

GSSAP 卫星在轨应用研究与成像仿真分析

王久龙¹, 王 锐^{1,2}, 张鲁薇^{1,2}, 陈新龙³, 陈维春³, 郭继唐³, 蔡 盛^{1*}

1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
3. 中国空间技术研究院 钱学森空间技术实验室, 北京 100094

摘 要: 针对高轨抵近威胁在轨自主感知问题, 总结归纳了地球同步轨道空间态势感知计划的发展历程、平台情况、轨道特性、任务操控、总体指标; 分析了 GSSAP (Geosynchronous Space Situational Awareness Program) 卫星的抵近观测成像模式, 提炼出绕飞成像、掠飞成像在轨运行模式, 深入研究了近年来 GSSAP 卫星两行轨道数据, 结合我国高轨卫星的轨道信息, 挖掘出 GSSAP 对我国高轨卫星的数十次潜在的抵近侦察活动; 基于实测数据分析了 GSSAP-4 抵近实践-20 卫星的整个过程, 计算出二者的相对距离、太阳相位角等信息, 在距离为 10~133 km、太阳相位角为 44.67°~134.37°的条件下, 对 GSSAP 的光电载荷进行了成像效果仿真。结果表明: GSSAP 对我国 GEO (Geosynchronous Orbit) 卫星执行了多次抵近监视, 在口径为 500 mm, F 数为 10, 像元间距为 6.5 μm , 像素规模为 1024×1024, 积分时间为 20 ms 时, GSSAP 在顺光观测条件下, 可以对目标进行高分辨率的精细化成像, 能够看清目标的细节信息, 对我国 GEO 高价值资产带来严重威胁。

关键词: 高轨态势感知; GSSAP 卫星; 抵近观测; 绕飞成像; 掠飞成像; 太阳相位角
中图分类号: V474.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220759

0 引 言

地球同步轨道 (Geosynchronous Orbit, GEO) 是太空中的战略要地, 运行着通信卫星、数据中继卫星、电子侦察卫星、导弹预警卫星以及气象卫星, 高价值目标的密集分布使得高轨成为了太空战场的“马六甲海峡”^[1]。随着航天任务范围的不断扩大, 对高轨卫星的应用朝着天基态势感知^[2]、非合作目标特性获取^[3]、在轨操控控制^[4]、交会与接近^[5]等新型航天任务扩展, GEO 区域逐渐成为各国关注的焦点, 相关技术也成为国际竞争的前沿。

为控制该战略要地、确保自身太空优势, 美军在其军事战略、先进技术和财力支持下, 部署了大量空间攻防装备^[6]。2006 年 6 月美国以一箭双星的方式发射了卫星技术试验卫星 (MiTEx)^[7], 运行在准地球

同步轨道, 进行 GEO 目标近距离成像技术验证。在 MiTEx 卫星技术基础上, 美国空军提出了“地球同步轨道空间态势感知计划”(Geosynchronous Space Situational Awareness Program, 简称 GSSAP), 通过对高价值目标的严密跟踪与监视, 掌握每颗卫星的任务功能、构型配置、性能指标、活动规律等信息, 并了解意图、过程和效果, 以强化太空态势的单向透明优势^[8]。

纵观公开文献, 国内学者从多个方面对 GSSAP 卫星进行了研究分析, 刁华飞等人^[9]首次归纳总结了 GSSAP 卫星的平台情况、轨道情况及卫星的任务操控, 并仿真分析了观测距离、观测角度对其成像能力的影响; 宋瑞等人^[10]通过对 GSSAP 系列卫星的能力进行分析, 总结出高轨巡视卫星的能力现状和规律性行为; 肖余之等人^[11]结合高轨目标的轨道特性和光照

收稿日期: 2023-02-15; 修订日期: 2023-03-25

基金项目: 中国科学院青年创新促进会会员资助项目 (2019226); 吉林省产业技术研究与开发项目 (2022C046-2)

作者简介: 王久龙, 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事光电载荷成像仿真方面的研究。

通讯作者: 蔡盛, 男, 研究员, 博士, 主要从事空天地一体化光电对抗方面的研究。

特性,开展了高轨目标顺光成像的机动控制、告警相机视场精准配置、目标三维重建以及实践情况等研究;王典军等人^[12]基于 GSSAP 的历史轨道数据和典型观测事件,分析并研判了 GSSAP 卫星的总体设计和在轨运行模式,提炼出漂移巡视、机动巡视和抵近等在轨运行策略,并通过仿真分析比较了不同工况下的效能。上述学者在 GSSAP 卫星总体设计、工作模式、轨道特性等方面的研究取得了一定的进展,有效促进了我国天基空间态势感知技术的发展。但针对 GSSAP 历史轨道数据所蕴含的情报信息挖掘力度不够,缺乏 GSSAP 卫星在轨应用的深度分析,对 GSSAP 成像能力的研究较为粗浅,没有结合实际星历数据深入分析。

文中对 GSSAP 卫星的发展历程、平台情况、轨道特性、任务操控、总体指标进行了研判分析,深入研究了卫星的历史星历数据,分析并统计了潜在的在轨应用案例;开展了卫星在抵近目标过程中的动态光学成像仿真实验,模拟了不同观测距离、不同太阳相位角对成像效果的影响,相关研究对开展高轨卫星平台威胁自主感知、主被动自卫防护、空间博弈对抗、在轨维护与监视等任务具有重要的价值和意义。

1 整体情况

1.1 卫星概述

GSSAP (见图 1) 是美国空军最新的空间态势感知卫星,具备 GEO 轨道持续监视和抵近详查能力,星上搭载高分辨率光学相机和高性能电子侦察设备,可对目标进行“拍照”和“窃听”,图像分辨率达到厘米级,可看清目标天线、传感器等细节信息;同时也能够

