

面向卫星动中成像模式的地面实验系统

杨沐*, 程少园, 崔程光, 唐宏晨, 朱志豪

北京空间机电研究所, 北京 100094

摘要 动中成像模式可实现卫星在大角度快速机动过程中成像, 满足遥感观测多样化、定制化、精细化需求。分析了动中成像地面实验系统的基本原理, 并在实验室搭建了一套面向动中成像模式的地面实验验证系统。该系统采用高精度、高稳定的动态气浮靶标和基于外触发信号的相机积分时间调整方法。研究了成像质量和光强的关系以及成像质量和相机探测器积分级数、卫星机动角速度的关系, 开展了自定义运动曲线的动中成像实验。结果表明, 在相机探测器线性区内, 不同机动角速度与探测器积分级数获取的图像动态调制传递函数(MTF)值的范围为 0.0918~0.1054, 满足工程应用(0.1 附近)的要求, 且 MTF 值与机动角速度、探测器级数无关。动中成像实验中系统运行稳定, 动态 MTF 值在 0.1015±0.0098 之间。

关键词 成像系统; 动中成像; 探测器; 积分时间; 气浮靶标; 触发信号

中图分类号 TP706

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0428002

Ground Experimental System for Satellite Dynamic Imaging Mode

Yang Mu*, Cheng Shaoyuan, Cui Chengguang, Tang Hongchen, Zhu Zhihao

Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100094, China

Abstract Satellite dynamic imaging mode can realize satellite imaging in a large-angle fast maneuvering process, meeting the diversified, customized and refined requirements of remote sensing observation. In this work, the basic principle of ground experimental system for dynamic imaging is analyzed, and a set of ground experimental verification system for dynamic imaging mode is built in the laboratory. The system uses a high-precision, high-stability dynamic air flotation target and a camera integration time adjustment method based on an external trigger signal. The relationship between the image quality and light intensity, the relationship between the image quality and the integral series of the camera detector and the maneuvering velocity of the satellite are studied. A dynamic imaging experiment with a custom motion curve is carried out. The results show that in the linear region of the camera detector, the range of the image dynamic modulation transfer function (MTF) value obtained with different maneuvering angular velocities and detector integration series is 0.0918—0.1054, which meets the requirements of engineering applications (near 0.1), and the MTF value has nothing to do with maneuvering angular velocity and detector series. In the dynamic imaging experiment, the system runs stably, and the dynamic MTF value is between 0.1015±0.0098.

Key words imaging systems; dynamic imaging; detector; integration time; air flotation target; triggered signal

OCIS codes 280.4788;120.0280;120.4640;250.0040

1 引言

遥感观测在航天侦察、灾害应急、环境监测等领

域的需求日益多样化, 为了满足用户定制化与精细化的要求, 卫星需具备更丰富的成像模式^[1-3]。

动中成像模式可实现卫星在大角度快速机动过程中

收稿日期: 2020-04-26; 修回日期: 2020-06-01; 录用日期: 2020-07-10

基金项目: 国家重点研发计划地球观测与导航重点专项(2016YFB0500802)

* E-mail: yangmu2016@126.com

的成像,提高卫星的灵活度,提升遥感载荷的观测效率,增加有效信息所占的比重,因此,得到了广泛的关注^[4-7]。

卫星成像工作模式的发展包括三个阶段:第一阶段以被动推扫成像工作模式为主,卫星在单轨中飞行时只能获取和飞行方向一致的单幅条带图像;第二阶段增加了敏捷成像工作模式,包括多条带拼接、多目标成像、立体成像等方式,在单轨中一次可对多个区域/目标或多次对同一区域/目标进行成像,但该模式下载荷只能沿飞行方向被动推扫,且需要卫星平台姿态稳定后才能开机成像;第三阶段进一步增加了动中成像工作模式,包括沿轨双向扫描成像、垂轨双向扫描成像、S型曲线成像等方式,单轨中载荷可以主动进行推扫成像,按需定制成像任务,该模式突破了被动推扫模式的限制,载荷可以在卫星平台的快速机动中进行成像,提升了遥感卫星的使用范围。

