0254-6124/2019/39(6)-800–09 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

YU Shunjing, GONZALEZ Francois, WEI Jianyan, ZHANG Shuangnan, CORDIER Bertrand. SVOM: a joint GRB detection mission (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2019, **39**(6): 800-808. DOI:10.11728/cjss2019.06.800

中法天文卫星 (SVOM) 伽玛暴联合探测任务 *

余舜京 [1,2] GONZALEZ François [3] 魏建彦 [4]

张双南 [5] CORDIER Bertrand [6]

1(中国科学院微小卫星创新研究院 上海 201210)

2(国防科技大学 长沙 410073)

3(法国国家空间研究中心 图卢兹 31401)

4(中国科学院国家天文台 北京 100012)

5(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

6(法国原子能和替代能源委员会宇宙学研究所 巴黎 91191)

摘 要 中法天文卫星 SVOM 是中法两国合作的伽玛暴探测任务, 由中国国家航天局 (CNSA) 和法国国家空间研究中心 (CNES) 批准立项, 中国科学院负责总体研制. SVOM 是继美国 SWIFT 任务之后最重要的伽玛暴多波段探测项目, 是一颗功能强大的天文卫星, 具有多波段观测、快速机动、灵活操作及地面后随观测能力. SVOM 将开创一个非常广阔的探测领域. 本文介绍了项目组织、任务目标、卫星和有效载荷、地面段以及运控概念.

关键词 中法天文卫星, 伽玛暴, 光学望远镜, 伽玛射线监视器, 硬 X 射线相机, 软 X 射线望远镜

中图分类号 P 171

SVOM: a Joint Gamma-ray Burst Detection Mission

YU Shunjing[1,2] GONZALEZ Francois [3] WEI Jianyan[4]

ZHANG Shuangnan[5] CORDIER Bertrand [6]

1(*Innovation Academy for Microsatellites, Chinese Academy of Sciences, Shanghai* 201210)

2(*National University of Defense Technology, Changsha* 410073)

3(*Centre National d'Etudes Spatiales, Toulouse* 31401)

4(*National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100012)

5(*Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

6(*CEA/IRFU, Paris* 91191)

Abstract SVOM (Space-based multi-band astronomical Variable Objects Monitor) is an interna-

* 国家重点基础研究发展计划项目 (2014CB845800) 和国家民用航天专项共同资助

2018-07-02 收到原稿, 2019-02-18 收到修定稿

E-mail: yusj@microsate.com

tional cooperation project. It is led by Chinese National Space Agency (CNSA) and Centre National d'Etudes Spatiales of France (CNES). SVOM focuses on the detection of GRB (Gamma-Ray Burst). It is developed by Chinese Academy of Sciences (CAS), CNES and several other French laboratories. With multi-wavelength observation, rapid slew capability, flexible operation and ground follow-up observation, the SVOM project will be the most important GRB detection mission after the SWIFT project and will open a wide exploration field. In this paper, its management, science objectives, satellite platform and payloads, ground segment and operation concept are illustrated.

Key words SVOM (Space-based multi-band astronomical Variable Objects Monitor), γ-Ray Burst, VT (Visible Telescope), GRM (Gamma Ray Monitor), ECLAIRs, MXT (Microchannel X-ray Telescope)

0 引言

中法天文卫星 SVOM (Space-based multi-band astronomical Variable Objects Monitor) 是中国国家航天局和法国国家空间研究中心联合开展的伽玛暴探测任务. 中国科学院负责总体, 联合中国科学院有关研究所以及中国和法国相关研究单位共同研制. 该项任务的科学研究由中国科学院国家天文台负责. SVOM 项目是继美国 SWIFT 任务之后最重要的伽玛暴多波段探测项目 [1,2], 具有多波段探测、快速机动、灵活操控以及地面后随观测能力, 将开创一个广阔的探测研究领域 [3]. SVOM 项目的科学目标包括开展伽玛暴、宇宙学和多信使 (Multi-Messenger) 天体物理学研究.

