

武汉一号高精度智能遥感卫星技术进展

曾国强¹, 龚健雅¹, 黄颀², 高玉东¹, 孙恒青¹, 左玉弟¹, 李志军¹,
戴荣凡³, 邵远征⁴

1. 武汉大学 宇航科学与技术研究院, 武汉 430079;

2. 湖北珞珈实验室, 武汉 430079;

3. 武汉大学 测绘遥感信息工程全国重点实验室, 武汉 430079;

4. 武汉大学 地球空间信息技术协同创新中心, 武汉 430079

摘要: 中国高精度高分辨率遥感卫星的数量较少, 还不能满足中国地理信息产业等领域的快速发展需求。武汉一号卫星旨在用高性价比光学遥感小卫星解决无控制点高精度定位的核心技术问题, 推动空间信息产业的发展。自2024年5月21日发射以来, 完成了卫星各种工作模式的测试, 卫星的无控制点平面精度优于5 m、有控制点的几何精度优于1 m, 突破了卫星星地相机夹角高稳定设计和超高精度卫星姿态测量等关键技术, 验证了以高性价比小卫星实现高精度高分辨率遥感卫星的可行性, 为国内同类型卫星提供了参考和借鉴。

关键词: 高精度高分辨率卫星, 武汉一号卫星, 无控制点平面精度, 在轨智能图像处理, 高精度姿态确定

中图分类号: TP701/P2

引用格式: 曾国强, 龚健雅, 黄颀, 高玉东, 孙恒青, 左玉弟, 李志军, 戴荣凡, 邵远征. 2025. 武汉一号高精度智能遥感卫星技术进展. 遥感学报, 29(6): 1438-1450

Zeng G Q, Gong J Y, Huang D, Gao Y D, Sun H Q, Zuo Y D, Li Z J, Dai R F and Shao Y Z. 2025. Technological progress of Wuhan-1 high precision intelligent remote sensing satellite. National Remote Sensing Bulletin, 29(6): 1438-1450[DOI: 10.11834/jrs.20254596]

1 引言

高精度高分辨率遥感卫星可精确测定地形、地貌、地物和各种目标形状、大小、空间位置等信息, 在地理测绘、国防安全、国土农林资源普查等领域具有极其重要的作用。当前, 中国高精度高分辨率遥感卫星一般质量比较大、造价比较高、在轨数量很少, 还不能满足中国地理信息产业等领域的快速发展需求。在这一背景下, 武汉大学宇航科学与技术研究院提出并实施了“高精度实时智能遥感卫星”项目, 旨在用高性价比光学遥感小卫星解决无控制点高精度定位的核心技术问题、推动空间信息产业的发展。

2021年4月武汉大学批准立项建设“高精度实时智能遥感卫星”项目, 代号“珞珈三号科学试验卫星02星”, 又名“武汉一号”卫星。该卫星是一

颗集0.5 m分辨率全色成像、2 m分辨率多光谱成像、10 m分辨率高光谱成像、0.35 m分辨率视频成像功能为一体的多功能智能遥感卫星。武汉一号卫星于2024年5月21日在酒泉卫星发射中心成功发射。卫星运行在530 km高度左右的太阳同步近圆轨道上, 降交点当地时间地方时为上午10:30。武汉一号卫星具有单条带多目标成像、同轨立体成像、多条带拼接成像、主动推扫成像、面阵视频凝视成像以及对天体目标成像等多种任务模式。卫星入轨后3个月的在轨测试期间, 完成了卫星各种工作模式的测试, 成功验证了无控制点高精度定位等核心技术指标, 之后转入常态化的全球高精度高分辨率遥感数据获取阶段。

武汉一号卫星既是一颗科研试验卫星, 又是一颗业务运行卫星。在科研方面主要解决无控制点遥感影像高精度定位以及在轨智能图像处理等

收稿日期: 2024-12-31; 预印本: 2025-05-27

基金项目: 中央高校自主科研项目(编号: 2042022dx0001)

第一作者简介: 曾国强, 研究方向为航天器设计。E-mail: gq.zeng@whu.edu.cn

通信作者简介: 黄颀, 研究方向为航天器设计。E-mail: dhuang@whu.edu.cn

核心技术。在业务化运行方面主要为武汉市和国内有关区域提供持续稳定的高精度高分辨率遥感数据。围绕着无控制点高精度定位问题，武汉一号卫星从高分辨率相机的高稳定光轴指向设计、星地相机夹角高稳定设计、超高精度卫星姿态测量以及高分辨率相机快速对天标定等方面进行了诸多分析与设计。通过卫星平台与高分相机的力热一体化设计和高精度热控，实现了卫星星地相机夹角的高稳定性。在此基础上，通过超高精度卫星姿态测量实现了无控制点平面精度优于5 m的预期指标。卫星上还配置了高性能GPU，卫星的遥感数据都可以在GPU内通过智能图像处理算法进行处理。卫星配置了1.8 Gbps的高速星地数传设备，卫星可以边成像边实时对地数传或者事后数据回传。卫星设计了单圈能量平衡的电源分系统，支持每圈成像或数传10 min的任务。

2 无控制点高精度定位

无控制点高精度定位的影响因素主要包括定轨和定姿有关的误差、相机畸变有关的误差、时间相关的误差以及星上传感器设备安装误差等。武汉一号卫星的高精度定位主要在以下方面进行：

- (1) 高分相机光轴高稳定度设计；
- (2) 星/地相机夹角高稳定热控制；
- (3) 星/地相机光轴夹角在轨对天快速标定；
- (4) 卫星高精度姿态确定；
- (5) 地面事后精密定轨；
- (6) 整星高精度时间同步。

卫星采用高刚度、稳定性好的材料并结合超轻量化设计理念设计高分相机的整体结构。在高分相机背板上固连共基准安装2台高精度星相机和2台星敏感器，实现与高分相机的一体化设计，形成一套光轴高精度测量系统。

卫星对星相机和高分相机采取统一的高稳定热控制设计，使两者处于均匀稳定的温度场中，从而保证两者之间的夹角稳定性。同时采用一种星/地相机光轴夹角在轨对天快速标定方法，能够快速测量高分相机与高精度星相机之间夹角。

卫星采用高精度星相机进行姿态确定，如图1所示，在轨数据表明星相机X轴3 σ 精度为0.525角秒，Y轴3 σ 精度为0.462角秒，利用两台星相机进行联合定姿，三轴姿态确定精度优于0.6角秒。

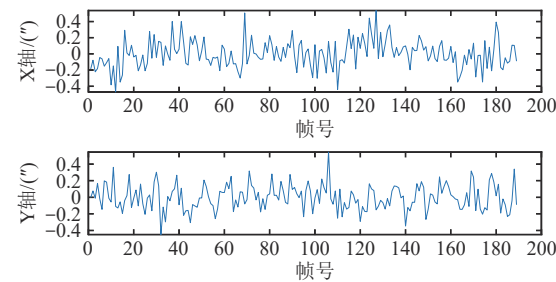


图1 星相机测量精度

Fig. 1 Measurement accuracy of the star camera

卫星配置双频双模GNSS接收机，事后精密定轨使用武汉大学精密定轨软件，定轨精度优于3 cm (1 σ)，如表1所示。

表1 GNSS接收机精密定轨平均精度统计

Table 1 Statistical analysis of the average precision of precise orbit determination for GNSS receivers