关于任务规划的研究中,Beaumet 等^[8]提出了一种基于响应/协商架构的动中成像卫星自主调度方法,其中,响应部分采用决策机制,协商部分采用迭代随机贪婪搜索算法,并在线上和线上真实场景中验证了该方法的可行性;苗悦等^[9]研究了一种基于目标等级的逐级择优在轨任务实时规划算法,可快速求解最优成像序列;王海蛟等^[10]研究了一种改进的量子遗传算法,可提高目标搜索效率,且收敛速度快、方案收益高;李志亮等^[11]研究了一种多目标离散差分进化算法,为动中成像卫星前摄式调度提供了方法支撑。关于平台姿态控制的研究中,Bronowicki^[12]提出了一种基于粘弹性材料分数导数模型的卫星隔振技术,可以将波前误差和视轴指向抖动分别控制在 ns 与 ms 量级;张伟等^[13]研究了一种将振源与载荷动静空间隔离、控制主从协同的卫星平台设计方法,可以有效消除平台微振动对载荷的干扰,实现了卫星的超精超稳控制;武晓雯^[14]研究了动中成像任务的姿态机动设计方法,提出了一种高精度的姿态机动设计方法,可以有效支持卫星平台的优化设计;范国伟等^[15]研究了一种通过 Legendre 伪谱法实现卫星姿态及控制力矩陀螺(CMG)群框架角速度的最优规划,并以此作为前馈控制通过非线性模型实现预测控制,以达到最优轨迹反馈跟踪的复合控制,结果表明,该方法具有较强的鲁棒性。关于载荷图像分析的研究中,Chen 等^[16]提出一种利用选区梯度信息赋予特征点权重的图像配准方法,结果表明,该方法的精度超过其他

常用的配准方法;吴俊等^[17]研究了动中成像模式下的成像质量,分析了良好成像质量对速高比、探测器积分级数的约束条件和参数优化的影响;薛旭成等^[18]研究了卫星平台振动造成的成像质量下降问题,分析了时间延迟积分(TDI)CCD 相机对卫星姿态稳定度的约束与轨道高度和探测器积分级数的关系;程少园等^[19]研究了动中成像的复杂成像模型,分析了不同成像条件下成像参数对信噪比和动态调制传递函数(MTF)的影响,为卫星设计提供了重要依据。但目前关于平台姿态机动与相机积分时间匹配的相关研究较少。

本文分析了动中成像地面实验系统的基本原理,搭建了一套面向动中成像模式的地面实验系统。采用高精度、高稳定的动态气浮靶标和基于外触发信号的相机积分时间调整方案,并基于自建系统研究了目标光强、探测器积分级数、姿态机动角速度等与成像质量的关系,开展了动中成像实验。结果表明,图像的动态 MTF 值可以达到 0.1,满足工程应用的要求。

2 实验原理

极轨卫星被动推扫时,相机星下点相对地物的运动速度 v_{stable} 可表示为^[20]

$$v_{\text{stable}} = \frac{\sqrt{v_s^2 + v_e^2 + 2v_s v_e \cos \delta \cos i}}{(R_e + h) \cos \alpha - \sqrt{R_e^2 - (R_e + h)^2 \sin^2 \alpha}} H, \quad (1)$$

式中, v_s 为卫星星下点相对于惯性系的速度, v_e 为地球的自转速度, R_e 为地球的半径, h 为卫星轨道的高度, H 为侧摆情况下卫星沿视轴方向至地表成像点的斜距, δ 为目标点的纬度, α 为卫星的侧摆角, i 为地球自转速度和星下点轨迹方向的夹角。可以发现,卫星侧摆时, v_{stable} 与轨道高度 h 、侧摆角度 α 、目标点纬度 δ 等因素有关。其中, $\alpha = 0^\circ$ 对应卫星无侧摆的情况。

图 1 为实验系统的原理图,由图 1(a)中的成像模型可知, v_{stable} 在相机焦面位置投影的像速度 v_{det} 为

$$v_{\text{det}} = \frac{f}{H} v_{\text{stable}}, \quad (2)$$

式中, f 为相机的等效焦距。

动中成像时,相机以角速度 ω 绕卫星本体特定中心进行姿态机动,实现主动推扫成像,星下点相对地物速度不仅和轨道高度 h 、侧摆角度 α 、目标点纬度 δ 有关,还与相机在地面的投影机动速度 v_{dy} 相关,可表示为

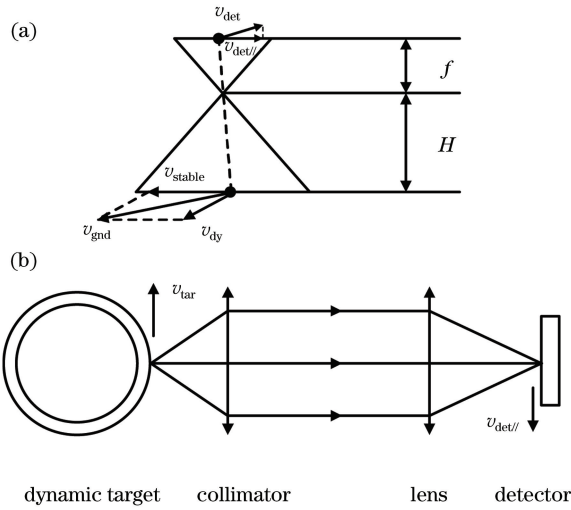


图 1 实验系统的原理图。(a)在轨成像的几何关系；
(b)俯视图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system.