SVOM 能够对经过升级的下一代引力波探测器 (升级的 Virgo/LIGO) 以及高能中微子探测器 (KM3NeT, IceCube) 发现目标的电磁对应体进行观测. SVOM 计划于 2021 年在西昌卫星发射中心发射, 轨道高度 625 km, 轨道倾角 30°.

卫星有效载荷配置如下.

(1) 两个宽视场高能探测载荷: 硬 X 射线相机 (ECLAIR), 伽玛射线监视器 (GRM).

(2) 两个窄视场望远镜: 软 X 射线望远镜 (MXT), 可见光望远镜 (VT).

(3) SVOM 卫星地面观测设备: 地面广角相机阵 (GWAC), 能够实时覆盖部分 ECLAIRs 视场; 两个 1 m 级地面自动后随观测望远镜 (GFT).

当探测到伽玛暴时, 其位置信息在很短时间内通过 VHF 网络传送到地面. VHF 信号被分布于赤道两侧的 45 个 VHF 地面接收站接收. 系统将这些信息通过互联网发送到 SVOM 地面系统 (GWAC, GFT) 以及全球天文界.

1 科学背景

伽玛暴 [4] 是出现在 X 射线和伽玛射线能段上的快速剧烈的闪耀现象, 其在空间均匀分布, 持续时间从几个毫秒到几百秒. 伽玛暴产生于短暂并且指向地球的相对论喷流 [5]. 相对论喷流来自大质量恒星塌缩新形成的黑洞或两个中子星合并后新形成的黑洞或者磁中子星. 伽玛暴的余辉晚于瞬时辐射并发生在多个波段, 在 X 射线和光学波段持续几天到几个星期, 而在射电波段可以持续几年. 这些短暂的辐射提供了研究伽玛暴前身星及与喷流有关物理过程的关键信息 [6,7]. 伽玛暴发生在极远的宇宙学距离且具有超乎寻常的亮度, 因此成为探测早期宇宙和一些重大天体物理问题的有力手段.

由于伽玛暴持续时间短, 需要空间载荷及地基大望远镜的警报系统迅速反应. 对 X 射线和伽玛射线的研究是由多波段载荷和具有快速指向能力的卫星平台协同工作来完成余辉演化测量的. 针对引力波和中微子天文学带来的多信使天文学新机遇, 需要在 SWIFT 任务的后期以及 SWIFT 任务结束之后, 通过一个新的多波段伽玛暴空间天文台继续开展伽玛暴探测以及快速多波段后随证认和跟踪观测, 且需要新的探测卫星在高红移伽玛暴、伽玛暴宽波段能谱以及光学余辉深度后随观测方面比 SWIFT 任务的能力强. 因此, 中国国家航天局和法国国家空间研究中心决定联合实施专门用于伽玛暴研究的项目 [8], 即 SVOM 项目. SVOM 项目主要科学目标为: 发现

和快速定位各种伽玛暴; 全面测量伽玛暴的电磁辐射性质; 探测、分析伽玛暴及其余辉, 研究宇宙演化和暗能量.

SVOM 项目将对各种类型伽玛暴开展探测研究并快速可靠地提供其位置信息. 这些伽玛暴中高红移和低光度伽玛暴将被重点关注. 此外, SVOM 项目将同时测量伽玛暴能谱的形状和时变特性. 因此, SVOM 应具有快速证认余辉及对探测到的余辉提供亚角秒精度位置的能力, 并判断发现的伽玛暴是否具有较高红移 (包括红移大于 6)[2].

SVOM 是由多个伽玛暴探测和观测仪器组成的多波段天文台, 其同时能够为伽玛暴以外的天文研究做出贡献. 例如, SVOM 卫星将对宽视场天文仪器如引力波探测器 (升级的 Virgo 和 LIGO) 和高能中微子探测器 (KM3NeT, IceCube) 探测到的源对应的天区进行详查 [2].

