

近地小行星天地基协同监测和轨道确定试验

刘 静^{1,2}, 程昊文^{1,2}, 杨志涛^{1,2}, 李大卫^{1,2}, 曹 莉^{1,2}, 江 海^{1,2}, 李 杨^{1,2}, 王华超^{1,2}

(1. 中国科学院 国家天文台, 北京 100101; 2. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 100049)

摘 要: 基于中国科学院国家天文台空间碎片试验望远镜, 联合“仰望一号”“吉林一号”卫星, 设计并开展了近地小行星天地基协同监测试验, 利用图像处理和定轨方法, 实现了天地基观测图像的目标检测和天文定位, 完成了近地小行星轨道的精确确定。经分析, 基于现有的天地基设备可实现对近地小行星的协同监测和轨道编目, 为研判近地小行星撞击风险提供轨道数据支持。

关键词: 近地小行星; 天地基协同监测; 精密定轨; 数据融合

中图分类号: P135+.3

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2024)02-0177-07

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230062

引用格式: 刘静, 程昊文, 杨志涛, 等. 近地小行星天地基协同监测和轨道确定试验[J]. 深空探测学报 (中英文), 2024, 11 (2): 177-183.

Reference format: LIU J, CHENG H W, YANG Z T, et al. Experiments on space-ground cooperative monitoring and precise orbit determination of near-Earth asteroids[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11 (2): 177-183.

引 言

近地小行星是指轨道近日点日心距离小于1.3个天文单位的小行星。由于近地小行星轨道存在与地球轨道相交的可能, 因此近地小行星对地球撞击威胁受到关注。经估算^[1], 千米级尺寸近地小行星撞击地球会造成全球性灾难, 即使是10 m级尺寸近地小行星撞击地球也会造成城市至城镇级别范围灾难。近地小行星监测预警是应对撞击威胁的前提基础, 通过望远镜、雷达等观测设备获取近地小行星监测数据, 再利用定轨预报等模型方法预测撞击可能性。

近地小行星监测分为搜索发现和精密跟踪两种模式。搜索发现是为了编目尽可能多的近地小行星, 以提升撞击风险预测的全面性。精密跟踪是为了获取近地小行星更准确的轨道和特征信息, 以提升撞击风险预测的准确性。典型的近地小行星搜索发现项目有美国的“卡特琳娜”巡天系统 (Catalina Sky Survey, CSS) 和Pan-STARRS计划^[2]。典型的近地小行星精密跟踪联测试验有国际小行星预警网 (International

Asteroid Warning Network, IAWN) 2021年组织的对近地小行星“阿波菲斯” (Apophis) 的国际联合监测^[3]。

近地小行星监测正在从地基向天地基协同发展, 以补充传统地基监测在近太阳方向的观测天区覆盖, 弥补昼夜交替和天气等因素对地基望远镜观测时间连续性的影响。IAWN于2021年组织开展的对近地小行星“阿波菲斯” (Apophis) 的联测, 重点测量分析了其物理特性, 并同时更新了其精密轨道^[4]。美国于2005年颁布的法案要求在15年内完成至少90%的尺寸140 m以上近地天体的编目, 地面光学巡天被认为是全面探测近地天体、确定其轨道和随后跟踪的最有效手段^[5-6]。尽管如此, 天基监测设备仍然是不可或缺的重要补充^[7]。

近地小行星天地基协同监测的优势可直接体现在精密定轨^①过程中。为达到较高的定轨精度, 精密定轨考虑的动力学模型, 包括太阳中心引力、较大天体 (包括8大行星、月球、大质量小行星等) 的第三体引力和后牛顿效应等产生的摄动^[8], 在处理长期高精度测量数据时可增加对Yarkovsky效应的测定^[9-11]; 在观测资料处理上, 可融合多台站和多天基望远镜近地小行星

收稿日期: 2023-05-06 修回日期: 2023-08-23

基金项目: 空间碎片与近地小行星防御 (KJSP2020020204, KJSP2020020205); 国家自然科学基金 (12233003); 空间碎片专项 (KJSP2016020301, KJSP2020010101)