系统	切向/cm	法向/cm	径向/cm	三维/cm
BDS	2.8	0.8	1.4	2.9
GPS	1.7	0.6	1.5	2.3

卫星上各单机通过CAN总线的时间广播以及GNSS秒脉冲信号进行整星的时间同步，其中CAN总线广播用来给各单机进行时间的秒整数对准，秒脉冲信号表示精确的整秒时间用来对齐微秒值。CAN总线的时间广播结合秒脉冲信号可实现各单机高精度的时间同步，最大误差优于10 μ s。

3 多任务模式卫星姿态控制

3.1 姿控模式设计

为提高卫星快速观测、成像覆盖和立体观测能力，兼顾高分辨率与宽幅成像，武汉一号卫星具备同轨多条带拼接成像、同轨立体成像和任意航迹成像等多种主动及被动成像任务模式。为满足以上任务的需求，卫星需在指定时间内完成姿态快速机动，并同时保证姿态高稳定度控制。(刘洁等，2020；吕高见等，2021)。卫星基于大力矩、低干扰、高精度测速的多类反作用飞轮，兼顾高分辨率成像和平台快速响应的性能，解决系统快速性和稳定性间的矛盾瓶颈，实现高精度敏捷姿态控制，主要在以下方面开展研究。

- (1) 以任务为导向的差异化执行机构配置；
- (2) 控制力矩受限约束下系统快速性与稳定性综合优化机理；

(3) 基于差异化执行机构的切换参数抗饱和姿态控制算法。

武汉一号卫星姿控系统采用反作用飞轮为执行器，具有灵活性强、控制可靠性高、干扰力矩更小、价格低廉等优势。卫星姿控系统共有 18 种控制模式，涵盖了从基本的姿态稳定到复杂的姿态机动，具体包括阻尼控制、对日捕获、对日定向、组合对日、对地定向、对地推扫、反向推扫、地面点凝视、惯性空间指向、惯性空间推扫、对天标定、偏航标定、降地速推扫、空间目标指向、主动推扫、伪角度控制和角速度控制等。

在星务管理系统的管理和调度下，对不同姿控模式进行组合和衔接，可满足卫星在轨任务需求。如图 2 所示，卫星共有 24 种任务模式，分为成像任务模式和其他任务模式两类。成像任务模式多达

20 种，其中包含 5 种单条带推扫成像、4 种多条带推扫成像、3 种凝视成像、2 种反向推扫成像、降地速高光谱夜光推扫成像、空间目标成像、偏航 90° 高分线阵辐射定标、高分线阵 3.5 μm 成像、高分主动推扫成像等特色成像任务模式。其中，如图 3 所示，高分相机反向推扫任务模式利用卫星俯仰方向的控制能力，实现有效载荷光轴沿逆轨道方向以恒定地速进行推扫，从而减小条带拼接重访周期。降地速高光谱夜光推扫成像任务模式为卫星在地影区时，高光谱相机以小于 1 倍地速进行推扫，从而提高夜光遥感影像质量。天体目标成像任务模式能够精准预测并计算卫星与天体目标的交汇时刻，可实现有效载荷对天体目标进行推扫、凝视成像。高分相机单条带/多条带/立体测绘/反向推扫成像任务模式可分为对天标定和不对天标定两类。

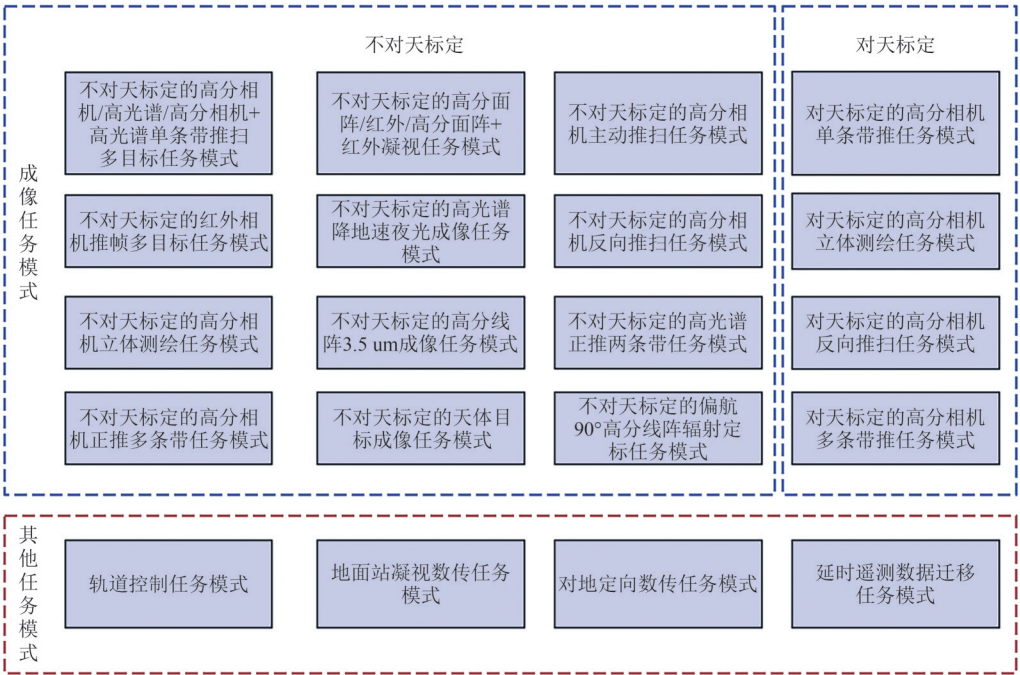


图 2 卫星任务模式
Fig. 2 Satellite mission modes

如图 4 所示，对天标定的高分相机单条带推扫/多条带推扫/反向推扫/立体测绘任务模式的工作流程为：在卫星对地观测前，卫星首先由组合对日模式转为对天标定模式，通过姿态快速机动使星相机和地相机分别对预定天区内的指定恒星进行成像，可后期对拍摄所得的星图进行处理，由星相机和地相机的姿态确定结果实现星/地相机夹角的在轨标定。第一次对天标定后，卫星再次进行姿态机动，转为对地推扫模式，执行对应的对

地成像任务。对地成像完成后，卫星又转为对天标定模式，再进行一次在轨标定，全部完成后，转为组合对日模式。

3.2 在轨试验

(1) 姿态确定精度。武汉一号卫星设计要求星上实时姿态确定精度优于 0.01° (3 σ)。对卫星在 2024 年 6 月 11 日对日定向模式下的姿态数据进行分析，得到姿态确定偏差为 0.00136° (3 σ) (图 5)。