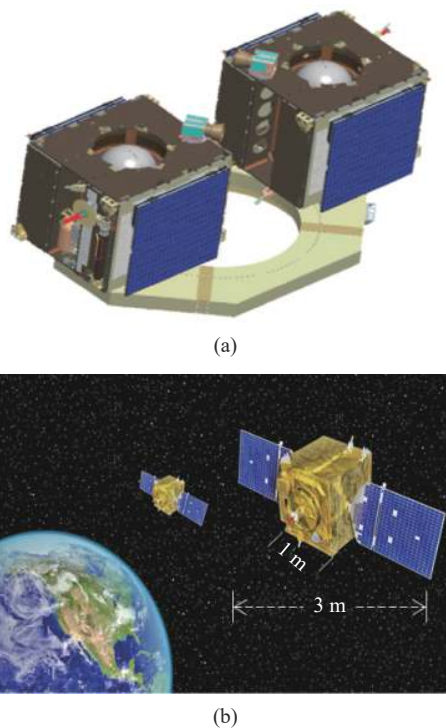


图 1 (a) GSSAP 一箭双星运载布局示意图; (b) GSSAP 卫星在轨运行示意图

Fig.1 (a) Diagram of GSSAP satellite carrier layout; (b) GSSAP satellite in orbit

窃听目标发射的无线电信号,用于目标卫星身份识别和行为活动判断的指标。

据公开资料显示,目前已经部署 6 颗 GSSAP 卫星(见表 1),运行在 GEO±50 km 附近,通过双星/多星的组网运行,具备网络化、体系化的协同作战能力,使美国高轨空间目标的探测和识别能力得到进一步提升。GSSAP-1/2 于 2014 年 7 月 28 日发射,2015 年 9 月具备初始作战能力;GSSAP-3/4 于 2016 年 8 月

表 1 GSSAP 卫星基本信息

Tab.1 GSSAP satellites basic information

Satellite	COSPAR ID	Name	Launch date	Platform	Carrier rocket	Current orbit parameters
GSSAP-1	2014-043 A	USA 253	2014.07.28	GEOStar-1	Delta-4 M+(4,2)	36 826 km×36 775 km, 2.026°
GSSAP-2	2014-043 B	USA 254	2014.07.28	GEOStar-1	Delta-4 M+(4,2)	36 116 km×36 107 km, 1.322°
GSSAP-3	2016-052 A	USA 270	2016.08.19	GEOStar-1	Delta-4 M+(4,2)(upg.)	35 768 km×35 762 km, 0.848°
GSSAP-4	2016-052 B	USA 271	2016.08.19	GEOStar-1	Delta-4 M+(4,2)(upg.)	35 748 km×35 742 km, 0.817°
GSSAP-5	2022-006 A	USA 324	2022.01.21	-	Atlas-5	35 703 km×35 697 km, 0.167°
GSSAP-6	2022-006 B	USA 325	2022.01.21	-	Atlas-5	35 704 km×35 698 km, 0.343°

19 日发射, 2017 年 9 月具备初始作战能力; GSSAP-5/6 于 2022 年 1 月 21 日发射, 比原计划推迟两年, 推测在技术上进行了重大升级改进, 尤其是对成像探测系统的改进, 解决了传统光学成像对逆光目标无法有效探测的能力缺陷, 同时基于新技术体制实现了有效载荷的轻小型工程化。

GSSAP 卫星获取的目标图像、无线电信号通过美国太空部队卫星控制网 (Space Force Satellite Control Network, SFSCN) 的地面站传输, 数据发送到位于科罗拉多州施里弗空间部队基地的第 9 太空三角洲部队 (Space Delta 9) 的第 1 太空作战中队。据美国军事与航空电子网站 2020 年 3 月 27 日报道, 美太空军第 1 太空作战中队已经完成 GSSAP 地面系统的大规模升级, 升级后的系统于 2019 年 12 月完成试验, 2020 年 2 月 12 日通过作战验收。

截止到 2022 年 10 月 8 日, 根据美国空军第 18 太空控制中队对外公布的数据显示, GSSAP-1 轨道半长轴 43 179 km (GEO+1 015 km), 倾角 2.026°; GSSAP-2 轨道半长轴 42 490 km (GEO+326 km), 倾角 1.322°; GSSAP-3 轨道半长轴 42 143 km (GEO-21 km), 倾角 0.848°; GSSAP-4 轨道半长轴 42 124 km (GEO-40 km), 倾角 0.817°; GSSAP-5 轨道半长轴 42 078 km (GEO-86 km), 倾角 0.167°; GSSAP-6 轨道半长轴 42 079 km (GEO-85 km), 倾角 0.343°。

1.2 轨道特性

GSSAP 卫星通常运行于近地球同步轨道 (GEO±50 km, GEO=35 793 km), 形成相对 GEO 轨道向西漂移或向东漂移的巡视模式。经调研得知, GSSAP-1 早期执行全球巡视详查, 目前已进入坟墓轨道, GSSAP-2 早期执行 120°E~0°W 的区域巡视, 目前全球区域漂移^[12]。

图 2(a) 所示为 GSSAP-1 近 3 年的轨道高度和星下点经度变化情况, 经分析得出, 此期间主要执行东半球 GEO 轨道巡视, 并极有可能于 2021 年 2 月 1 日进入坟墓轨道。图 2(b) 所示为 GSSAP-2 近三年的轨道高度和星下点经度变化情况, 经分析得出该期间主要执行整个 GEO 轨道的巡视。