(a) Geometric relationship of the on-orbit imaging;
(b) top view

$$v_{dy} = H\omega \cos \theta, \quad (3)$$

式中, θ 为卫星的姿态角。此时,星下点相对地物速度 v_{gnd} 等于卫星被动推扫时相对地物速度 v_{stable} 和卫星姿态机动时地面投影速度 v_{dy} 之和,如图 1(a) 所示,可表示为

$$v_{gnd} = v_{stable} + v_{dy}. \quad (4)$$

星下点相对地物速度在相机焦面位置投影的像速度 v_{det} 可表示为

$$v_{det} = \frac{f}{H} v_{gnd}, \quad (5)$$

式中, v_{gnd} 为星下点相对地物速度。对应 TDI 探测器的积分时间 τ 为

$$\tau = d / v_{det//}, \quad (6)$$

式中, d 为探测器的像元尺寸, $v_{det//}$ 为像速度沿探测器积分方向的投影速度。当探测器的像元尺寸 d 确定时,积分时间 τ 只与沿探测器积分方向的投影速度 $v_{det//}$ 有关。 $v_{det//}$ 可以反映卫星的飞行状态,是轨道高度 h 、侧摆角度 α 、目标点纬度 δ 、机动角速度 ω 的函数。

为模拟卫星动中成像,搭建的地面实验系统俯视图如图 1(b)所示。采用一种圆柱体动态靶标,图案分布于圆柱体靶标的外表面,靶标可绕圆柱体长轴转动。靶标图案经过平行光管准直后变为平行光,等效于靶标与相机之间的距离为无限远。由动中成像任务要求可知,相对地物速度 v_{gnd} 的大小与方向均随时间的变化而变化,由(5)式得到投影到焦

面处的像速度 v_{det} 、沿积分方向的分量 $v_{det//}$ 。动态靶标转速 ω_{tar} 与像速度分量 $v_{det//}$ 的关系为

$$\omega_{tar} = \frac{f_{para}}{f_{cam}} \frac{v_{det//}}{r}, \quad (7)$$

式中, f_{para} 为平行光管的焦距, f_{cam} 为相机的焦距, r 为动态靶标半径。改变靶标转速可以模拟卫星动中成像。此外,动中成像需要将探测器的积分时间和机动角速度(靶标转速)进行匹配,联立(6)式和(7)式,得到探测器的积分时间 τ 为

$$\tau = \frac{d}{\omega_{tar} \cdot r} \cdot \frac{f_{para}}{f_{cam}}. \quad (8)$$

实验中选中长度为 6000 mm 的平行光管,相机焦距为 4400 mm,其他相关参数如表 1 所示。

表 1 实验系统的主要参数

Table 1 Main parameters of the experimental system

Index name	Index value
Pixel size of detector/ μm	7
Focal length of camera/mm	4400
Camera aperture/mm	440
Focal length of collimator/mm	6000
Collimator aperture/mm	600
Target radius/mm	160
Spatial frequency of target pair/(lp·mm ⁻¹)	26.31
Target rotation speed/[$(^\circ) \cdot \text{s}^{-1}$]	17.9—1791.4

根据表 1 中的参数得到不同轨高下靶标转速和卫星机动角速度沿轨分量之间的关系,如图 2 所示。其中,正机动角度沿轨分量表示卫星姿态机动方向与飞行方向一致,负号表示与飞行方向相反。可以发现,靶标转速和机动角速度呈线性关系。

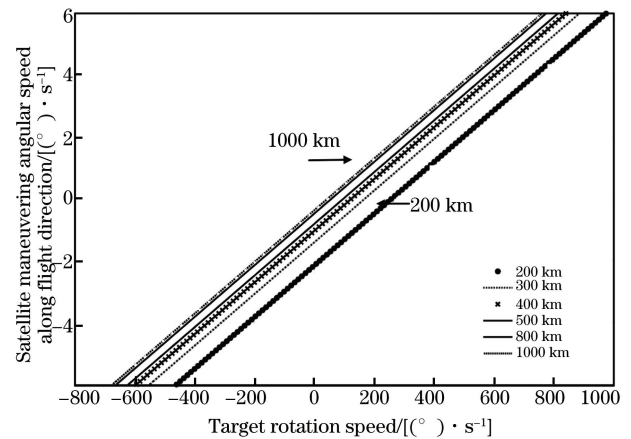


图 2 靶标转速与卫星机动角速度沿轨分量的关系

Fig. 2 Relationship between target rotation speed and satellite maneuvering angular speed along flight direction