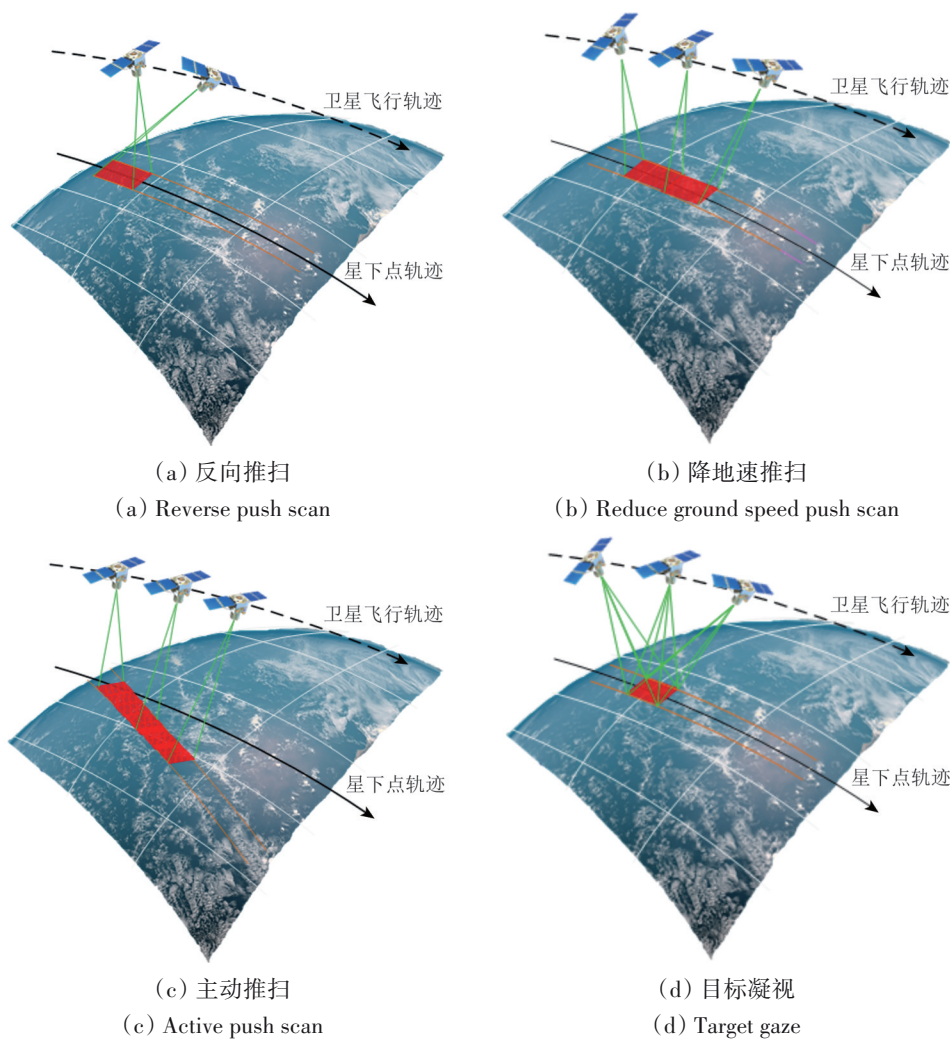


图3 卫星反向推扫/降地速推扫/主动推扫/凝视任务模式姿态示意图

Fig. 3 Attitude diagram of satellite reverse push scan/reduce ground speed push scan/active push scan/target gaze mission modes

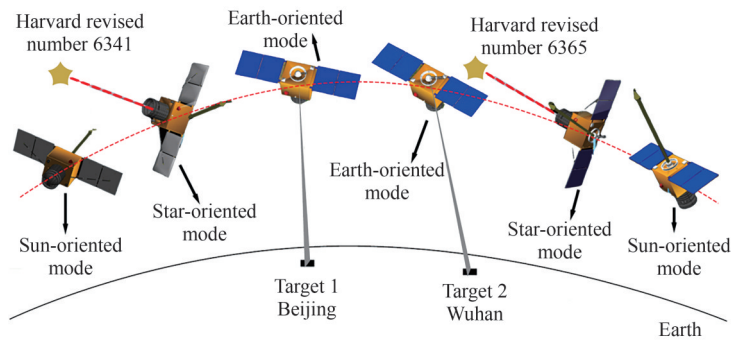


图4 包含对天标定的卫星任务模式的姿态变化过程

Fig. 4 The variation of attitude in satellite mission mode with star-based geometric calibration

- (2) 姿态指向精度。基于姿态轨道数据评估的姿态指向偏差统计如表2所示，姿态指向精度优于 0.0388° （三轴， 3σ ）。
- (3) 典型姿态机动能力。卫星满足快速姿态机动的要求，卫星典型姿态机动能力优于 $45^{\circ}/28\text{ s}$ 、 $25^{\circ}/23\text{ s}$ （表3）。

4 高分辨率相机在轨测试

武汉一号卫星光学载荷包括一台高分线阵相机、一台高分面阵相机和一台高光谱相机，其中高分线阵相机和高分面阵相机共光学系统。高分线阵相机采用5片TDI CMOS光学拼接，为全色+4

谱段多光谱成像相机，分辨率0.5 m，幅宽10 km；高分面阵相机像元分辨率0.35 m，幅宽1.5 km×1 km，成像帧率25 Hz。

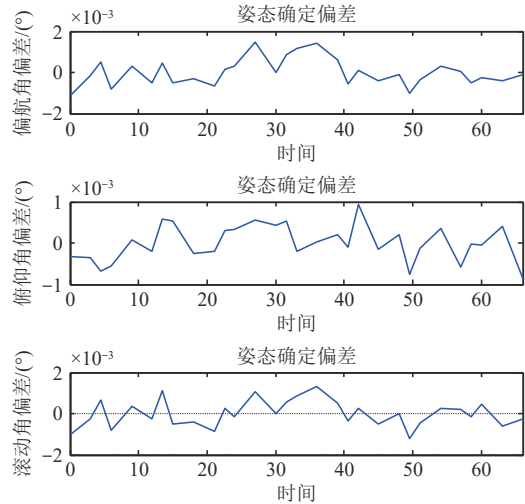


图5 卫星姿态确定偏差
Fig. 5 The deviation of attitude determination

表2 姿态指向偏差
Table 2 The deviation of attitude orientation

序号	任务类型	姿控模式	指向精度
1	对地定向数传任务	对地定向	0.0048° (3σ)
2	天体目标成像任务	惯性空间指向	0.0018° (3σ)
3	高分单条带推扫任务	对地推扫	0.02829° (3σ)
4	高分面阵凝视任务	目标点凝视	0.0381° (3σ)

表3 姿态机动能力
Table 3 The attitude maneuvering ability

序号	任务类型	姿控模式	姿态机动能力	重叠/拼接条带长度/km
1	立体成像任务	对地推扫	45°/28 s	210.702
2	立体成像任务	对地推扫	36°/26 s	143.002
3	立体成像任务	对地推扫	25°/23 s	63.46
4	高分多条带拼接任务	对地推扫	50°/32 s	251.292 两条带

4.1 成像信噪比

对高分线阵相机图像进行了信噪比测试，该项测试在全色0级图像上评定。通过设置合理的相机成像参数，获取指定条件（太阳高度角、地面反射率）下的均匀地物图像，计算该景图像中前后两行像元灰度值差，根据差值得到各列图像信噪比，并通过多列图像信噪比的平均值得出当前图像的信噪比，最后取多景图像平均值作为信噪比测试结果。

2024年6月至7月测试期间，通过对武汉、西

雅图、北极等地区典型房顶和水体地物进行测试，得到高分线阵图像在不同太阳高度角情况下的信噪比结果分别如表4、5所示。测试结果表明，武汉一号卫星高分线阵相机在太阳高度角67°和20°情况下的成像信噪比分别为54.15 dB和40.98 dB，图像清晰，成像质量高。

表4 高太阳角信噪比测试结果
Table 4 The SNR test results of high solar altitude angle

时间	地点	探测器号	太阳高	信噪比/dB
2024-06-06	武汉	CMOS3	67°	51.45
2024-06-06	西雅图	CMOS3	66°	56.17
2024-06-07	Space X发射场	CMOS3	67°	54.84
均值				54.15

表5 低太阳角信噪比测试结果
Table 5 The SNR test results of low solar altitude angle

时间	地点	探测器号	太阳高	信噪比/dB
2024-07-17	北极	CMOS3	20°	40.98

4.2 在轨动态传函MTF

对高分线阵相机图像进行了在轨动态传函测试，该项测试在全色0级图像上评定。将相机调至最佳状态进行成像，在获取的图像上查找典型刃边地物；在刃边图像中，建立边缘扩展函数，进行傅里叶变换并取模，则奈奎斯特频率点对应的值即为该方向的调制传递函数；分别计算沿卫星飞行方向和垂直飞行方向的调制传递函数，二者的几何平均值作为最终的调制传递函数值。