图 3(a) 所示为 GSSAP-3 近 3 年的轨道高度和星下点经度变化情况, 此期间轨道变化频繁, 大部分时

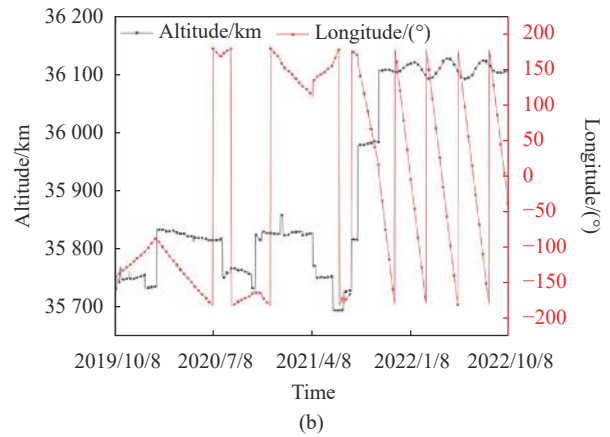
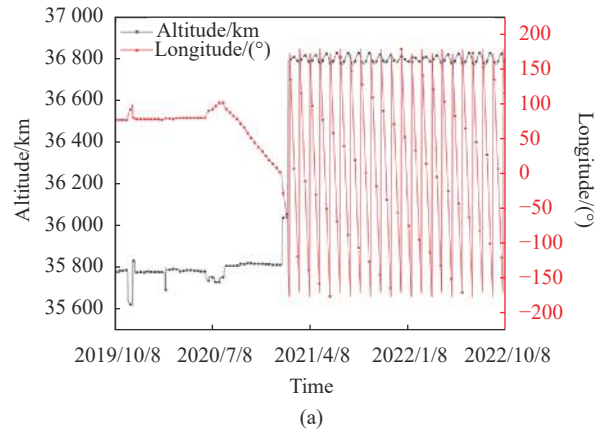
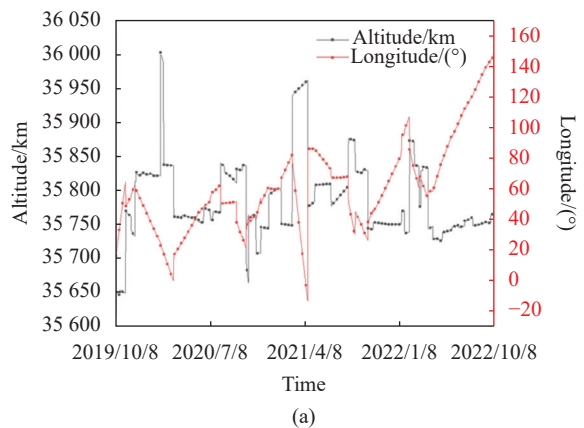


图 2 (a) GSSAP-1 轨道高度和星下点经度; (b) GSSAP-2 轨道高度和星下点经度

Fig.2 (a) GSSAP-1 altitude and longitude; (b) GSSAP-2 altitude and longitude

间运行在 GEO±50 km 轨道上, 但也出现 GEO±150 km 的情况, 主要负责执行 0°E~100°E 巡视任务。图 3(b) 所示为 GSSAP-4 近三年的轨道高度和星下点经度变化情况, 主要运行在 GEO±50 km, 主要负责执行 50°E~180°E 巡视任务。



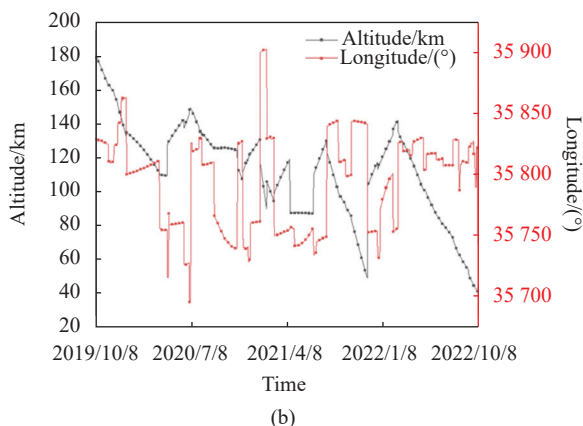


图 3 (a) GSSAP-3 轨道高度和星下点经度; (b) GSSAP-4 轨道高度和星下点经度

Fig.3 (a) GSSAP-3 altitude and longitude; (b) GSSAP-4 altitude and longitude

2022 年 4 月 19 日, 美军才正式对外公布 GSSAP-5/6 的星历数据。从图 4(a) 所示的 GSSAP-5 轨道变化情况可知, 初始轨道高度保持在 35 785 km, 从 5 月 2 日开始降低轨道高度, 到 6 月底时降到 35 708 km; 此后逐渐抬升轨道, 至 8 月中旬升至 GEO 上方 30 km 处; 8 月下旬开始降低轨道高度, 经过 1 个月的轨道漂移, 最终定轨在 35 697 km; 巡视范围为 43°W~2.6°E, 大多数时间以每天 0.5°~1.2°的速度由西向东漂移。从图 4(b) 所示的 GSSAP-6 轨道变化情况可知, 初始轨道高度保持在 35 733 km, 5 月 2 号开始抬升轨道, 整个 5 月份一直保持 35 812 km; 6 月份轨道高度一直保持在 35 725 km, 此后 7、8 月份经过多次轨道调整, 最终定轨在 35 697 km; 巡视范围为 46°W~2.7°E, 大多数时间以每天 0.4°~1.1°的速度由西向东漂移。

