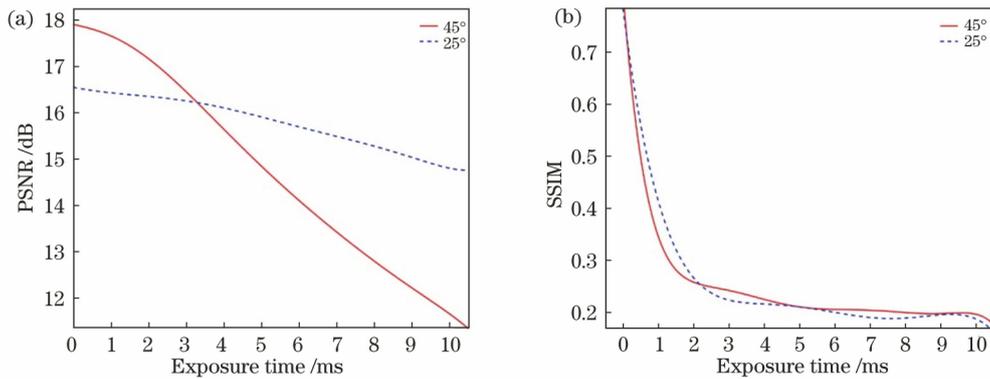


图 10 不同模拟结果的 PSNR 和 SSIM 的变化趋势。(a) PSNR; (b) SSIM

Fig. 10 Change trend of PSNR and SSIM of different simulation results. (a) PSNR; (b) SSIM

表 1 动态瞬时姿态角为 25°与 45°下,不同曝光时间的模拟结果

Table 1 Simulation results of different exposure time at dynamic instantaneous attitude angles of 25° and 45°

Parameter	25°				45°			
	0.01	0.10	1.00	10.00	0.01	0.10	1.00	10.00
Exposure time /ms	0.01	0.10	1.00	10.00	0.01	0.10	1.00	10.00
Imaging width /pixel		1523				2501		
Inside edge length /pixel		1100				1406		
Outside edge length /pixel		1106				1422		
Optical axis ground resolution /m		4.4685				5.9580		
Difference in ground resolution /m		0.0267				0.1142		
SNR /dB	21.3817	31.4525	41.4596	51.4604	21.3817	31.4525	41.4596	51.4604
PSNR /dB	16.5286	16.5280	16.4676	14.7837	17.8860	17.9265	17.7009	11.6605
SSIM	0.7259	0.7257	0.4048	0.1897	0.7562	0.7346	0.3521	0.1972

相机在高度为 500 km 轨道、自旋角速度为 5.7358 (°)/s 下进行动态成像过程时有如下结果。

1) 在静态成像模型下,成像区域随动态瞬时姿态角的增大而显著增大,如图 7 所示,且在垂轨方向上的图像幅宽增长幅度大于沿轨方向。

2) 根据(12)、(13)式可知,地面像元分辨率分布只与相机的星下点位置、相机焦距、成像单元尺寸及相机高度相关。图 5 地面分辨率分布趋势说明,动态瞬时姿态角越大,距离星下点位置越远,成像区域中地面分辨率变化越快。当动态瞬时姿态角从 25°变为 45°时,光轴中心的地面分辨率大小由 4.4685 m 变为 5.9580 m,地面像元分辨率差从 0.0237 m 变为 0.0715 m。

3) 相机动态瞬时姿态角不变,相机曝光时间的增加会提高成像系统的信噪比,但图像的成像质量会随相机曝光时间的增加而下降。当曝光时间从 0.01 ms 增加到 10.00 ms 时,成像系统信噪比由