2024年6月测试期间，通过对拉斯维加斯、即墨、银川、中卫等典型地区或定标场刃边地物进行成像测试，得到高分线阵相机的MTF结果如表6所示。测试结果表明，武汉一号卫星高分线阵相机MTF几何平均值为0.1013，图像清晰，成像质量高。

表6 高分线阵相机MTF测试结果

Table 6 The MTF test results of high-resolution linear array camera

时间	地点	刃边角	沿轨	刃边角	垂轨
2024-06-01	拉斯维加斯	—	—	-11.64	0.093
2024-06-08	即墨标定场	11.17	0.094	-7.94	0.113
2024-06-08	即墨标定场	8.45	0.099	—	—
2024-06-11	银川	13.62	0.112	13.43	0.102
2024-06-12	中卫定标场	—	—	-8.82	0.095
平均值		0.1017		0.1008	
均方根		0.1013			

4.3 在轨成像覆盖情况

截至2024年12月31日，武汉一号卫星已在轨正常工作7个月。高分线阵相机共完成在轨成像任务1110余圈/次、拍摄目标点超过1400余个/次，全球总拍摄面积为7783850 km²，中国区域总拍摄面积4362622 km²；高分面阵相机共完成在轨凝视成像任务97圈/次，总拍摄时长超过25000 s；高光谱线阵相机共完成在轨成像任务110余圈/次，全球总拍摄面积10524232 km²，中国区域总拍摄面积6769263 km²。

图6为2024年5月29日，卫星上天后高分线阵相机拍摄雅典港口的全色原始图像，图像信噪比高，港口停泊的游艇清晰。



图6 雅典港口高分全色原始图像
Fig. 6 The panchromatic image raw of Athens Port

图7为2024年8月7日，高分线阵相机拍摄的武汉光谷广场的全色+多光谱融合图像，图像信噪比高，路面汽车清晰。



图7 武汉光谷广场高分彩色融合图像
Fig. 7 The color fusion image of Wuhan Optics Valley Square

4.4 同轨立体成像

武汉一号卫星具有同轨立体测绘成像功能。地面经过数据处理后可将同轨两次立体测绘成像图像进行融合反演，生成目标地域的三维模型。图8为2024年6月13日对巴西圣保罗进行立体测绘成像任务，地面对获取的高分线阵图像数据进行三维重建后的山地坑洞3D动画截图示意。

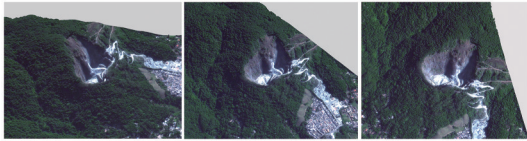


图8 巴西圣保罗山地坑洞3D动画截图
Fig. 8 Three-dimensional animation screenshot of mountain pit cave in St. Paul

5 在轨智能图像处理

武汉一号卫星搭载了一台智能图像处理单机，配置对应的数据接收模块、配置管理模块、通信管理模块和供电模块，能够实时接收并处理卫星的高分线阵、高分面阵或高光谱线阵图像数据中的一种，快速获得目标区域的情报和切片信息。

智能图像处理单机可根据需要上注更新多个（最多100个）在轨处理APP软件或模型库文件。卫星配备了X频段测控应答机，可通过接收地面站的上行数据实现APP软件或模型库文件的上注，上注速率可达1 Mbps，并具有断点续传能力。通过在轨测试，卫星可在500 s内上注更新完成50 MByte大小的智能图像处理软件或模型库文件。

在轨智能图像处理单机进行了多次在轨图像实时处理试验。试验过程中APP软件有效检测并识别出飞机类目标，生成了对应目标的情报和图像切片数据，并将目标切片通过GTX总线发送至卫星存储单元，再通过高速数传上传至地面。部分测试情况如表7所示。

图9和图10为在轨智能图像处理测试结果。左侧图为智能图像处理单机实时处理检测识别出的目标切片，右侧图为切片对应的原始图像。

卫星持续对机场、港口等高价目标进行数据积累，同时通过多渠道获取类似分辨率的遥感影像数据，丰富APP软件的训练数据库和测试数据集，再通过不断上注更新智能图像处理App，实现不断提高图像处理软件的准确性。

表 7 智能图像处理在轨测试情况

Table 7 The test situation of intelligent image processing

测试时间	拍摄地点	测试项目	测试结果
2024-08-07	马德里机场	高分面阵运动目标检测识别	有效检测、识别出飞机目标
2024-08-10	多哈哈马德机场	高分面阵运动目标检测识别	有效检测、识别出飞机目标
2024-08-11	多哈哈马德机场	高分面阵运动目标检测识别	有效检测、识别出飞机目标



图 9 马德里机场飞机切片和原始图像

Fig. 9 The aircraft section and original image of Madrid Airport

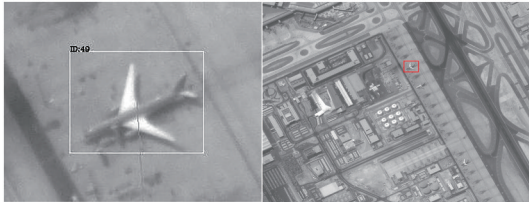


图 10 哈马德机场飞机切片和原始图像

Fig. 10 The aircraft section and original image of Hamad Airport

6 星地高速数据传输

6.1 数传系统设计

武汉一号卫星数传系统采用 X 频段对地数传，主要功能是负责有效载荷数据的对地传输。为满足边成像边数传的实时对地传输能力以及卫星的业务能力，数传系统采用左右圆极化双波束对地传输，最高速率 1.8 Gbps。数传系统主要由 1 台压缩路由单机、2 台数传发射机、1 台双极化数传相控阵天线 3 大部分组成。

压缩路由单机完成多种载荷接口（TLK2711、Camralink、LVDS 等）匹配、压缩、存储等功能。图像数据采用 JPEG2000 压缩算法，可设置为无损压缩、3 : 1、4 : 1 等多种压缩比例，总的存储容量达 8 Tbit，同时具备软件上注功能，可进行在轨功能增强或算法完善，各核心功能单元采用主备双份设计，提高系统的可靠性与在轨寿命。

数传发射机对数据进行信道编码、信号调制，单台传输速率有 900 Mbps、800 Mbps、450 Mbps、

300 Mbps、和 50 Mbps 多档可调，高速率 900 Mbps 和 800 Mbps 采用 8 PSK 调制方式，其他低速率采用 OQPSK 调制方式，其中 8 PSK 信号成形系数设计为 0.15，OQPSK 信号成型系数为 0.25，最高信号带宽 345 MHz 既符合国际电联规定的 375 MHz 带宽限制要求，同时与 X 遥测频点保持隔离，能确保数传信号和遥测信号互不干扰、同时兼容工作。

双极化数传相控天线实现两路射频信号的功率放大、波束指向控制、对地双极化辐射的功能。左旋圆极化波束和右旋圆极化波束两个波束可独立控制，可实现中心角 0°—67.5°、方位角 0°—360° 范围内扫描，波束宽度大于 14°，扫描精度优于 1°，EIRP 大于 25 dBW。相控阵天线通过接收卫星平台的时间、位置、姿态广播信息进行自动波束指向计算，使得发射波束指向目的地面站，是实现武汉一号进行边成像边对地传输（直传）任务的关键部件。天线还可以工作在固定波束指向模式，通过卫星平台姿态控制，保障中心角 0° 波束方向凝视数传接收地面站，该波位波束 EIRP 最大、双通道交叉极化干扰小，可获取最远距离、最低误码率的对地数传可靠性。