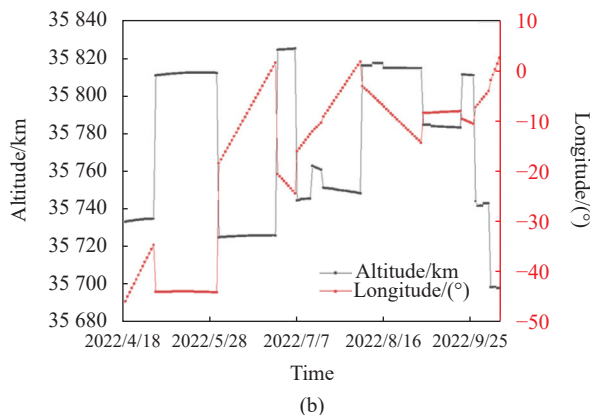
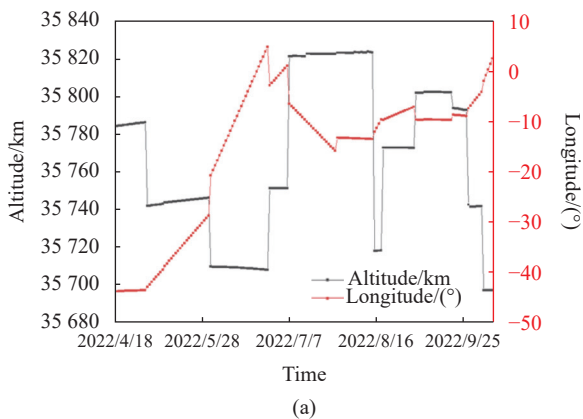


图 4 (a) GSSAP-5 轨道高度和星下点经度; (b) GSSAP-6 轨道高度和星下点经度

Fig.4 (a) GSSAP-5 altitude and longitude; (b) GSSAP-6 altitude and longitude

1.3 设计研判

参考文献 [12] 对 GSSAP 卫星的主要战技指标进行了综合研判, 文中结合相关资料 [13] 给出了一些结论性数据。单颗 GSSAP 卫星的质量约为 650~700 kg, 本体几何尺寸约为 1 m×1 m 左右; 供电系统由 2 个可展开的太阳电池翼构成, 面积约为 6 m², 有效功率为 200 W (可扩展至 1500 W); 卫星平台为 GEOStar-1, 设计寿命 5~8 年, 有效载荷 150 kg, 主推进系统采用双组元主发动机, 具有 310 s 的比冲, 可提供高达 1000 m/s 的速度增量, 使卫星能够在任务过程中完成多种类型的轨道机动, 轨道微调和定点保持机动则采用单组元推进模式; 外形为一体结构, 光学相机未安装转台, 对目标跟踪均采用平台机动; 卫星姿态确定由星敏感器和陀螺仪完成, 指向精度优于 0.4 mrad; 姿态控制采用高扭矩反作用轮, 姿态机动速度为 1.0 (°)/s; 轨道确定和授时基于 GPS 实现, 定位精度为 50 m。

2 在轨应用事件

2.1 抵近观测模式

GSSAP 卫星对目标的抵近观测模式有两种, 即绕飞和掠飞。绕飞模式适用于共面目标, 掠飞模式适用于异面目标 [14]。共面交会问题中, 两个航天器运行轨道的倾角小于 0.05°; 在异面交会问题中, 两个航天器运行轨道的倾角大于或等于 0.05° [15]。

GSSAP 卫星对目标绕飞的轨迹为椭圆, 东西方向 (前后方向) 为长半轴, 上下方向为短半轴, 长半轴

与短半轴的比例约为 2 : 1, 如图 5(a) 所示。在掠飞观测模式下, GSSAP 卫星的轨道一般在目标下方 30~

50 km 处, 利用轨道漂移实现对目标的成像侦察, 如图 6 所示。

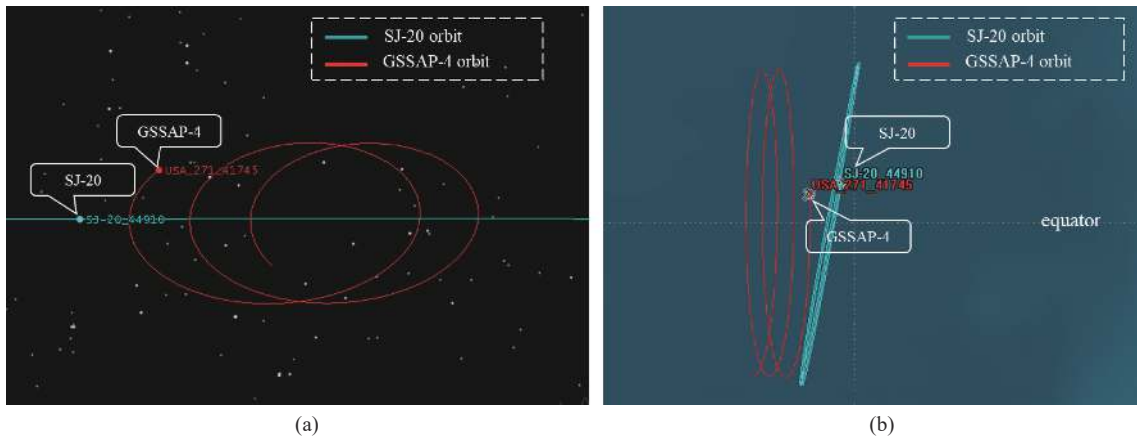


图 5 (a) GSSAP 绕飞抵近 3D 示意图; (b) GSSAP 绕飞抵近 2D 示意图

Fig.5 (a) GSSAP fly-around approaching orbit 3D visualization; (b) GSSAP fly-around approaching orbit 2D visualization