①此处所述精密定轨是轨道确定的一种。参考南京大学刘林教授的著作《人造地球卫星精密定轨》中的表述, “轨道确定”含义更广, 包括短弧意义下的初轨计算和长弧意义下的轨道改进 (又称精密定轨), 二者的主要差别在于算法不同, 初轨计算不需要任何先验信息, 而精密定轨需要给定一组轨道初值且一般考虑更完整的轨道摄动力模型。

监测数据。

当前中国近地小行星观测望远镜资源稀缺，由于望远镜论证建设需要较长的周期和巨额的经费投入，因此通过升级改造现有望远镜设备进行近地小行星组网观测是快速形成观测能力的有效手段，获取的实际经验也可作为后续近地小行星监测体系论证建设的依据。

本文描述的近地小行星天地基协同监测和精密定轨试验，其目的是验证利用现有天地基设备开展近地小行星协同观测的可行性，演练近地小行星天地基协同监测和精密定轨任务流程，试验验证图像处理方法和精密定轨算法的效果，进一步分析通过天地基组网的方式开展近地小行星观测对精密定轨产生的效益。

1 协同监测和精密定轨方法

1.1 选取观测目标

开展近地小行星天地基协同监测和精密定轨试验首先需要选定观测目标。考虑到现有设备多为中小口径（小于1 m）望远镜或相机，因此选定尺寸较大逼近地球的近地小行星作为试验观测目标。对2022年1月近地小行星可观测情况进行分析，筛选出小行星1994PC1具有较好的可观测条件，预测得到的1994PC1地心距离和视星等变化曲线如图1所示。

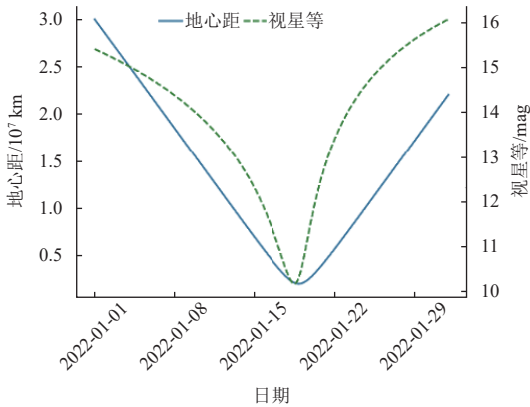


图1 2022年1月1994PC1地心距和视星等变化
Fig. 1 Variation of 1994PC1's Earth center distance and magnitude in Jan. 2022

1.2 观测设备及观测模式

1.2.1 地基

参与近地小行星天地基协同监测和精密定轨试验的地基设备主要为中国科学院国家天文台所属的兴隆站60 cm望远镜和库尔勒站70 cm望远镜。

参与试验的地基望远镜原主任务是空间碎片观测，观测模式的主要特点是快速跟踪和短时曝光。针对近地小行星观测的需求，需要将观测模式改为慢速跟踪和长时曝光。在图像处理过程中在恒星背景实现对低速视运动目标（也就是近地小行星）的检测。具

体图像处理方法将在后面数据处理的章节进行描述。

1.2.2 天基

参与近地小行星天地基协同监测和精密定轨试验的天基设备有两个，分别为“吉林一号”视频星和“仰望一号”。观测设备的具体信息如表1所示。

表1 天基观测设备技术参数
Table 1 Technical parameters of space-based observation device

参数	“吉林一号”视频星	“仰望一号”
发射日期	2017年11月21日	2021年6月11日
轨道类型	太阳同步轨道	太阳同步轨道
轨道高度/km	535.35	499.7
降交点地方时	12:00 am	10:30 am
视场角/(°)	1.2 × 0.5	8.8 × 8.8
口径/mm	320	87.4
像元分辨率/($''$ -pixel ⁻¹)	0.3	15.46
谱段/nm	B: 437~512 G: 489~589 R: 580~723	420 ~700

天基观测设备中，“仰望一号”作为空间天文观测卫星本身具备近地小行星观测能力，而“吉林一号”视频星并非专为天文观测设计，兼用作近地小行星观测需要对曝光和拍摄模式进行特殊设定。