6.2 数传系统在轨情况

武汉一号卫星发射当天（2024 年 5 月 21 日）晚上开始执行数传任务，首图下传由武汉地面站完成。在卫星飞控测试期间，对国内多个地面站开展了对地数传测试，位置分布包括武汉、七台河、北京、精河、中卫、酒泉等地，均能实现 1.8 Gbps 数据传输能力。卫星长管运行后，白天成像，晚上数传，主要采用武汉站进行数传接收，可实现 2 轨过境数传，每天有效数据量超 200 GByte。

卫星分系统在轨测试开展了多种传输速率及调制方式的对地数传验证，包括双通道 1.8 Gbps/8 PSK、双通道 1.6 Gbps/8 PSK、双通道 900 Mbps/OQPSK、双通道 600 Mbps/OQPSK、单通道 900 Mbps/8 PSK，可适应不同技术能力的地面站。结合整星任

务规划情况, 数传系统的3种工作模式如下:

(1) 对地定向数传任务模式, 该模式为卫星在轨常规数传方式, 卫星姿态为对地定向, 并根据轨道位置及地面站位置对卫星进行滚动角补偿实现数传时间最长, 相控阵天线工作在自动波束指向模式。

(2) 地面站凝视数传任务模式, 卫星姿态保持相控阵天线Zb轴持续指向地面站位置, 相控阵天线工作在固定中心角 0° 波束指向模式。

(3) 对地成像直传任务模式, 卫星在开展对地成像任务的同时启动数传系统, 实时的把有效载荷数据传输到指定位置, 卫星姿态保障成像要求, 数传发射波束由相控阵天线自动指向。目前已经分别对北京、武汉两个地区开展了直传模式测试, 卫星成像正常、地面数据接收正常。

对地成像直传任务可实时获取最新遥感图像数据, 其成像时间或者成像范围, 取决于成像方式、轨道位置、成像位置、地面站位置多个因数。以武汉为中心且对武汉站数传为例, 北京时间2024年12月12日上午11点20分过境武汉, 高分线阵相机对地正向推扫成像直传时间达260 s。

7 高分相机与星相机夹角稳定性

7.1 热设计与夹角稳定性分析

武汉一号卫星在轨需要保证高精度星相机与高分相机(以下简称“地相机”)的热控精度及热稳定性优于 $19.5\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, 进而保证两者之间的夹角在轨高稳定性。针对武汉一号卫星的热控需求, 开展了基于被控对象热特性的精密热控系统设计方案、精确热分析方法及试验验证等研究, 解决了整星多区域、不同温度要求的精密控温, 实现了星/地相机一体化精密控温要求, 确保了星/地相机光轴夹角在轨稳定性, 为武汉一号卫星的无控制点定位精度提供精密控温保障, 主要在以下方面开展研究。

(1) 通过采用相同结构材料同时共基准安装实现星/地相机的结构与热控消热化、一体化设计。

(2) 设计了一套合理的分区控温方案和控制算法及控温策略, 解决了整星多区域、不同温度要求的精密控温问题, 使卫星上各单机设备均处于合理的温度范围内。

为保证在轨高精度无控制点定位, 武汉一号

卫星采用两台0.3"的高精度星相机作为对地高分相机光轴的精密测量设备。同时在卫星总体设计时将高精度星相机通过高刚度支架直接安装在高分相机的主承力结构上以尽可能缩短两者之间的传力路径(图11), 且在结构材料选取上尽量保证星相机、安装支架与高分相机主承力背板保持一致, 从而实现高精度星相机与高分相机的结构与热控消热化及一体化设计, 尽可能减小或避免因热变形不一致而引起的星地相机光轴夹角超差问题。

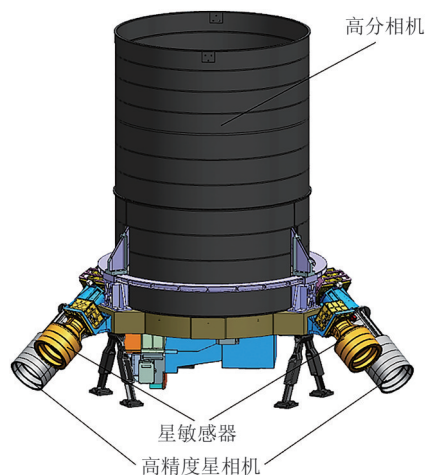


图11 星/地相机结构一体化设计构型图

Fig. 11 The diagram of integrated design of Star/Earth camera

为有效实现武汉一号卫星的精密热控要求, 并提高能源利用效率, 减小能耗, 采用分区热控方法合理规划星上资源, 其基本原理是在进行卫星的总体结构布局设计时, 将整星热控区域划分为外围热控区、过渡热控区和核心热控区, 根据星上设备不同的热控指标要求将其布局在对应的热控区域, 将控温精度较低、控温范围宽的星上设备布局在外围热控区, 控温精度要求一般、控温范围较宽的星上设备布局在过渡热控区, 而将具有高精度控温指标要求的设备如高分相机、高精度星相机和星敏感器等测量设备布局在核心热控区, 各热控区域采用隔热设计, 以保证各区域热控的独立性。

卫星以被动热控结合主动热控方式完成整星外围热控区域和过渡热控区域的热控制。卫星核心热控区域的高分相机和高精度星相机采用门限控制逻辑并结合PID控温算法、离散均匀加热策略来实现整体精密控温及热稳定性, 加热回路、测温回路均采取主、备回路设计, 且一一对应, 主、

备回路可全回路切换，所有信号均可遥测采集。卫星热控设计选用的产品有热控涂层、热管、多层隔热组件、电加热器等。

卫星星/地相机光轴夹角稳定性与其在轨的温度分布情况紧密相关，因此通过热控仿真提取了星/地相机在轨实际工作情况下单轨多个时间点的整机瞬态温度分布结果作为输入条件，分析计算了其结构热变形及光轴夹角稳定性情况。通过分析，高精度星相机安装面与高分相机光轴之间的夹角变形量最大为0.259″（1σ），分析结果见图12，经与星相机自身光轴变化量核算后，在轨工作期间能够满足星/地相机光轴之间的夹角稳定性不超过0.3″（1σ）的指标要求。

7.2 在轨测试情况

（1）星/地相机在轨控温结果。基于在轨温度遥测数据重点分析了高分相机和高精度星相机的在轨温度控制结果，其中，高分相机的整体控温达到19.5±0.5℃，其3个安装支腿处的温度基本在

19.4—19.8℃之间（图13），温度波动范围较小，实现了在轨精密控温的效果。同时结合星/地相机夹角稳定性在轨长期测试结果，针对两台高精度星相机的在轨热控效果进行了调优处理，最终实现其镜头整体控温优于31.8±0.5℃，其安装支架处的温度基本稳定在22.5—23℃之间（图14），达到了预期的控温效果及温度稳定性。