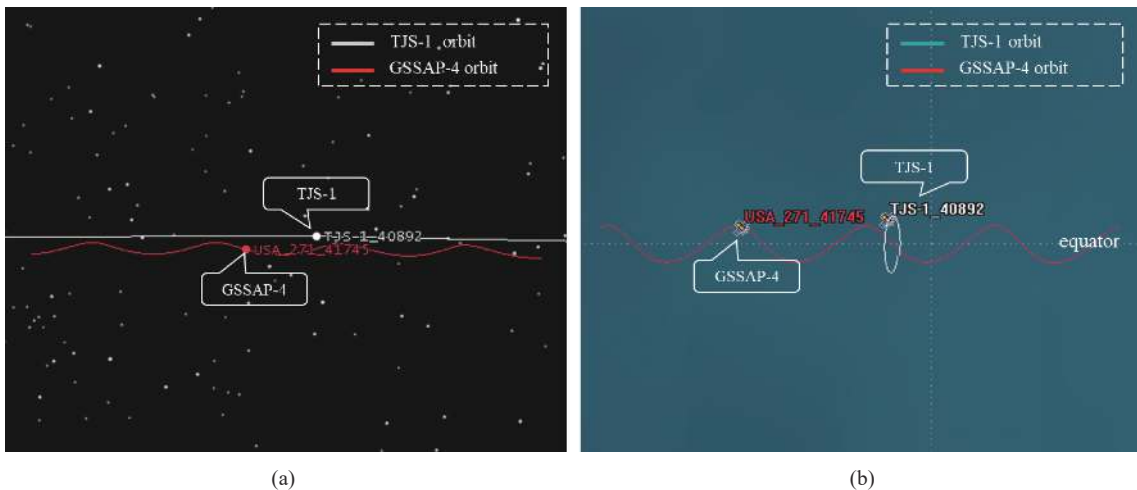


图 6 (a) GSSAP 掠飞抵近 3D 示意图; (b) GSSAP 掠飞抵近 2D 示意图

Fig.6 (a) GSSAP fly-by approaching orbit 3D visualization; (b) GSSAP fly-by approaching orbit 2D visualization

2.2 抵近事件分析

根据俄罗斯科学院 ISON 空间监测网络数据显示, GSSAP 卫星自具备作战能力以来执行了数百次机动, 并以 10~15 km 的距离完成了对俄罗斯、中国、巴基斯坦等国多颗卫星的抵近侦察^[16], 表 2 统计了部分抵近事件。

GSSAP 卫星频繁的抵近行为对我国高价值空间资产的安全造成了严重威胁; 同时, 美军系列空间攻防技术试验, 揭示了其阻断我国应用空间的能力和目 标。笔者利用卫星两行轨道数据 (TLE) 对其工作模

式、在轨活动进行了深入研究分析。选取 GSSAP-1~4 在 2020~2021 期间的 TLE 数据, 其中 GSSAP-1 有 198 行、GSSAP-2 有 246 行、GSSAP-3 有 124 行、GSSAP-4 有 86 行; 同时获取我国在轨大部分 GEO 卫星在相同时间段内的 TLE 数据, 利用轨道分析工具计算出 GSSPA 和目标卫星之间的距离, 以 1000 km 左右为抵近判定的依据, 得到潜在的数十次的抵近事件, 被抵近的目标有北斗导航系列、通信试验系列、实践系列等 GEO 卫星, 最近距离达到了 9.54 km(实践-20), 详细信息如表 3 所示。

表 2 被 GSSAP 抵近侦察的卫星

Tab.2 Satellites being closely scouted by GSSAP

Date	Satellite approached	Country	Range/km
2016-09-13	TJS-1	China	15
2017-07-13	Express AM-8	Russia	10
2017-09-14	Luch	Russia	10
2017-09-21	Paksat 1 R	Pakistan	12
2017-09-29	Nigcomsat 1 R	Nigeria	11
2017-10-05	Blagovest	Russia	14
2017-11-17	Raduga-1 M 3	Russia	12
2018-05-14	Raduga-1 M 2	Russia	13
2020-08-23	SJ-20/Chinasat 6 A	China	24
2022-01	SJ-12 01, SJ-12 02	China	73

通常以太阳相位角^[17]来描述目标、观察者、太阳的几何关系,即 GSSAP-太阳连线与 GSSAP-目标连线的夹角,不同相位角条件下,目标的亮度信息变化较大。通过对表 3 中列出的数十次抵近事件分析,得出了 GSSAP 抵近过程中的太阳相位角的变化情况,如图 7 所示,即 GSSAP 抵近时的太阳相位角一般保持在 40°~160°之间,此时目标位于 GSSAP 的顺光观测区,可有效规避太阳杂散光对成像的影响;而 GSSAP 位于目标的逆光区,导致无法精确、实时的探测到空间抵近威胁。

表 3 被 GSSAP 抵近的我国高轨卫星

Tab.3 China GEO satellites being approached by GSSAP

Date	GSSAP	Satellite approached	COSPAR ID	Range/km	Longitude	Mode
2020-02-26	GSSAP-1	TIANLIAN_2-01	2019-017 A	88.40	79.786°E	Fly-around
2020-02-28	GSSAP-1	BD-2_G8	2019-027 A	109.97	79.786°W	Fly-around
2020-04-8	GSSAP-4	SJ-13	2017-018 A	360.13	110.846°E	Fly-around
2020-11-01	GSSAP-4	SJ-20	2019-097 A	11.60	124.940°E	Fly-around
2020-11-23	GSSAP-4	SJ-13	2017-018 A	101.94	110.605°E	Fly-by
2020-11-30	GSSAP-4	TJS-2	2017-001 A	53.38	107.448°E	Fly-by
2021-01-01	GSSAP-3	TJS-3 AKM	2018-110 C	469.62	59.621°E	Fly-around
2021-03-19	GSSAP-4	TJS-2	2017-001 A	28.37	107.435°E	Fly-by
2021-04-16	GSSAP-3	TJS-3	2018-110 A	1 141.25	86.098°E	Fly-around
2021-05-03	GSSAP-3	SJ-20	2019-097 A	1 032.06	86.090°E	Fly-around
2021-05-04	GSSAP-4	SJ-20	2019-097 A	9.54	87.421°E	Fly-around
2021-05-06	GSSAP-4	TJS-3	2018-110 A	104.29	87.641°E	Fly-around
2021-09-30	GSSAP-4	SJ-20	2019-097 A	54.71	87.576°E	Fly-by
2021-12-02	GSSAP-4	TJS-5	2020-002 A	56.70	107.546°E	Fly-by