1) “吉林一号”视频星近地小行星观测的相机曝光模式

通过尽量延长“吉林一号”单次曝光时长（约为1 s），并加长一个曝光序列中首帧和末帧的时间间隔，以增加近地小行星相对于恒星背景的角度位移量，有利于目标星象检测。

2) “吉林一号”视频星近地小行星观测的跟踪指向模式^[12]

“吉林一号”视频星通过在轨道运动中不断调整卫星姿态，对目标所在观测区进行定点凝视成像，实现对近地小行星的观测，如图2所示。

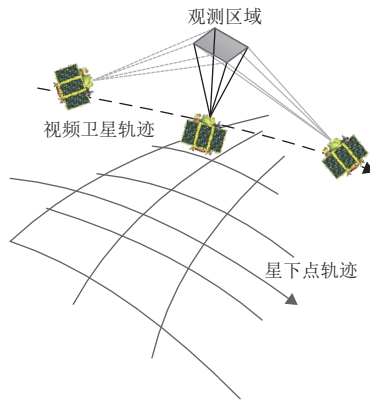


图2 视频星对小行星目标惯性空间稳定成像模式示意图
Fig. 2 Schematic diagram of inertial space stable imaging mode for video star asteroid targets

卫星通过姿态和摆角调整实现对观测目标的指向。摆角的限制是 $-45^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 。姿态则受电源充放电能力限制,两次连续的姿态机动需大于一定的时间间隔,且需考虑到卫星储存空间及测控、数传弧段的限制。此外,近地小行星观测任务与其原有任务需要进行任务冲突协调。

综合以上限制因素,结合1994PC1小行星观测任务需求,“吉林一号”视频卫星在2022年01月17日—21日期间共安排了51次拍摄任务。根据小行星的光度特性,采用950 ms曝光时间,单次成像任务时间为15 s,成像帧频为1 Hz。

“吉林一号”的图像处理需要根据视频星采集图像的特点建立相适应的处理方法,将在下文进行描述。

1.3 数据处理

对近地小行星天地基协同监测和精密定轨试验数据的处理总体分为图像处理和精密定轨两个部分。图像处理主要是提取和识别图像中的近地小行星星象,并且利用其与背景恒星的相对位置关系精确确定近地小行星赤经赤纬信息。精密定轨是利用各设备在任务期间观测和图像处理获取的赤经赤纬数据,确定近地小行星的轨道参数。

1.3.1 图像处理方法

本次试验将获取两类观测图像:第一类是曝光时长达到10 s级(本次试验对应地基望远镜观测图像),采用线检测法检测出图像中的近地小行星星象;第二类是曝光时长秒级(本次试验对应天基望远镜观测图像),采用扣减法检测出图像中的近地小行星星象。

1) 线检测法图像数据处理

根据对所有近地小行星的运动特性进行统计分析,可得出在10 s量级时间内近地小行星的运动可以简化为直线运动的初步结论,因此在本文的天文图像处理过程中用直线检测的方法来提取不同帧图像中观测到的小行星。

在线检测过程中,同时增加近地小行星运动速度估计的限制,可有效剔除一些假目标。库尔勒站70 cm望远镜(MPC^①编号N83)观测到的1994 PC1图像如图3所示,MPC格式的处理数据结果如图4所示。

2) 扣减法图像数据处理

天基观测数据曝光时长为秒级。考虑到试验期间近地小行星的视运动角速度仅为 $1\sim 2''/\text{s}$,近地小行星在图像中拉线的特征并不显著,因此线检测法不再有

效。采用扣减法,将同一组的第一帧和最后一帧相减,在相减后的图像中搜索目标。

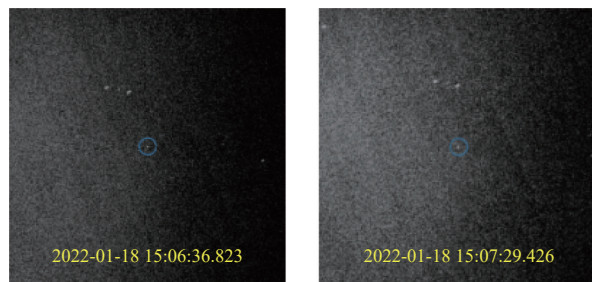


图3 库尔勒70 cm望远镜在间隔55 s内拍摄到的1994 PC1图像(蓝圈标记为1994PC1星像)