3 实验研究

图 3 为地面实验系统框图,主要由卫星模拟部分(①和②)和地面模拟部分(③和④)组成。卫星模拟部分由平台模拟器和原型相机两部分组成,可对动态靶标图案进行成像,并对测控信号、图像信号传输进行验证。其中,原型相机主要包括综合电子模拟器(SMU)、图像处理单元(IPU)等单机;地面模拟部分由高速气浮动靶标和平行光管两部分组成,可模拟卫星动中成像时相对地物速度的变化。

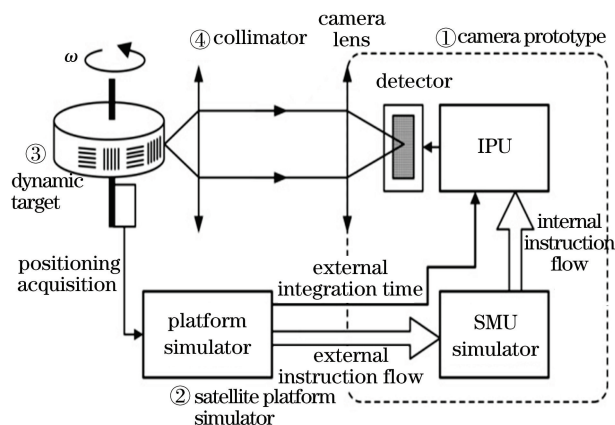


图 3 地面实验系统示意图

Fig. 3 Schematic of the ground experiment system

系统采用气浮动靶标实现高速动态成像,按照现有卫星平台最快机动角速度 $6 (^{\circ})/s$ 计算,轨道高度为 500 km,合成相对地物速度要求探测器的最大行频(不小于 250 kHz)。由(7)式得到靶标转速应大于 $812 (^{\circ})/s$,靶标的速度范围为 $17.9 \sim 1791.4 (^{\circ})/s$,满足要求。积分信号采用非平衡晶体管-晶体管逻辑(TTL)电平传输方式,由 1 根信号线和 1 根参考线组成,线缆的长度为 10 m。当相机检测到 TTL 上升沿时开始成像,积分时间的长度由 TTL 的高电平时长控制,因此,该方案具有积分时间实时响应的优点。

图 4 为动态靶标设计图案,利用条纹图像的 MTF 值对系统成像质量进行评估。靶标条纹采用光刻技术在圆柱形靶标表面制备。图 4(a)为设计示意图,图 4(b)为静态实物照片,其中,黑色部分为不透光的掩模部分,白色部分为透光的刻蚀部分。圆柱形靶标表面的图案由多个相同的靶标块组成,每个靶标块由 8×8 个子图案组成,其中,奇数行与偶数行的靶标图案相互垂直。每个子图案由 5 对黑白条纹对组成,线对宽度为 $38 \mu m$,与探测器像元尺寸相匹配。探测器的积分方向和靶标运动方向一

致,靶标奇数(1、3、5、7)行的条纹方向与运动方向垂直,实验中选取奇数行靶标图像评估成像质量。

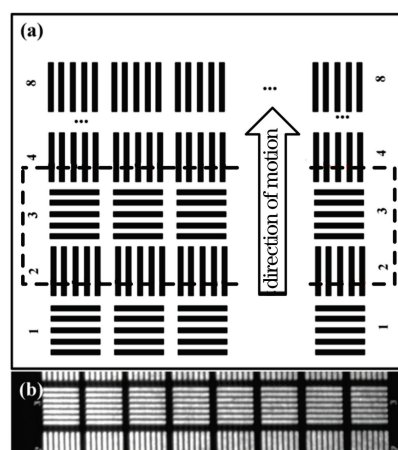


图 4 靶标静态成像。(a)靶标设计图;(b)虚线框对应的实物照片

Fig. 4 Static imaging of the target. (a) Design drawing of the target; (b) physical photo corresponding to the dotted frame

3.1 动态 MTF 与光强的关系

选定靶标转速和探测器积分级数,改变靶标的光强,以分析光强对图像动态 MTF 值的影响。图 5 为探测器积分级数为 96 级、靶标转速为 $100 (^{\circ})/s$ 时的动态 MTF 值随光强的变化曲线,可以发现,动态 MTF 值随光强呈现先上升再下降的趋势,范围为 $0.0973 \sim 0.1172$,对应探测器进入线性区。工程上一般认为动态 MTF 经验值在 0.1 左右为宜,当光强处于 $200 \sim 380$ arb. units 之间时,成像质量满足要求,线性区内光强和探测器没有明显依赖关系。由图 2 可知,当轨道长度为 500 km、靶标转速为 $100 (^{\circ})/s$ 时,对应卫星的机动角速度为 $0.033 (^{\circ})/s$ 。这表明卫星以 $0.033 (^{\circ})/s$ 的沿轨角速度、探测器级数为 96 级进行机动成像时,地面目标光强的变化会