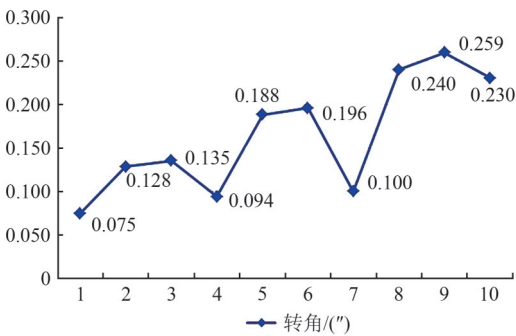


图12 高精度星相机与高分相机光轴夹角分析结果
Fig. 12 Analysis results of optical axis angle between high precision star camera and high resolution camera

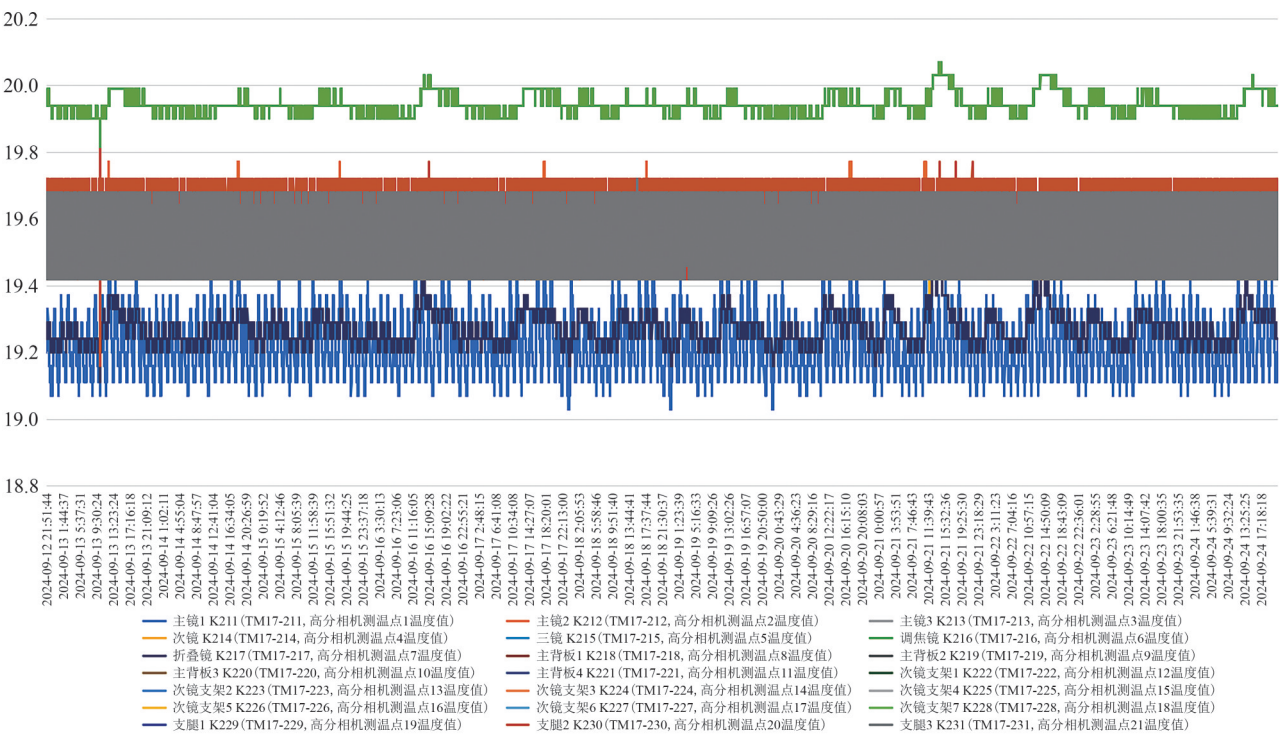


图13 高分相机在轨温度曲线
Fig. 13 Temperature curve of high resolution camera in orbit

（2）夹角稳定性测试情况。根据武汉一号卫星高精度星相机在轨测试获取的大量原始星图，解算了不同任务期间两台星相机之间的光轴夹角，如图15所示。结果表明，对地成像任务期间两台

高精度星相机之间的光轴夹角中误差为0.47″，星/地相机的在轨精密热控措施合理有效，能够保证两者之间具有较好的光轴夹角稳定性，满足总体设计要求。

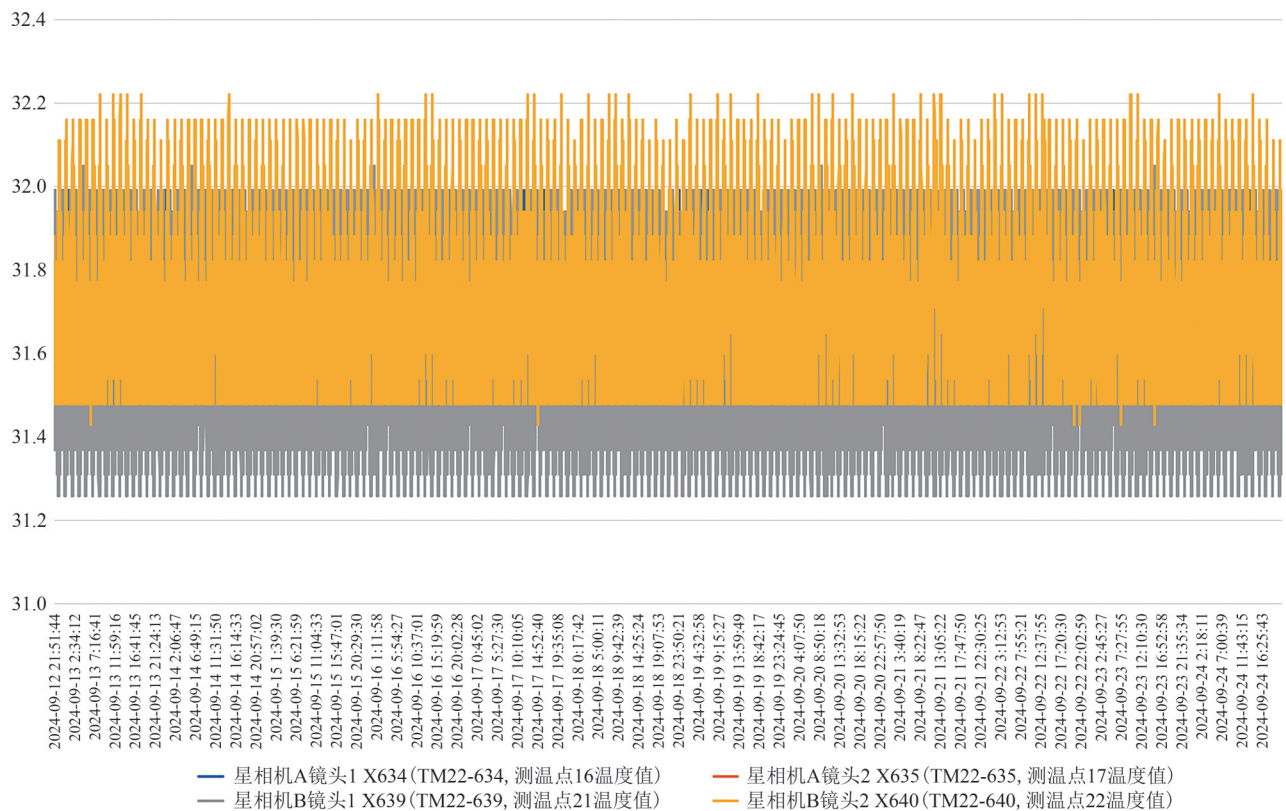


图 14 高精度星相机 AB 在轨温度曲线

Fig. 14 Temperature curve of high precision star camera AB in orbit

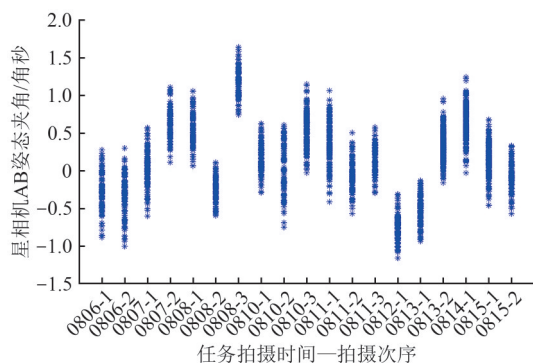


图 15 不同对地成像任务期间两台高精度星相机光轴夹角

Fig. 15 The angle between the optical axes of two high precision star cameras during different earth imaging missions