Fig. 3 1994 PC1 image captured by the Korla 70 cm telescope at an interval of 55 seconds (marked with a blue circle as the 1994 PC1 star image)

07 482	C2022 01	18.62 411 702	30	27.193-07	12	58.36	9.8 G	N83
07 482	C2022 01	18.62 426 902	30	26.164-07	12	39.90	9.8 G	N83
07 482	C2022 01	18.62 685 502	30	07.122-07	07	07.80	9.8 G	N83
07 482	C2022 01	18.62 746 302	30	02.775-07	05	52.76	10.0 G	N83
07 482	C2022 01	18.62 913 602	30	50.369-07	02	17.05	10.0 G	N83
07 482	C2022 01	18.62 959 302	29	47.035-07	01	17.54	10.2 G	N83
07 482	C2022 01	18.63 020 202	29	42.536-06	59	59.07	10.0 G	N83
07 482	C2022 01	18.63 142 102	29	33.718-06	57	25.15	10.0 G	N83
07 482	C2022 01	18.63 172 502	29	31.287-06	56	43.43	9.9 G	N83

图4 库尔勒70 cm望远镜获得的1994 PC1观测数据示例

Fig. 4 Example of 1994 PC1 observation data obtained from the Korla 70 cm telescope

从图像中检出近地小行星步骤:从第1帧和最后一帧图像中识别恒星的坐标,对两个坐标列表进行匹配,匹配方法为容差匹配;利用匹配后的坐标列表计算两幅图像的转换矩阵;根据转化矩阵对最后一帧图像进行平移和旋转,与第1帧对齐;第1帧图像减去对齐后的最后一帧图像;在相减后的图像中搜索运动目标(相减后图像中的小行星如图5所示);目视检查搜索得到的运动目标,确定小行星在图像中的位置。

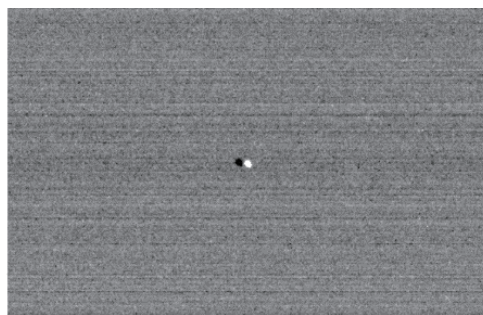


图5 第1帧图像减去对齐后的最后一帧(第9帧)图像(局部),图像中心为小行星

Fig. 5 First frame image minus aligned last frame (9th frame) image (local), with asteroid at the center of the image

①小行星中心(Minor Planet Center, MPC)是一个全球性的接收和分发小行星、彗星和天然卫星等太阳系小天体位置测量数据的国际组织。

1.3.2 精密定轨方法

本次试验采用基于批处理最小二乘法的精密定轨算法, 总体而言是一个多变元迭代的过程, 通过不断改进轨道参数以使理论测量值与实测值尽量接近。具体算法较为成熟, 读者可参见文献[13], 此处不再赘述。

在天地基数据的融合处理过程中, 需特别注意观测设备坐标的差异。对于传统的地基望远镜观测数据, 观测设备的坐标通常由其地理经纬度和高度计算给出, 相应的地理坐标参数为固定值; 对于天基观测的望远镜设备而言, 其位置时刻随着卫星的运动而变化, 相当于每个观测点均是在不同的测站观测所得, 因此在具体计算时需作特别处理。

2 协同监测试验任务过程

2.1 任务计划制定与执行

根据对1994PC1视星等的预测, 考虑到地基设备观测仰角限制(观测目标必须在地平仰角 5° 以上), 将本次试验的观测任务起止时间定为2022年1月17日—2022年1月21日。