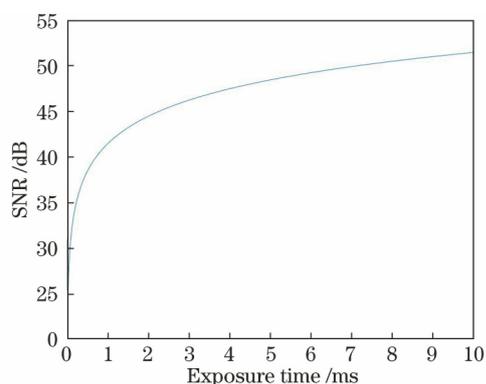


图 11 成像系统 SNR 的变化趋势图

Fig. 11 Change trend of SNR of imaging system

21.3817 dB 上升到 51.4604 dB。在 25° 动态瞬时姿态角下, 图像的峰值信噪比从 16.5286 dB 下降到 14.7837 dB, 结构相似性从 0.7259 下降到 0.1897; 在 45° 动态瞬时姿态角下, 图像的峰值信噪比从 17.8860 dB 下降到 11.6605 dB, 结构相似性从 0.7562 下降到 0.1972。

4) 相机动态瞬时姿态角增大时, 像旋对成像质量的影响程度加重。当曝光时间从 0.01 ms 增加到 10.00 ms 时, 25° 姿态角下的峰值信噪比降低了 1.7449 dB, 结构相似性下降了 0.5362, 45° 姿态角下的峰值信噪比降低了 6.2255 dB, 结构相似性下降了 0.5590。

仿真结果表明, 动态瞬时姿态角的增大能够让相机得到更宽的成像幅宽, 实现相机的大幅宽成像, 但增大的幅宽也会增加图像中地面分辨率的变化程度, 在成像结果中引入更大的不均匀的图像畸变压缩, 进一步放大动态过程中像旋产生的模糊影响, 降低了成像质量。

相机的曝光时间长短决定了相机动态成像过程中像旋的影响程度, 曝光时间越长, 曝光时间内积累的像旋越大, 成像结果受影响的程度越大, 成像质量下降越严重。若要进一步追求更好的动态成像质量, 需在确定相机动态瞬时姿态角大小后对相机的曝光时间加以限制, 在技术条件和误差允许的前提下尽可能减短相机的曝光时间, 同时, 还需要结合成像系统信噪比约束, 适当选取曝光时间, 防止相机系统能量不足。

4 结 论

基于面阵 CMOS 相机动态画幅成像模型和动态成像理论, 对相机动态成像过程进行分解, 分别建立了相机静态成像模型与动态漂移模型, 并对两部

分进行融合仿真。定量分析了不同动态瞬时姿态角下静态模型的静态影响与不同动态像旋对成像结果的动态影响。在相机动态画幅成像过程中, 动态瞬时姿态角越小, 曝光时间越短, 地面分辨率越小, 成像结果的峰值信噪比和结构相似性越高, 但成像幅宽越低, 成像系统信噪比越低, 成像系统中能量越低。因此, 为获得高质量的成像结果, 需要综合考虑相机成像过程中动态瞬时姿态角与曝光时间。

参 考 文 献

- [1] Yang X B, He X J, Zhang L, et al. Effect and simulation of the deviant angle error on TDI CCD cameras image [J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(11): 45-50, 56.
杨秀彬, 贺小军, 张刘, 等. 偏流角误差对 TDI CCD 相机成像的影响与仿真[J]. 光电工程, 2008, 35(11): 45-50, 56.
- [2] Yue Q X, Qiu Z G, Jia Y H. Impact of TDI CCD camera dynamic imaging on geometric quality by mathematic simulation[J]. Science of Surveying and Mapping, 2012, 37(3): 14-17.
岳庆兴, 邱振戈, 贾永红. TDI CCD 相机动态成像对几何质量的影响研究[J]. 测绘科学, 2012, 37(3): 14-17.
- [3] Lin J M, Xing M L, Sha D G, et al. Distortion measurement of CCD imaging system with short focal length and large-field objective[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2005, 43(10): 1137-1144.
- [4] Zhao H J, Shang H, Jia G R. Simulation of remote sensing imaging motion blur based on image motion vector field[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2014, 8(1): 083539.
- [5] Olson G G. Image motion compensation with frame transfer CCDs[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4567: 153-160.
- [6] Börner A, Wiest L, Keller P, et al. SENSOR: a tool for the simulation of hyperspectral remote sensing systems[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2001, 55(5/6): 299-312.
- [7] Li Y L. Analysis of camera CCD and CMOS key technology[J]. China Cable Television, 2019(6): 630-633.
李育林. 摄像机 CCD 与 CMOS 关键技术分析[J]. 中国有线电视, 2019(6): 630-633.
- [8] Xiahou Y T. High-speed CMOS camera driver design and optical image preprocessing[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018: 41-42.
夏侯耀涛. 高速 CMOS 相机驱动设计及光学图像预处理[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018: 41-42.