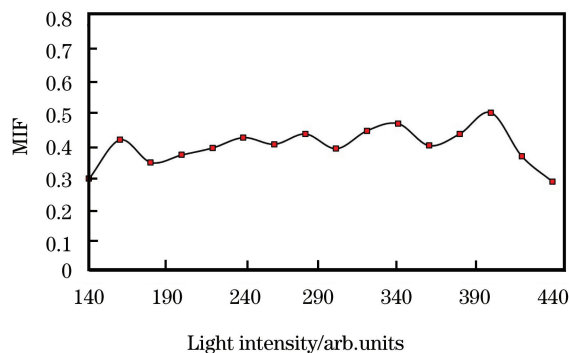


图 5 动态 MTF 与光强的关系

Fig. 5 Relationship between dynamic MTF and light intensity

影响成像质量。只有光强处于探测器线性区(200~380 arb. units)时,图像动态 MTF 值最佳,且满足工程应用的要求。

图像灰度值(DN)和探测器积分级数、探测器积分时间成正比,由(8)式可知,积分时间与靶标转速成反比,即图像 DN 与探测器的积分级数成正比,与靶标的转速成反比。表 2 为不同级数和靶标转速下探测器的线性区光强范围。可以发现,在高级数、低靶标转速参数组合下,探测器线性区左移。当级数为 128 级、转速为 130 (°)/s(沿轨角速度分量为 0.29 (°)/s)时,线性区光强的选择范围为 45~85 arb. units。反之,低级数、高转速(对应高机动角速度)情况下,线性区右移。针对不同成像目标特性和姿态任务规划,可通过更改级数的方法保证探测器处于合理的线性区内。

表 2 不同参数组合下的线性区域

Table 2 Linear regions under different parameter combinations

Speed/ [(°) · s ⁻¹]	32	64	96	128
130	180-342	90-171	60-114	45-85
170	720-798	210-399	140-266	105-199
230	780-1482	390-741	260-494	195-370
760	3960-7524	1980-3762	1320-2508	990-1881
800	4200-7980	2100-3990	1400-2660	1050-1995

3.2 动态 MTF 与积分时间和探测器积分级数的关系

选择不同级数和靶标低、中、高三转速区间,低、中、高转速区间分别为 130~170 (°)/s、170~230 (°)/s、760~800(°)/s,测量不同模式下图像的动态 MTF 情况,实验中将光强调整在探测器的线性区域内。图 6(a)为不同探测器积分级数和靶标转速下图像动态 MTF 的变化情况。靶标低、中、高转速区间对应卫星沿轨角速度的分量分别为 0.29~0.62 (°)/s、0.62~1.13 (°)/s、5.57~5.90 (°)/s。不同探测器积分级数下动态 MTF 的平均值和标准差如表 3 所示,可以发现,当光强处于线性区时,积分级数、机动速度对动态 MTF 值的影响不大;动态 MTF 值的范围为 0.0918~1.1054,其中 32、64 和 96 级图像的动态 MTF 值均大于 0.1,128 级稍低,可以满足工程应用。图 6(b)为探测器级数为 128 级,模拟沿轨机动角速度为 5.9 (°)/s 时获取的靶标图像,此时卫星沿轨方向具有很高的机动速度,明暗条纹清晰、可分辨,实测的 MTF 值为 0.1080。

这表明当地面目标光强特性在线性区内,通过(8)式的积分时间匹配,相机在姿态机动时可以保证成像质量,且整个动中成像期间 MTF 值相对稳定,满足工程应用的要求。如果目标光强超出线性区范围,可通过在轨调整积分级数的方案使光强重新回到探测器的线性区域内,以达到最优成像质量。