在下一个十年运行中, SVOM 将与多信使时代同步, 通过寻找瞬变源和利用其他各种设备进行后随观测, 其探测结果将为时域天文学研究提供重要数据支撑 [9,10].

2 中法任务分工

根据中法两国签订的合作协议, 中国国家航天局与法国国家空间研究中心将在工程研制及在轨运控方面开展合作 (见图 1), 双方分工合作如下.

(1) 工程由中方负责, 部分研发由法方负责.

(2) 双方在系统层面开展平等合作 (如系统定义、实施与测试).

(3) 中方负责卫星总体及研制平台, 中法双方分别提供载荷.

(4) 中方负责运载与发射场, 在西昌卫星发射中心采用 LM-2C 火箭发射 SVOM.

(5) 中方负责在轨运控, 地面段由双方联合设计、分别建设. 中方地面段由任务中心、控制中心、科学中心组成, 法方地面段由载荷操作中心、VHF 网络、科学中心组成.

3 任务概念

SVOM 将为全球天文界快速发布伽玛暴位置、瞬时辐射的主要特性以及早期余辉亮度的信息. 同时, 为了保证参与 SVOM 项目各方的科学回报, 将为 SVOM 参与者提供宽波段的详细瞬时辐射数据、早期余辉多波段测量结果、可见波段的瞬时辐射探测能力以及长时间覆盖和高时间分辨率的可见光光变曲线高统计样本 [11].

伽玛暴的探测任务只占 SVOM 可观测时间的一小部分 (约 25%), 高灵敏度的多波段在轨仪器可以在剩余时间内完成对选定的非伽玛暴科学课题进行研究, 包括地球环境、超新星、星系观测及 X 射线巡天等. 对非伽玛暴科学观测的限制是除由 SVOM 科学委员会决定的具有高优先权的紧急观测, 例如地面大望远镜探测到的极端事件等之外, 不能与伽玛暴的探观测发生冲突.

SVOM 总任务可以分成三个具有不同科学目标的子任务 [2].

(1) 核心目标 (CP). 由一个伽玛暴自动触发观测

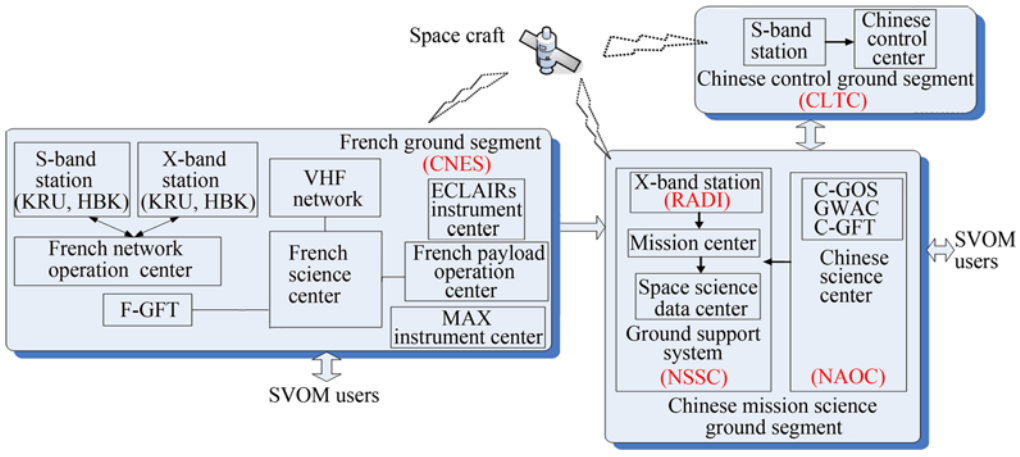


图 1 SVOM 地面系统构成与分工

Fig. 1 Composition and sharing of the responsibilities of SVOM ground segment

系统组成. 这些触发是不可预测的, 观测优先于其他各种类型的观测. 核心任务的科学目标是对各种已知类型的伽玛暴开展探测, 获得快速可靠的位置信息, 对瞬时辐射开展从可见光到 X 射线的能谱形状测量, 同时测量其时变特性.