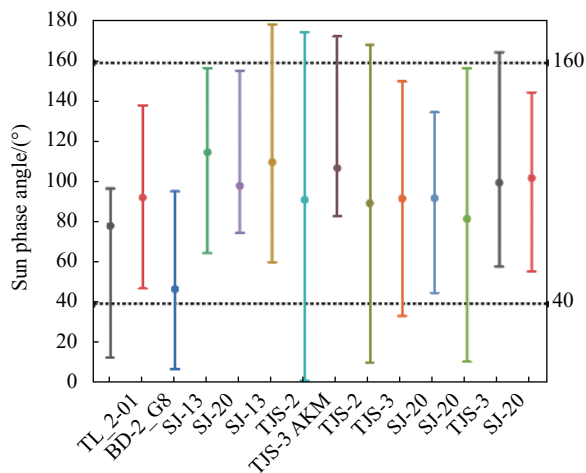


图 7 GSSAP 的太阳相位角

Fig.7 The sun phase angle of GSSAP

3 仿真分析

3.1 仿真环境设置

空间光学遥感器的成像仿真是个复杂的系统工程,需要对各个环节进行精细建模,模型的精度直接影响最终仿真结果的真实性和可信度。GSSAP 的成像仿真过程可以分为三个步骤:目标与背景建模、光电传感器建模、场景成像模块。GSSAP 成像仿真的每个步骤之间的输入、输出和数据流关系如图 8 所示。

据 Breaking Defense 网站披露, GSSAP-4 于 2021 年 8 月下旬对中国目前最大、最重的通信卫星-实践-

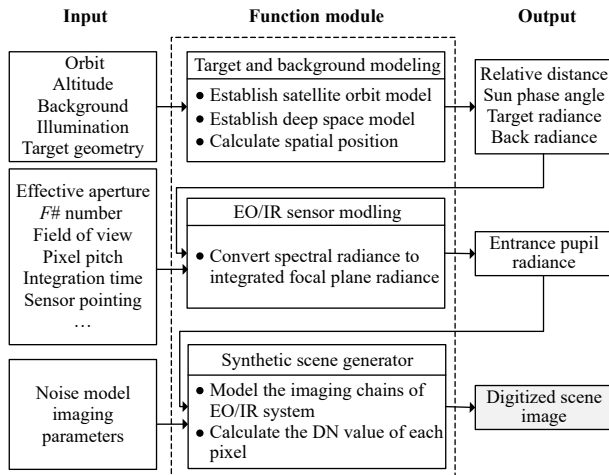


图 8 GSSAP 成像仿真流程图

Fig.8 Flow chart of GSSAP imaging simulation process

20 实施了抵近伴飞^[18]。因此选取 GSSAP-4 抵近实践-20 的场景为例,分析抵近过程中时成像效果。通过分析 TLE 数据得出, GSSAP 与实践-20 星的最近距离达到 9.54 km, 并处于有利的太阳相位角, 达到了顺光成像观测目的。GSSAP-4 与实践-20 的相对距离和太阳相位角变化趋势如图 9 所示。

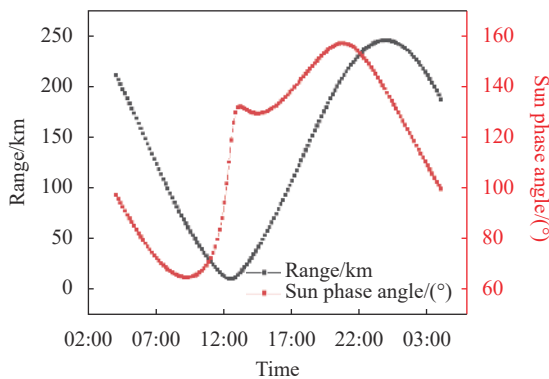


图 9 GSSAP 的相对距离与太阳相位角

Fig.9 Relative distance of GSSAP and sun phase angle

3.2 成像参数设置

笔者结合了卫星平台的总体情况、载荷的质量约束、在轨典型的作战模式等信息研判, 推测出其光电成像有效载荷的口径为 500 mm, $F\#$ 为 10, 像素规模为 1024 pixel \times 1024 pixel, 像元间距为 6.5 μm , 探测波段为 450~680 nm, 积分时间为 20 ms, GSSAP 的有效载荷详细参数如表 4 所示。

表 4 GSSAP 有效载荷参数

Tab.4 GSSAP payload parameters

Parameters	Values
Effective aperture/mm	500
$F\#$	10
Field of view/(°)	0.076 \times 0.076
Pixel pitch/ μm	6.5
Integration time/ms	20
Spectral wavelength/nm	450-680
Number of pixels/pixel	1024 \times 1024
Instantaneous field of view/(")	0.268
Dynamic range	3000
Reference noise equivalent irradiance/ $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	1.0 \times e-15
Reference saturation equivalent irradiance/ $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	3.0 \times e-12

3.3 成像仿真分析

GSSAP-4 在对实践-20 卫星抵近成像的过程中充分利用了顺光成像的优势, 借助轨道绕飞实现了对目标卫星多角度的精细成像。图 10 和图 11 展示了 GSSAP 抵近和离开实践-20 的成像效果, 该过程中 GSSAP 与目标之间的距离变化为 133.18 km \rightarrow 10.17 km \rightarrow 119.07 km, 太阳相位角保持在 134.37 $^{\circ}$ ~44.67 $^{\circ}$, 随着观测距离的减小和太阳相位角的变化, 探测器的成像效果也越来越好。当距离到达 50 km 时, 可获悉观测目标的大致结构, 当距离达到 20 km 时, 能够看到观测目标的具体细节。根据参考文献 [19] 中的探测器像元分辨率计算公式得知, 在距离观测目标 10 km 时, GSSAP 相机像元的空间分辨率为 1.3 cm, 此时可对观测目标进行高分辨率的精细成像, 从而发现目标本体、太阳帆板、有效载荷等更多细节信息。由此, 可以判断 GSSAP 卫星对目标的探测距离约为 100 km 左右, 抵近详查的观测距离在 10 km 左右。此外, 在不同的太阳相位角下, 相机受太阳杂散光影响, GSSAP 对目标成像效果差别较大, 因此在高轨观测时需要综合考虑太阳光照和观测角度问题, 选择合适的位置才能获得较好的成像结果。