近地小行星属于低速视运动目标, 观测时间窗口相对较长, 因此仅需要计算各设备观测目标的时间和指向序列作为观测计划输入。其中国家天文台所属的地基望远镜设备严格按照观测计划执行观测任务, 并将任务执行信息实时反馈回控制中心。其余设备(包括天基)在试验期内按照自身任务情况, 安排观测计划执行。

2.2 数据平台

为实现近地小行星天地基协同监测, 搭建了以B/S架构为基础的近地小行星数据交换试验平台。平台具备用户管理、数据管理的基本功能。平台用户可以通过网页浏览器登陆平台, 实现观测计划和观测数据的上传和下载。平台能够支持超过100个用户并发访问。足以支撑近地小行星天地基协同监测任务。

2.3 数据类型

由于参与本次试验的监测设备原任务模式不同, 因此试验中从各设备获取的观测数据类型并非统一, 分为如下几类。

1) 原始图像数据

本次试验共获取两类图像数据: 第一类是由地基望远镜和“仰望一号”获取的传统的FITS格式天文图像数据; 第二类是由“吉林一号”视频星获取的tif格式24 bit真彩色图像, 图像分为3个通道。

2) 天文定位数据

“仰望一号”卫星观测获取的图像数据由其数据处

理系统自动完成了图像处理, 因此接收到的就是天文定位数据, 即光学测角信息。

3) 天基星历数据

天基观测数据用于精密定轨需要辅以观测历元设备的精确位置数据, 因此参与本次试验的天基设备除了输出天基观测数据还提供了观测任务期间的星历数据。

3 数据处理分析

3.1 图像处理结果

经实测图像处理, 分别采用线检测法和扣减法对10 s级曝光和秒级曝光图像进行目标检测, 可有效自动识别观测图像中区别于恒星视运动的近地小行星。保证了对每一个安排了观测计划的时段都能够获取近地小行星有效的测角数据。在试验期间获得的赤经赤纬测量数据分布情况如图6所示。

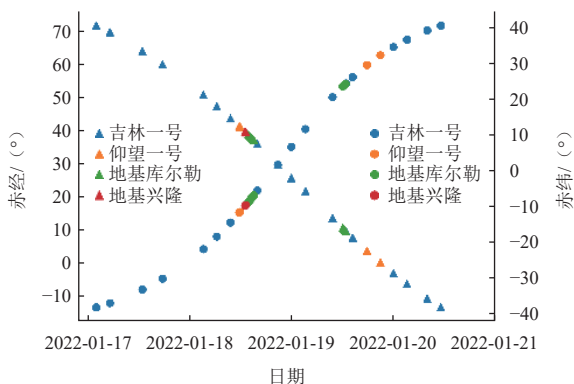


图6 测角数据分布图

Fig. 6 Distribution map of angle measurement data

其中“吉林一号”视频星的观测数据时间分布较宽, 其余设备观测数据主要分布于19日和20日。图像处理生成的测角数据精度, 本文将通过精密定轨的残差来体现。

3.2 精密定轨结果

利用参与试验的天地基设备获取的光学测角数据, 基于1.3.2节描述的精密定轨方法, 针对近地小行星编目更新和新目标发现两类任务场景, 开展精密定轨及其结果分析。

3.2.1 编目轨道更新效果分析

利用上述自主观测数据, 同时结合从小天体中心MPC下载的该小行星的所有历史光学数据, 选取其中从2022年1月19日往前的最近800 d内的历史观测数据一起进行精密定轨计算, 具体定轨结果如表2所示。

根据定轨结果的内符合残差均方根(Root Mean Square, RMS)来评估观测数据的精度。表2所列是所

有数据总体误差的反映, 赤经赤纬误差RMS均在2"内。下面按照观测设备分别统计分析其观测数据的精度及残差分布, 具体结果如表3所示。

表 2 编目轨道更新的精密定轨结果

Table 2 Precision orbit determination results for catalog orbit updates	
参数	计算结果
定轨历元 (北京时)	2022/1/19 20:42:21.822
黄道系Kepler根数	半长轴: 1.348 62 AU
	偏心率: 0.329 58
	倾角: 33.488 79°
	升交点黄径: 117.878 24°
	近日点辐角: 47.499 08°
RMS/(")	平近点角: 336.328 58°
	赤经: 1.67; 赤纬: 1.03