8 无控制点定位测试

实现高分辨遥感卫星无控制点高精度几何定位的关键因素在于以下 3 个方面 (图 16): (1) 多姿态敏感器精确定姿: 在 500 km 太空轨道, 1 角秒的姿态误差会造成 2—3 m 的定位误差; (2) 在轨几何定标: 卫星发射后, 空间环境的变化导致相机的状态参数发生变换, 会严重影响卫星的定位精度; (3) 传感器校正: 为了实现大幅宽、高分辨率光学成像, 相机结构设计复杂, 需解决 CCD 拼接、多光谱配准、积分时间跳变以及平台震颤

等对几何定位精度的影响。

8.1 多源姿态传感器组合定姿

武汉一号卫星搭载了两台高精度姿态测量星相机, 以及一台高频陀螺传感器, 可利用多源姿态数据进行高精度融合处理 (Wang 等, 2024)。首先, 对星相机序列图像进行全视场畸变标定, 完成星相机四元数姿态解算; 然后, 基于无迹卡尔曼滤波算法, 建立适用于星相机姿态解算与高频陀螺传感器稳健收敛信息融合模型; 最后, 根据卫星机动速度, 实时调整陀螺测量噪声与星敏感器测量噪声的权重设置, 实现高精度多源姿态数据自适应动态融合处理, 并采用双向滤波与整体加权平差的方法, 实现高频陀螺传感器常值漂移误差、卫星姿态四元数的最优估计, 最终实现高精度的卫星姿态确定。

8.2 高精度在轨几何定标

利用遥感影像对光学遥感卫星进行几何定标, 获取成像系统精确的成像参数, 是高分辨光学卫星影像高精度几何定位的关键 (王密 等, 2017)。光学相机的物理成像模型极其复杂, 模型参数众多, 建模时需依次计算物理畸变、相机主距误差

和镜头光学畸变，且由于卫星高轨道以及窄视场角的几何成像特性，部分参数之间具有高度的相关性。武汉一号卫星地面应用系统通过构建一种基于像元指向角的内定标模型（Cao 等，2022），

将物理模型中每个像元在相机坐标系下的位置转换为相应的指向角，通过精确恢复每个像元的指向角来补偿成像载荷的内部几何畸变，实现相机的精确几何定标。

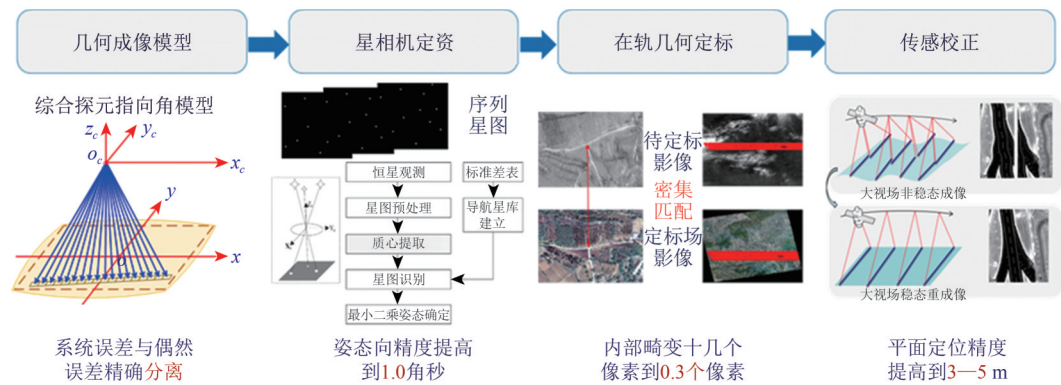


图 16 基于全链路误差补偿无控制点高精度几何定位

Fig. 16 The high-precision geometric positioning without control points based on full-link error compensation

8.3 虚拟长线阵传感器校正

高分线阵相机采用多光谱合一的多片 TDI CMOS 推扫成像设计，原始图像存在多片成像不连续、波段间未配准、积分时间跳变引起的空间分辨率不一致，以及平台不稳定（震颤）引起的推扫行之间的几何变形等问题。因此，地面应用系统采用基于虚拟稳态重成像传感器校正的方法（Guo 等，2024），通过积分时间稳定、平台姿态和轨道平滑构建成像状态平稳条件，并采用一条完整、无畸变的理想虚拟 CCD，完成在理想条件下的中心投影影像，从而实现多片探测器无缝拼接、多谱段高精度波段配准，消除由于镜头畸变、探测器变形以及平台震颤带来的影像畸变，最终获得连续、完整、无畸变的影像以及高精度定位模型参数 RPC（陈儒 等，2023；戴荣凡 等，2023；马灵玲 等，2023）。

8.4 无控制点几何定位精度测试结果

无地面控制点定位精度测试是基于卫星轨道、姿态以及传感器等参数建立对地定位模型得到的几何定位结果与真实坐标之间误差的统计值。测试流程为：利用 RTK 技术人工测量地面物方控制点，由专业的遥感技术人员负责对遥感影像刺点，确定像方控制点位置，结合影像 RPC 辅助文件，计算几何定位精度验证结果。选取了 2024 年 8 月 7 日至 9 月 2 日不同时间、不同地理位置、成像质量良好的武汉一号卫星高分线阵全色影像数据，

进行无控定位精度的测试评估，其无控制点几何定位精度时空分布结果如表 8 所示。

表 8 无控制点定位精度时空分布情况

Table 8 The spatial and temporal distribution of positioning accuracy without control points

地区	时间	中心点位置	垂轨	沿轨	平面
武汉	2024-08-07	114.34°E_30.52°N	1.03	4.50	4.96
成都	2024-08-12	103.96°E_30.58°N	2.87	1.09	3.15
西安	2024-08-13	108.99°E_34.42°N	2.39	2.09	3.46
嵩山	2024-08-23	113.14°E_34.44°N	2.56	2.31	3.56
山东	2024-08-24	117.97°E_37.56°N	0.59	1.86	2.58
伦敦	2024-08-23	0.05°W_51.49°N	2.47	1.52	2.95
马德里	2024-08-23	3.68°W_40.51°N	3.08	3.58	5.08
即墨	2024-09-02	120.50°E_36.43°N	1.16	1.49	2.07
统计值			2.02	2.30	3.48

测试结果表明，武汉一号卫星高分全色影像产品无控制点几何定位精度在垂轨方向均值为 2.02 m，沿轨方向均值为 2.3 m，平面方向均值为 3.48 m，适用于不同时相、不同区域获取的全色影像，可以完全满足卫星无控制点高精度定位需求。

9 结 论

武汉一号卫星的在轨测试期间，完成了单条带多目标成像、同轨立体成像、多条带拼接成像、主动推扫成像、面阵视频凝视成像以及对天体目标成像等任务。卫星的无控制点平面精度优于 5 m、有控制点的几何精度优于 1 m，突破了卫星星地相

机夹角高稳定设计和超高精度卫星姿态测量等关键技术,验证了以高性价比小卫星实现高精度高分辨率遥感卫星的可行性。卫星发射以来获取了超千万平方公里的遥感数据,遥感数据在卫星测图、地物分类、变化检测、水环境监测、农业林业等领域得到了广泛应用。武汉一号卫星在无控制点高精度定位方面的技术探索和成功在轨试验,能够为同类高分辨率遥感小卫星提供参考与借鉴,促进中国高精度高分辨率遥感卫星的造价大幅降低,进而提升高精度高分辨率遥感卫星在轨数量、丰富地理信息产业高精度高分辨率遥感数据来源。

志 谢 武汉一号卫星从研制到在轨测试,得到了武汉云成卫星科技有限公司在人员和经费方面的巨大支持,在轨测试方面得到了武汉大学遥感信息工程学院和测绘遥感信息工程国家重点实验室等单位诸多团队老师的大力帮助,在此表示衷心的感谢!