(2) 机遇目标 (ToO). 对应特定并紧急的观测需求. 例如, SVOM 提供有用的信息帮助引力波探测器完成探测实验, 通过搜索和短伽玛暴在时空上重合的引力波信号帮助引力波探测器 (升级的 VIRGO 和 LIGO) 提高剔除噪声的能力.

(3) 常规目标 (GP). 利用窄视场载荷 (MXT 和 VT) 对一些之前被证认的已知目标以及目标的顺序观测. 在观测的重要天体物理源中, 活动星系核、BLAZARS 天体、极亮 X 射线源和激变变星是首选的目标. 这些宽波段的观测将对极端天体辐射过程的物理研究提供独特信息. 目标的观测安排主要基于每年一次对下一年的观测征集申请方案的数据库.

此外, SVOM 还将在任务期间对仪器进行定期定标. 在任务期间, 任何偶然发生的事件和紧急观测申请都可以打断正在进行的观测任务, SVOM 卫星的目标重新调整策略能最大程度满足核心目标、机遇目标和常规目标的观测 [12].

为实现以上目标, 在以下两个阶段定义了不同运行模式: 在设定的 3 年 SVOM 寿命期间, 核心 (CP) 目标有最大的优先权; 在扩展的 2 年寿命期间, 提高机遇目标 (ToO) 和常规目标 (GP) 的重要性.

4 SVOM 系统

SVOM 系统 [13] 的特点包括反太阳指向、位置信息快速发布、多波段载荷、可见光谱段以及近红外谱段 (对于红移大于 6 的伽玛暴特别重要) 后随观测和快速红移估计. 整个系统主要由以下三部分组成 (见图 2).

(1) 卫星, 包括平台和载荷舱.

(2) SVOM 地面段, 包括中方控制地面段 (测控系统) 和任务科学地面段 (包括中方地面支撑系统, 中方和法方科学应用系统等).

(3) 运载和发射服务.

SVOM 卫星运行在约 600 km 高度、30° 倾角的圆轨道, 常规指向采用优化后的反太阳指向方案 (见图 3). 反太阳指向能够确保探测到的伽玛暴位于地球阴影一侧, 使地面望远镜在黑夜观测. 在反太阳指向的基础上, 需具体考虑以下因素: 避开 Sco X-1、银河带等对伽玛暴探测有影响的特殊天区; 保证所观测的天区有利于地面大望远镜的观测; 为载荷提供良好的热环境, 使其在姿态机动前后都不受太阳影响.