表 3 各设备观测数据定轨残差RMS统计

Table 3 RMS statistics of orbit determination residual errors of observational data of equipments			
类型	测站/卫星	RMS_RA/ (")	RMS_DEC/ (")
地基光学	库尔勒站	0.81	0.79
	兴隆站	0.61	0.49
	同时段MPC中测站Q33 ^① 数据	5.74	5.44
	同时段MPC数据 (除Q33外)	0.96	0.89
天基光学	“仰望一号”	2.70	0.83
	“吉林一号”	1.33	0.79

此外各测站观测数据对应的定轨残差如图7和图8所示。由上述结果可见, 地基设备中除MPC公布数据中测站“Q33”的数据残差较大 (约为5"±3") 外, 其余数据的残差基本均在同一量级。天基设备在赤经方向残差较大, 赤纬方向与地基设备残差水平相当。

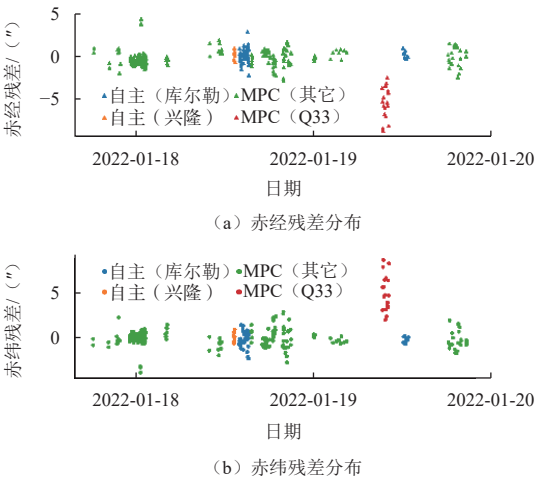


图 7 地基数据定轨残差分布图
Fig. 7 Distribution of residual errors in orbit determination based on foundation data

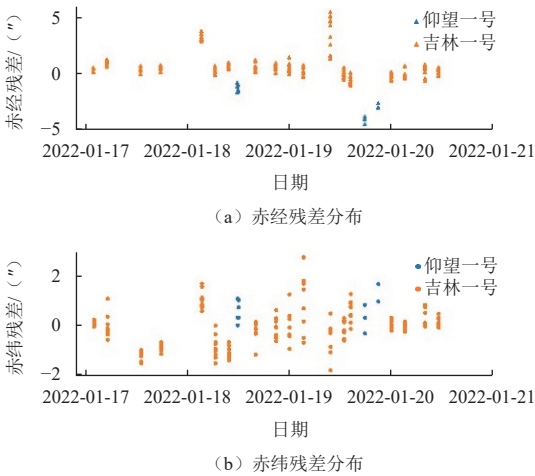


图 8 天基数据定轨残差分布图
Fig. 8 Distribution of residual errors in space-based data orbit determination

3.2.2 新发现近地小行星场景下的短弧定轨效果分析
为验证天地基协同监测对新发现近地小行星的定轨效果。此情形下, 仅使用自主探测的数据进行定轨。分3种情况进行定轨分析: ①Case1: 仅使用地基设备数据; ②Case2: 仅使用地基设备数据及与地基设备观测数据同时段的天基设备数据; ③Case3: 使用全部天地基数据。

Case1关注仅靠地基设备数据进行短弧定轨的效果, Case2关注天地基同时共视观测的短弧定轨效果, Case3关注天地基数据融合定轨效果。为量化分析定轨精度, 将3.2.1节编目轨道更新的精密定轨结果作为对比标准, 命名为Case 0。具体情况如表4所示。

表 4 3种不同情况的短弧定轨结果
Table 4 3 short-arc orbit determination results for different scenarios

参数	计算结果				
定轨历元 (北京时)	2022/1/19 20:42:21.822				
黄道系位置	X/AU	Y/AU	Z/AU	dr/km	
Case0: 比对标准	-0.465 222	0.864 241	0.004 708	—	
Case1: 地基	-0.465 185	0.864 254	0.004 721	6 243	
Case2: 地基 + 同时段天基	-0.465 220	0.864 242	0.004 709	515	
Case3: 地基 + 所有天基	-0.465 222	0.864 241	0.004 708	33	