参考文献(References)

- Cao J S, Shang H X, Zhou N and Xu S. 2022. In-orbit geometric calibration of multi-linear array optical remote sensing satellites with TIE Constraints. *Optics Express*, 30(15): 28091-28111 [DOI: 10.1364/oe.464112]
- Chen R, Han J Y, Wang M, He L X, Dai R F and Sun C R. 2023. A study on relative radiometric calibration using side-slither data for HY-1D CZI. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(1): 43-54 (陈儒, 韩静雨, 王密, 何鲁晓, 戴荣凡, 孙从容. 2023. 海洋一号D卫星海岸带成像仪偏航90°相对辐射定标. *遥感学报*, 27(1): 43-54) [DOI: 10.11834/jrs.20221611]
- Dai R F, Han J Y, Wang M, Chen R, Peng T and Zhang H N. 2023. Global relative radiation correction method for the HY-1C/D Coastal Zone Imager. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(5): 1121-1132 (戴荣凡, 韩静雨, 王密, 陈儒, 彭涛, 张昊楠. 2023. HY-1C/D海岸带成像仪全视场整体相对辐射校正方法研究. *遥感学报*, 27(5): 1121-1132) [DOI: 10.11834/jrs.20232289]
- Guo B B, Pi Y D and Wang M. 2024. Sensor correction method based on image space consistency for planar array sensors of optical satellite. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62: 5601915 [DOI: 10.1109/tgrs.2023.3342823]
- Liu J, Wang S Y, Lu D N and Chen C. 2020. Design of control subsystem and on-orbit verification for GF-7 satellite. *Spacecraft Engineering*, 29(3): 89-95 (刘洁, 王淑一, 陆栋宁, 陈超. 2020. 高分七号卫星控制分系统设计及在轨验证. *航天器工程*, 29(3): 89-95) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-8748.2020.03.014]
- Lyu G J, Guan H, Tian K F, Fu X T and Yao N. 2021. GNC sub-system design and on-orbit verification of GFDM-1 satellite. *Spacecraft Engineering*, 30(3): 141-147 (吕高见, 关宏, 田科丰, 傅秀涛, 姚宁. 2021. 高分多模卫星控制分系统设计及在轨验证. *航天器工程*, 30(3): 141-147) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-8748.2021.03.020]
- Ma L L, Wang N, Gao C X, Zhao Y G, Yang B Y, Wang X H, Han Q J, Xu N, Song P L and Liu Y K. 2023. On-orbit absolute radiometric calibration for optical remote sensing satellites: progress and trends. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(5): 1061-1087 (马灵玲, 王宁, 高彩霞, 赵永光, 杨本永, 王新鸿, 韩启金, 徐娜, 宋培兰, 刘耀开. 2023. 光学遥感卫星在轨绝对辐射定标: 进展与趋势. *遥感学报*, 27(5): 1061-1087) [DOI: 10.11834/jrs.20222117]
- Wang M, Tian Y and Cheng Y F. 2017. Development of on-orbit geometric calibration for high resolution optical remote sensing satellite. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 42(11): 1580-1588 (王密, 田原, 程宇峰. 2017. 高分辨率光学遥感卫星在轨几何定标现状与展望. *武汉大学学报(信息科学版)*, 42(11): 1580-1588) [DOI: 10.13203/j.whugis.20170318]
- Wang Y L, Wang M, Dong Z P and Zhu Y. 2024. High-precision geometric positioning for optical remote sensing satellite in dynamic imaging. *Geo-Spatial Information Science*, 1-17 [DOI: 10.1080/10095020.2024.2411819]

Technological progress of Wuhan-1 high precision intelligent remote sensing satellite

ZENG Guoqiang¹, GONG Jianya¹, HUANG Di², GAO Yudong¹, SUN Hengqing¹, ZUO Yudi¹,
LI Zhijun¹, DAI Rongfan³, SHAO Yuanzheng⁴

1. Institute of Aerospace Science and Technology, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. Luojia Laboratory, Wuhan 430079, China;

3. State Key Laboratory of Surveying, Mapping and Remote Sensing Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

4. Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: The number of high-precision and high-resolution remote sensing satellites in China is relatively small, which is not yet able to

meet the rapid development needs of China's geographic information industry and other fields. Wuhan-1 satellite aims to solve the core technology problem of high-precision positioning without control points with cost-effective optical remote sensing small satellites to promote the development of spatial information industry. The satellite is a multi-functional intelligent remote sensing satellite integrating 0.5-meter resolution panchromatic imaging, 2-meter resolution multispectral imaging, 10-meter resolution hyperspectral imaging and 0.35-meter resolution video imaging. It has a variety of mission modes, such as single-band multi-target imaging, same-orbit stereo imaging, multi-band splicing imaging, active push-scan imaging, surface-array video gaze imaging and imaging of celestial targets. Focusing on the problem of high-precision positioning without control point, Wuhan-1 satellite has carried out a lot of analysis and design from the design of high-stability optical axis pointing of high-resolution camera, high-stability design of star-ground camera angle, ultra-high-precision satellite attitude measurement, and rapid calibration of high-resolution camera to the sky, and so on. Through the force-heat integration design and high-precision thermal control of the satellite platform and the high-resolution camera, the high stability of the angle of the satellite star-ground camera is realized. On this basis, the expected index of no-control-point plane accuracy better than 5 m was realized through ultra-high-precision satellite attitude measurement. The satellite is also equipped with a high-performance GPU, and the remote sensing data of the satellite can be processed by intelligent image processing algorithms in the GPU. The satellite is equipped with 1.8Gbps high-speed star-ground digital transmission equipment, the satellite can be imaged while real-time digital transmission to the ground or after the data back to the transmission. The satellite is designed with a single-turn energy-balanced power supply subsystem to support a 10-minute imaging or data transmission mission per turn. Since its launch on May 21, 2024, it has completed the tests of various working modes of the satellite, and the planar accuracy of the satellite without control point is better than 5 meters, and the geometric accuracy of the satellite with control point is better than 1 meter. It has broken through the key technologies of satellite star-earth camera angle design and ultra-high-precision satellite attitude measurement, and verified the feasibility of realizing the high-accuracy and high-resolution remote sensing satellites with cost-effective small satellites, which provides a reference for the same type of satellites in China.

Key words: high precision and high resolution satellite, the Wuhan-1 satellite, the plane positioning accuracy without ground control points, intelligent image processing in orbit, high precision attitude determination

Supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (No. 2042022dx0001)