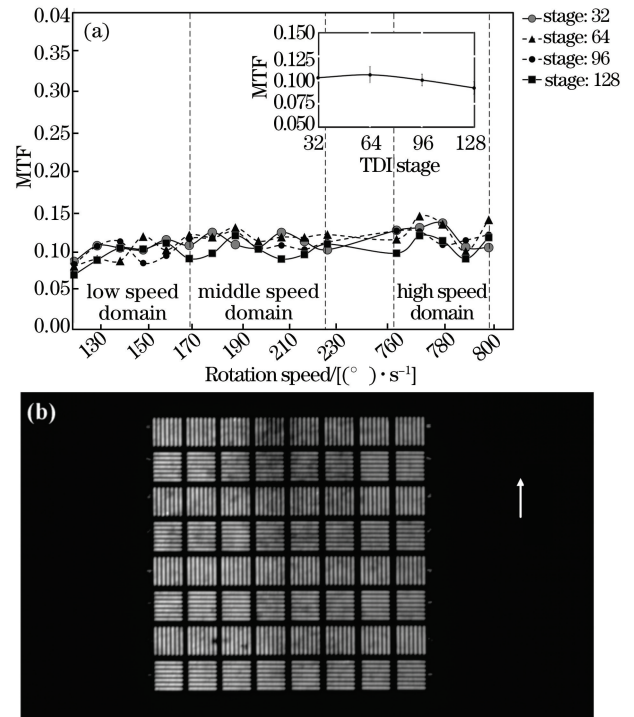


图 6 靶标动态成像。(a)动态 MTF 随靶标角速度的变化情况;(b)128 级,转速为 800 (°)/s 的动态图像
Fig. 6 Dynamic imaging of the target. (a) Change of dynamic MTF with the angular velocity of the target; (b) dynamic image with 128 levels and a rotation speed of 800 (°)/s

表 3 不同探测器积分级数下动态 MTF 的平均值和标准差
Table 3 Mean value and standard deviation value of dynamic MTF at different detector stage

Detector stage	Mean value	Standard deviation
32	0.1024	0.0120
64	0.1054	0.0173
96	0.1000	0.0124
128	0.0918	0.0128

表 3 中积分级数为 128 级时,图像平均动态 MTF 值略低于其他级数,原因是高级数下外界环境影响几率增加、参与积分的像元变多。以 128 级和 32 级为例,若采用相同的积分时间对靶标某一特定位置成像,前者需要积分 128 次,后者只需要积分 32 次,一次完整成像前者所需的时间是后者的 4

倍。假设 32 级积分时引入噪声的概率为 P , 则 128 级积分时引入噪声的概率为 $1 - (1 - P)^4$ 。如果 32 级的噪声概率为 0.5, 则 128 级的噪声概率为 0.9375, 是前者的 1.875 倍。在成像过程中, 噪声混叠到正常的有效信号中引起图像拖尾、几何畸变等现象, 导致成像质量下降。在轨对光强较弱的目标进行高机动速度成像时, 高级数需要平台对振动、温度等条件给予更严格的保障。

3.3 动中成像实验

图 7(a) 为模拟真实工况下动中成像实验中的

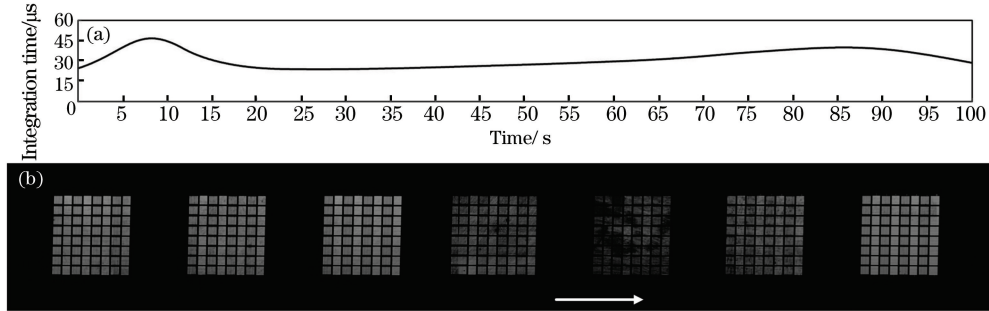


图 7 动中成像实验的结果。(a) 积分时间的变化曲线; (b) 靶标动中成像的部分图像

Fig. 7 Result of the dynamic imaging. (a) Variation curve of the integration time; (b) partial images of the target dynamic imaging

常规推扫成像中, 沿轨方向的系统 MTF 值可表示为

$$M_{\text{sys}} = M_{\text{sta}} \cdot M_{\text{m}} \cdot M_{\text{vib}} \cdot M_{\text{mov}} \cdot M_{\text{int}}, \quad (9)$$

式中, M_{sta} 为系统的静态 MTF, 实测为 0.1980, M_{m} 为平行光管和空气的影响, 为 0.998, M_{vib} 为振动影响, 为 0.962, M_{mov} 为推扫造成的像元模糊, 为 0.636, M_{int} 为积分时像元匹配精度的影响, 为 0.973。根据(9)式得到常规模式的系统 MTF 为 0.1176。动中成像时由于积分像元匹配精度下降, 系统的 MTF 退化为常规推扫时的 86.3%。垂轨方向的系统 MTF 可表示为

$$M_{\text{sys}} = M_{\text{sta}} \cdot M_{\text{m}} \cdot M_{\text{vib}} \cdot M_{\text{drift}}, \quad (10)$$