表4中列出了不同数据情况下小行星在定轨时刻的黄道系位置矢量 (X,Y,Z), 以及3种情况下的位置误差dr。从中显见, 只有地基光学测角数据时 (Case 1), 位置误差为6 243 km, 当具有同时段天基观测数据一起进行融合定轨时 (Case 2) 位置误差即可下降至515 km, 即误差下降一个量级; 若所有自主天地基均使用 (Case 3), 误差可进一步降至约33 km, 即位置误差相比纯地基数据下降了2个量级。此处融入天基数

①Q33是日本北海道大学奈良天文台 (Nayoro Observatory, Hokkaido University) 在小行星中心MPC的测站编号。

据带来的精度提升包括两方面原因:一是加入了同时段的天基数据后,将Case1中由两个地基站组成的约2 600 km的观测基线延长至超过7 300 km(Case 2),显著增强了观测数据对轨道参数的几何约束;二是天基观测增加了观测数据分布的总时长(如图6所示),增强了观测数据对轨道参数的动力学约束(如Case 3相对Case 2的提升)。

4 结 论

本文描述了基于现有设备开展的近地小行星天地基协同监测和精密定轨试验。试验调用了2台地基望远镜设备和2颗天基卫星对近地小行星1994PC1进行了为期4 d的协同观测。观测计划和数据经近地小行星数据交换试验平台进行分发和汇集。通过图像处理和精密定轨分析,得出如下结果:

利用现有天地基设备仅通过观测模式 and 数据处理方法的适应性设定或改造能够实现对近地小行星观测。基于建立的近地小行星数据交换试验平台进行观测计划和数据的分发和汇集,可实现近地小行星天地基联合监测的任务流程。当前图像处理方法和精密定轨方法能够实现较高精度的近地小行星天地基监测数据处理。从定轨残差判断地基监测数据精度整体略优于MPC数据精度,天基监测数据精度略低于MPC数据精度。从新发现近地小行星定轨的角度,天基监测数据的加入,一方面天地基设备拉开了观测基线,显著增强了观测数据的轨道几何约束;另一方面由于扩展了观测时长,增加了轨道动力学约束。两个方面共同作用,对新发现近地小行星的定轨精度提升有明显效果,如本文算例中两种场景下计算的位置误差可分别下降1个量级和2个量级。

后续将开展现有天基设备对更暗弱近地小行星的观测模式和图像处理技术研究和试验。并进一步加入对近地小行星雷达观测和数据处理,验证雷达监测近地小行星的相关技术,分析雷达监测对天地基近地小行星定轨的作用。

致 谢

关于本文中天基监测相关工作,感谢长光卫星技术股份有限公司试验前期对卫星观测能力的分析以及试验过程中提供“吉林一号”视频星观测数据;同时感谢起源太空(南京)科技有限公司提供“仰望一号”对近地小行星的观测数据。

参 考 文 献

[1] MATTHEW D, LINDLEY J, RENATA K, et al. National near-Earth

object preparedness strategy and action plan for near-Earth object hazards and planetary defense[C]//Proceedings of Interagency Working Group for Detecting and Mitigating the Impact of Earth-Bound Near-Earth Objects. Washington: White House Office of Science, Technology, and Policy (OSTP), 2023.