图 10 GSSAP 抵近实践-20 的成像结果

Fig.10 The imaging results of GSSAP closing to SJ-20

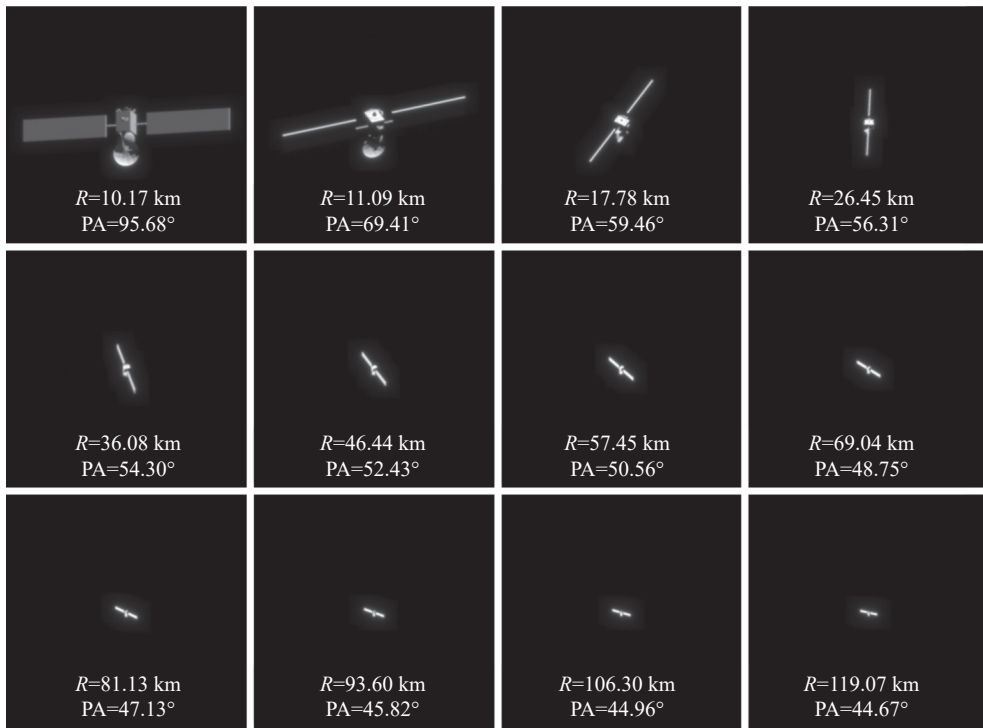


图 11 GSSAP 远离实践-20 的成像结果

Fig.11 The imaging results of GSSAP leaving from SJ-20

4 结束语

文中针对 GSSAP 卫星的总体设计、轨道特性、观测模式进行了分析研判,对 GSSAP 的历史星历数据进行了深入研究,挖掘出其对我国高轨 GEO 卫星的潜在抵近侦察事件,并对某次抵近过程进行了成像仿真分析。下一步需重点考虑相机有效口径、探测器积分时间、像元间距、噪声在一定范围内变化时,对成像效果以及探测能力的影响。针对高轨严峻的空间安全竞争态势,迫切需要研究和突破高精度交会与接近、近实时轨道异动感知、复杂光照条件下目标特性获取、多手段主动被防护等关键技术,以加强高轨空间高价值资产的自保护能力;此外,还需加快推进天地一体、分布式的态势感知网络建设,发展全维空间态势感知能力,实现对 GEO 目标的全天时、全天候的监视,确保太空环境安全和航天器运行安全。文中相关工作可为空间目标光学探测与识别、星载平台自主感知与对抗提供理论依据与数据支持,具有重要的工程应用价值。

参考文献:

- [1] Hu Haiying, Zhu Yongsheng, Jiang Xinhua. The development trend of high earth orbit space security and key technologies [J]. *Aerospace Control and Application*, 2021, 41(19): 155-161. (in Chinese)
- [2] Han Yi, Chen Ming, Sun Huayan, et al. Imaging simulation method of TG-02 accompanying satellite's visible camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(12): 1208002. (in Chinese)
- [3] Lu Qi, Lin Tingting, Li Chengpeng, et al. Improved registration algorithm for spatial non-cooperative target point cloud clustering [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(9): 20200431. (in Chinese)
- [4] Lu Shan, Xu Wei, Liu Zongming, et al. On-Orbit manipulation technique for spacecraft in HEO [J]. *Journal of Astronautics*, 2014, 35(4): 425-431. (in Chinese)
- [5] Du Ronghua, Zhang Xiang, Wang Ning, et al. Research on autonomous detection and tracking method for rendezvous and proximity of an uncooperative target [J]. *Journal of Astronautics*, 2021, 42(5): 621-633. (in Chinese)
- [6] Gong Jinggang, Ning Yu, Lv Nan. Development and enlightenment of space based situational awareness technology for high orbit in the united states [J]. *Aerospace Control and Application*, 2021, 47(1): 1-7. (in Chinese)
- [7] Meng Bo, Huang Jianbin, Li Zhi, et al. Introduction to american approaching operation satellite mix in geostationary orbit and its inspiration [J]. *Spacecraft Engineering*, 2014, 23(3): 112-118. (in Chinese)
- [8] Fan Zhihan, Cai Yaxing, Li Fengzan. Study on development of american space-based situational awareness technology for geo objects [J]. *Spacecraft Engineering*, 2019, 28(6): 87-95. (in Chinese)
- [9] Diao Huafei, Zhang Yasheng. Analysis of US geosynchronous satellite capability us situational awareness [J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2019, 35(4): 48-51. (in Chinese)
- [10] Song Rui, Song Xumin, Gao Yong, et al. Status and capability analysis of typical roving satellites in high orbit [J]. *Aerospace China*, 2021(10): 44-48. (in Chinese)
- [11] Xiao Yuzhi, Chen Jizheng. Autonomous situation awareness of GEO objects based on orbital maneuver [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2021, 42(1): 1-10. (in Chinese)
- [12] Wang Dianjun, Wu Guanqun, Han Lu, et al. Analysis and research on GSSAP observation [J]. *Aerospace Control and Application*, 2022, 48(3): 22-28. (in Chinese)
- [13] Spaceflight101. GSSAP satellite overview[EB/OL]. (2016-09-11)[2022-10-08]. <https://spaceflight101.com/spacecraft/gssap/>.
- [14] Yuan Jianping. Dynamics of Spacecraft Orbital Maneuver[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2010. (in Chinese)
- [15] Gao Zetian. Maneuver scheme planning of the close-range rendezvous for the high earth orbit spacecraft[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [16] Brian Weeden, Victoria Samson. Global counterspace capabilities: An open source assessment[D]. US: Secure World Foundation, 2022.
- [17] Li Jun. Research on key technologies of space objects surveillance and tracking in space-based optical surveillance[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019. (in Chinese)
- [18] Breaking Defense. US, China, Russia Test New Space War Tactics: Sats Buzzing, Spoofing, Spying[EB/OL]. (2021-10-28)[2022-10-19]. <https://breakingdefense.com/2021/10/us-china-russia-test-new-space-war-tactics-sats-buzzing-spoofing-spying/>.
- [19] Song Mingzhu, Qu Hongsong, Zhang Guixiang, et al. Design of aerospace camera circular scanning imaging model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(7): 0708001. (in Chinese)

On-orbit application research and imaging simulation analysis of GSSAP satellite

Wang Jiulong¹, Wang Rui^{1,2}, Zhang Luwei^{1,2}, Chen Xinlong³, Chen Weichun³, Guo Jitang³, Cai Sheng^{1*}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun 130033, China;

3. Qian Xuesen Laboratory of Space Technology, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract:

Objective Geosynchronous orbit is a strategic location in space. It contains communications satellites, data relay satellites, electronic reconnaissance satellites, missile early warning satellites and weather satellites. With the continuous expansion of space mission scope, the application of GEO satellites has been extended to new space missions such as space-based situational awareness, acquisition of non-cooperative target characteristics, in-orbit control, rendezvous and proximity, etc. GEO region has gradually become the focus of attention of various countries, and related technologies have also become the forefront of international competition. In order to control this strategic area and ensure its superiority in space, the US military, supported by its military strategy, advanced technology and financial resources, has deployed a large amount of space offensive and defensive equipment. The United States Air Force put forward the Geosynchronous Space Situational Awareness Program (GSSAP). Through close tracking and monitoring of high-value targets, it can master the mission function, configuration, performance indicators, activity rules and other information of each satellite, and understand the intention, process and effect, so as to strengthen the one-way transparency advantage of space posture. Therefore, it is necessary to conduct in-depth research and analysis on the development history, platform condition, orbit characteristics, mission control and overall index of GSSAP satellite.

Methods A portable imaging simulation process is built in this paper. GSSAP imaging simulation system includes target and background modeling, photoelectric sensor modeling, scene imaging generator (Fig.8). The event of GSSAP-4 close to Shijian-20 was selected as the research object (Fig.9). The phase angle and relative distance between GSSAP-4 and Shijian-20 satellite were calculated. The parameters of GSSAP electro-optical sensor were selected, with a 500 mm aperture (Tab.4). The imaging effect of GSSAP EO/IR sensor on Shijian-20 satellite was simulated (Fig.10).

Results and Discussions The sun phase angle between GSSAP and the target was calculated, which is generally kept between 40° and 160° (Fig.7). At this time, the target was located in the down-light observation area of GSSAP, which can effectively avoid the influence of solar stray light on imaging. The sun phase angle and relative distance between GSSAP-4 and Shijian-20 satellite were calculated (Fig.9). The closest distance of them was 9.54 km. The imaging effects of GSSAP-4 were simulated at different distance and sun phase angle (Fig.10-11). At a distance of 10 km, the target body, solar panels and payload can be clearly seen.

Conclusions In this study, the approach imaging mode of GSSAP satellite is analyzed, and the on-orbit operation mode of orbiting imaging and grazing imaging is extracted. The two-lines elements of GSSAP satellites in recent years were studied. Combined with the orbital information of Chinese high-orbit satellites, dozens of potential

close-in reconnaissance activities of GSSAP for Chinese high-orbit satellites were found out. Based on the measured data, the whole process of GSSAP-4 close to the Shijian-20 was analyzed, and the relative distance and solar phase angle of the two were calculated. Under the conditions of distance of 10-133 km and solar phase angle of 44.67° - 134.37° , the imaging effect of GSSAP electro-optical sensor was simulated. The results show that GSSAP has carried out multiple close-in surveillance of China GEO satellites. When the aperture is 500 mm, F number is 10, pixel pitch is $6.5\ \mu\text{m}$, pixel number is $1\ 024\ \text{pixel} \times 1\ 024\ \text{pixel}$, and integration time is 20 ms, high-resolution fine imaging can be carried out on the target, and the details of the target can be clearly seen, which brings a serious threat to the high value assets of GEO in China.

Key words: geosynchronous situational awareness; GSSAP satellite; close-in observation; fly-around imaging; fly-by imaging; solar phase angle

Funding projects: Youth Innovation Promotion Association, Chinese Academy of Sciences (2019226); Industrial Technology Research and development Project of Jilin Province (2022C046-2)