- [9] Luo B, Yan L, Yang F X. Research of noise suppression for CMOS image sensor [C]//2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, March 13-14, 2010, Changsha, China. New York: IEEE Press, 2010: 1100-1103.
- [10] Wang S K, Guo J J, W J Z. Research on image processing algorithms of image stabilization testing for sighting telescope based on cross lines[C]//2009 2nd International Congress on Image and Signal Processing, October 17-19, 2009, Tianjin, China. New York: IEEE Press, 2009.
- [11] Tan C, Ding L. Design and simulation of image compensation control system [M]//Wang W. Mechatronics and automatic control systems. Lecture notes in electrical engineering. Lecture notes in electrical engineering. Cham: Springer, 2013, 237: 609-616.
- [12] Yang X, He X, Zhang X H, et al. Design of optical target simulation device for high frequency and image rotation [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 41(3): 10-15.
杨雪, 何煦, 张晓辉, 等. 高频像旋光学目标模拟装置结构设计[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2018, 41(3): 10-15.
- [13] Wang M Z, Huang X X, Feng Q. Elimination method of image rotation for geostationary radiometer and its verification method [J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(5): 170725.
王梅竹, 黄小仙, 冯旗. 静轨图像消旋算法及其验证方法[J]. 光电工程, 2018, 45(5): 170725.
- [14] Jiang J S, Jiang A M. The influence of image rotation on accuracy of stabilization system of AIMS solar telescope [J]. Astronomical Research and Technology, 2020, 17(3): 376-383.
蒋佶松, 姜爱民. AIMS 太阳望远镜中像旋对稳像精度的影响分析[J]. 天文研究与技术, 2020, 17(3): 376-383.
- [15] Brostow G J, Essa I. Image-based motion blur for stop motion animation[C]//Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques - SIGGRAPH'01, August 12-17, 2001, Los Angeles, California, USA. New York: ACM Press, 2001: 561-566.
- [16] Cao X B, Wang F, Li H Y. Optical satellite ring scanning ultra-wide imaging method; CN108151711A [P]. 2018-06-12.
曹喜滨, 王峰, 李化义. 一种光学卫星环扫超宽幅成像方法: CN108151711A[P]. 2018-06-12.
- [17] Song M Z, Qu H S, Zhang G X, et al. Design of aerospace camera circular scanning imaging model[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(7): 0718001.
宋明珠, 曲宏松, 张贵祥, 等. 航天相机环扫成像模式设计[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(7): 0718001.
- [18] Xu C, Jin G, Yang X B, et al. Inversion restoring algorithm for whiskbroom scanning images synthesized with deep convolutional neural network [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1228001.
徐超, 金光, 杨秀彬, 等. 综合深度卷积神经网络的摆扫影像反演恢复算法[J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1228001.
- [19] Zhang Y, Niu Y X, Yang L, et al. Analysis and study on detection capability of satellite photoelectric imaging system [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0111004.
张颖, 牛燕雄, 杨露, 等. 星载光电成像系统探测能力分析与研究[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0111004.