式中, M_{drift} 为偏流角影响, 实验中为靶标的像与焦面像元的错位, 为 0.998。根据(10)式得到垂轨方向的系统 MTF 值为 0.1897, 动中成像时的 MTF 相比常规成像几乎没有退化。

图 7(b) 中靶标亮度存在一定的不均匀性, 中间部分偏暗。因此, 采用固定积分级数, 中间偏暗部分对应相机的机动角速度为 0.38~0.4, 原因是卫星快速机动导致积分时间减小, 探测器接收到的光子数减少。该部分的测量平均 MTF 值为 0.1008, 可以清晰分辨靶标图像, 图像质量不受影响。

积分时间调整曲线, 卫星在轨期间完成自主前向与反向推扫。任务过程中积分时间的变化范围为 23.8~46.7 μs , 对应卫星沿轨角速度为 $-0.19 \sim 0.4$ ($^{\circ}$)/s, 靶标角速度为 73.3~143.7 ($^{\circ}$)/s。实验测得图像的沿轨动态 MTF 值为 0.1015 ± 0.0098 , 垂轨方向动态 MTF 为 0.1883 ± 0.0085 , 满足工程应用的要求。图 7(b) 为截取的部分动中成像图像, 其明暗条纹可以清晰分辨。这表明采用外触发积分时间的调整方式, 探测器积分时间与目标像速度匹配精度可达到工程应用要求。

4 结 论

从理论上分析了动中成像地面实验系统的基本原理, 并搭建了一套面向动中成像工作模式的地面成像实验系统。该系统采用高精度、高稳度动态气浮靶标和基于外触发信号的相机积分时间调整方案。动态气浮靶标转速在 17.9~1791.4 ($^{\circ}$)/s 之间可调, 靶标运动曲线可以自由设计; 外触发积分时间信号调整方案可实时更新积分时间, 保证动态靶标和探测器像元之间的准确匹配。研究了光强和动态 MTF 值的关系, 结果表明, 当级数和机动角速度一定时, 目标光强不足或者过强时会降低动态 MTF 值, 只有光强处于探测器线性区内时, 图像的 MTF 值才能保持相对稳定并满足工程应用要求, 且不同级数和机动角速度组合对应的线性区域不同; 研究了探测器积分级数、卫星机动角速度和动态 MTF 值关系, 结果表明, 当探测器处于线性区时, 不同参数组合对成像质量的影响较小, 动态 MTF 值在 0.0918~0.1054 之间, 靶标条纹清晰可辨; 自定义运动曲线的动中成像实验结果表明, 模拟卫星主动推扫与回扫工况图像的动态 MTF 值为 0.1015 ± 0.0098 , 满足工程应用要求且整个系统运行稳定, 靶标条纹清晰可辨, 相机积分时间与靶标投影匹配

准确。

为进一步提升动中成像模式的工作性能要求,后续将加强对环境变量的控制,开展探测器高积分级数下的成像性能评估,提出对平台振动、温度控制范围的要求;开展相机自主调整积分级数实验,以提升动中成像工作模式的智能性。