- [2] STOKES G H, BRENT W B, WILLIAM F B, et al. Update to determine the feasibility of enhancing the search and characterization of NEOs[R]. USA: NASA, 2017.
- [3] NATHAN M. Comparing NEO search telescopes[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2016, 128(962): 045004.
- [4] YANG H, KIM M J. Observation campaign of (99942) Apophis in the 2021 apparition[C]//Proceedings of Apophis T-7 Years: Knowledge Opportunities for the Science of Planetary Defense. USA: USRA/LPI, 2022.
- [5] IVEZIC J A. LSST: comprehensive NEO detection, characterization, and orbits[C]//Proceedings of the International Astronomical Union. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [6] SONNETT S, MAINZER A. NEOCam/NEO surveyor survey cadence: discovery, self-follow-up, and orbital quality[C]//Proceedings of 51st Lunar and Planetary Science Conference. Texas: USRA/LPI, 2020.
- [7] SONG Y Z. Near-Earth asteroids orbit determination by DRO space-based optical observations[C]//Proceedings of EGU General Assembly. Austria: EGU, 2023.
- [8] 胡寿村, 季江徽, 赵玉晖, 等. 嫦娥二号飞越小行星试验中图塔蒂斯轨道确定与精度分析[J]. *中国科学: 技术科学*, 2013, 43: 506-511.
HU S C, JI J H, ZHAO Y H, et al. Orbit determination and accuracy analysis of asteroid Toutatis in Chang'e 2 flyby[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2013, 43: 506-511.
- [9] CHESLEY S R, OSTRO S J, VOKROUHLICKY D, et al. Direct detection of the Yarkovsky effect via radar ranging to the near Earth asteroid 6489 Golevka[J]. *Science*, 2003, 302: 1739-1742.
- [10] PÉREZ-HERNÁNDEZ J A, BENET L. Non-zero Yarkovsky acceleration for near-Earth asteroid (99942) Apophis[J]. *Communication Earth & Environment* 2022, 10 (3): 99507.
- [11] LIU X H, YANG X Y, GAN Z T, et al. Measuring the orbit drift of near-Earth asteroids by the yarkovsky effect[J]. *The Astrophysical Journal*, 2023, 950(1): 50.
- [12] 解延浩, 马驰, 钟兴, 等. 基于“吉林一号”视频卫星的天基空间目标观测研究[J]. *空间碎片研究*, 2019(4): 13-20.
XIE Y H, MA C, ZHONG X, et al. Research on space-based space target observation based on “Jilin-1” video satellite[J]. *Space Debris Research*, 2019(4): 13-20.
- [13] 刘林, 汤靖师. 卫星轨道理论与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.

作者简介:

刘静(1970-), 女, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向: 空间碎片和近地小行星监测预警。

通信地址: 北京市朝阳区大屯路甲20号国家天文台(100101)

电话: (010)64807705

E-mail: liujing@bao.ac.cn

程昊文(1984-), 男, 高级工程师, 硕士生导师, 主要研究方向: 空间碎片和近地小行星监测预警。本文通信作者。

通信地址: 北京市朝阳区大屯路甲20号国家天文台(100101)

电话: (010)64807876

E-mail: hwcheng@bao.ac.cn

Experiments on Space-Ground Cooperative Monitoring and Precise Orbit Determination of Near-Earth Asteroids

LIU Jing^{1,2}, CHENG Haowen^{1,2}, YANG Zhitao^{1,2}, LI Dawei^{1,2}, CAO Li^{1,2},
JIANG Hai^{1,2}, LI Yang^{1,2}, WANG Huachao^{1,2}

(1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the Space Debris Experiment Telescope of the National Astronomical Observatories of the Chinese Academy of Sciences, together with the Yangwang-1 and Jilin-1 satellites, a space-based and ground-based collaborative monitoring experiment for near-Earth asteroids was designed and carried out. By using image processing and orbit determination methods, target detection and astronomical positioning of observation images were realized, and the orbit of near-Earth asteroids was precisely determined. Based on the analysis, the existing equipment can realize space-ground collaborative monitoring and orbit cataloging of near-Earth asteroids, and provide orbital data support for the study and estimating of impact risk of near-Earth asteroids.

Keywords: near-Earth asteroids; space-based and ground-based collaborative monitoring; precise orbit determination; data fusion

Highlights:

- The demonstration and verification of the whole technical process of space-based and ground-based joint monitoring and data processing, including mission planning, joint monitoring, data collection, image processing, precise orbit determination, etc.
- It verifies the effectiveness of precision orbit determination using space-based and ground based joint monitoring data in two mission scenarios of near-Earth asteroid cataloging update and new target discovery.
- The observation of near-Earth asteroids by remote sensing satellites was realized through the modification of observation mode and experimental design, and the image processing method suitable for short exposure was adopted.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]