参 考 文 献

- [1] Xu W W, Zhang L M, Li X, et al. On-orbit radiometric calibration of high-resolution optical satellite camera based on wide dynamic targets [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1028004.
徐伟伟, 张黎明, 李鑫, 等. 基于宽动态目标的高分辨率光学卫星相机在轨辐射定标 [J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1028004.
- [2] Men H T, Li G Y, Chen J Y, et al. Refined simulation methods of laser altimetry satellite echo waveform [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0110004.
门华涛, 李国元, 陈继溢, 等. 激光测高卫星回波波形精细化模拟仿真方法研究 [J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0110004.
- [3] Lu R R, Sun H B, Fu S F, et al. Point cloud registration based satellite motion parameter identification method [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(14): 141503.
鲁荣荣, 孙海波, 付双飞, 等. 一种基于点云配准的卫星运动参数辨识方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(14): 141503.
- [4] Zhang X W, Dai J, Liu F Q. Research on working mode of remote sensing satellite with agile attitude control [J]. *Spacecraft Engineering*, 2011, 20(4): 32-38.
张新伟, 戴君, 刘付强. 敏捷遥感卫星工作模式研究 [J]. *航天器工程*, 2011, 20(4): 32-38.
- [5] Tan W, Qi W W, He H Y, et al. An on-board autofocus method for scanning agile remote sensing satellite [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(5): 0528002.
谭伟, 齐雯雯, 何红艳, 等. 一种推扫型敏捷遥感卫星上自动调焦技术 [J]. *光学学报*, 2020, 40(5): 0528002.
- [6] Liu Y L, Cao D J. Analysis method on effect of jitter on high resolution agile satellite imaging [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2014, 35(2): 46-53.
刘彦丽, 曹东晶. 高分辨率敏捷卫星颤振对成像的影响分析方法 [J]. *航天返回与遥感*, 2014, 35(2): 46-53.
- [7] Yang M, Cheng S Y, Yu F, et al. Autonomous matching test system for integral time of space camera in super-agility dynamic imaging: CN108896279B [P]. 2019-08-09.
杨沐, 程少园, 于飞, 等. 一种超敏捷动中成像空间相机积分时间自主匹配测试系统: CN108896279B [P]. 2019-08-09.
- [8] Beaumet G, Verfaillie G, Charneau M C. Feasibility of autonomous decision making on board an agile earth-observing satellite [J]. *Computational Intelligence*, 2011, 27(1): 123-139.
- [9] Miao Y, Wang F. Optimize-by-priority on-orbit task real-time planning for agile imaging satellite [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(1): 150-160.
苗悦, 王峰. 敏捷成像卫星“逐级择优”在轨任务实时规划 [J]. *光学精密工程*, 2018, 26(1): 150-160.
- [10] Wang H J, He H, Yang Z. Scheduling of agile satellites based on an improved quantum genetic algorithm [J]. *Journal of Astronautics*, 2018, 39(11): 1266-1274.
王海蛟, 贺欢, 杨震. 敏捷成像卫星调度的改进量子遗传算法 [J]. *宇航学报*, 2018, 39(11): 1266-1274.
- [11] Li Z L, Li X J, Zhang D L. Proactive scheduling of agile imaging satellite based on improved differential evolution algorithm [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2018, 40(2): 353-359.
李志亮, 李小将, 张东来. 基于改进 DE 算法的敏捷成像卫星前摄式调度 [J]. *系统工程与电子技术*, 2018, 40(2): 353-359.
- [12] Bronowicki A J. Vibration isolator for large space telescopes [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2006, 43(1): 45-53.
- [13] Zhang W, Zhao Y B, Liao H, et al. Design of an active-quiet isolated and master-slave coordination controlled dual-super satellite platform [J]. *Aerospace Shanghai*, 2014, 31(5): 7-11, 30.
张伟, 赵艳彬, 廖鹤, 等. 动静隔离、主从协同控制双超卫星平台设计 [J]. *上海航天*, 2014, 31(5): 7-11, 30.
- [14] Wu X W. Research on attitude maneuvering planning method of agile satellite [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
武晓雯. 敏捷卫星姿态机动规划方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- [15] Fan G W, Chang L, Yang X B, et al. Control

- strategy of hybrid actuator for novel imaging modes of agile satellites[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(10): 1858-1868.
- 范国伟, 常琳, 杨秀彬, 等. 面向新颖成像模式敏捷卫星的联合执行机构控制方法[J]. *自动化学报*, 2017, 43(10): 1858-1868.
- [16] Chen J W, Feng H J, Pan K C, et al. An optimization method for registration and mosaicking of remote sensing images [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, 125(2): 697-703.
- [17] Wu J, Li N, Xu Y F, et al. Research on imaging quality of super agile satellite with dynamic imaging mode [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2018, 16(5): 83-89.
- 吴俊, 李娜, 许云飞, 等. 超敏捷卫星动中成像模式下成像质量研究[J]. *光学与光电技术*, 2018, 16(5): 83-89.
- [18] Xue X C, Fu Y, Han C S. Confirmation of satellite attitude stabilization for TDI CCD camera [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 767-772.
- 薛旭成, 傅瑶, 韩诚山. TDI CCD 相机的卫星姿态稳定度确定[J]. *中国光学*, 2013, 6(5): 767-772.
- [19] Cheng S Y, Yang M, Jiang H J, et al. Theoretical analysis of the super agile high resolution remote sensing satellite for maneuvering imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(11): 255-261.
- 程少园, 杨沐, 姜宏佳, 等. 超敏捷动中成像高分辨率遥感卫星成像理论分析[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(11): 255-261.
- [20] Fan C, Li Y C, Wang F, et al. Analysis of factors having influence on image quality of TDICCD camera [J]. *Infrared*, 2008, 29(8): 21-25, 48.
- 樊超, 李英才, 王锋, 等. 影响 TDICCD 相机成像质量的因素分析[J]. *红外*, 2008, 29(8): 21-25, 48.