一般情况下, 卫星处于常规目标 (GP) 的观测模式. 当伽玛暴事件发生并被 ECLAIR 或 GRM 仪器

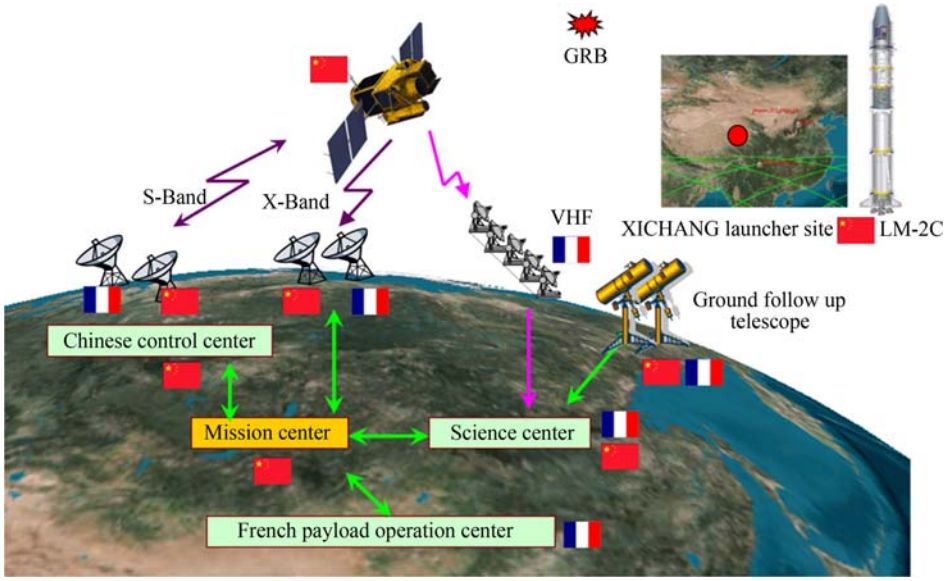


图 2 SVOM 系统组成

Fig. 2 SVOM system

探测触发时, 卫星自主机动并将观测到的伽玛暴目标源落入 VT 和 MXT 窄视场望远镜视场内. 这种情况下, 常规目标 (GP) 观测被中断, 并被目标触发观测序列取代, 卫星进入伽玛暴观测模式. 在伽玛暴观测结束时, 卫星恢复常规指向 [2]. 在首席科学家作出决定后, 可能会发生伽玛暴重访模式. SVOM 卫星有效载荷包括星上 4 台仪器和地面 3 台仪器. 星地之间通过星载 VHF 发射机将信息迅速发送至地面网络. 伽玛暴触发信息传输流程如图 4 所示.

SVOM 通过配置不同谱段的载荷仪器, 使其能够通过 ECLAIR 或 GRM 定位并测量射线能谱, 同时通过窄视场的可见光和软 X 射线谱段载荷进行后续测量并提高伽玛暴位置精度. ECLAIR 实现低能段伽玛射线成像与能谱测量, GRM 实现伽玛射线能谱测量.

除空间载荷外, SVOM 在地面还将安装两套地面广角照相机阵 (GWAC) 和两台地面后随观测望远镜 (C-GFT, F-GFT)[13], 以提高光学波段的灵敏度, 并将观测能力扩展到近红外谱段. 图 5 给出了 SVOM 空间段及地面段观测仪器观测响应时间和观测能段

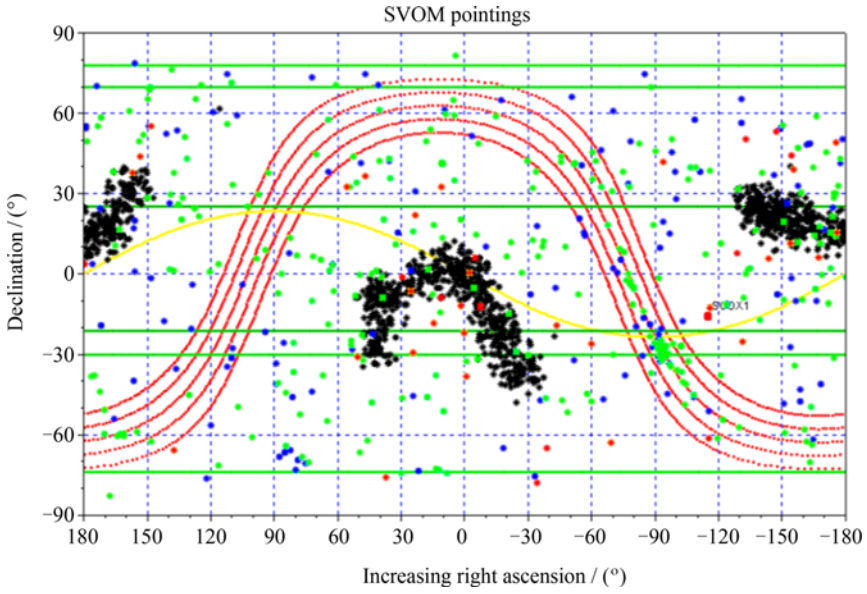


图 3 卫星 $+X_s$ 轴在天球上的指向轨迹

Fig. 3 Pointing track of the satellite $+X_s$ axis on celestial sphere

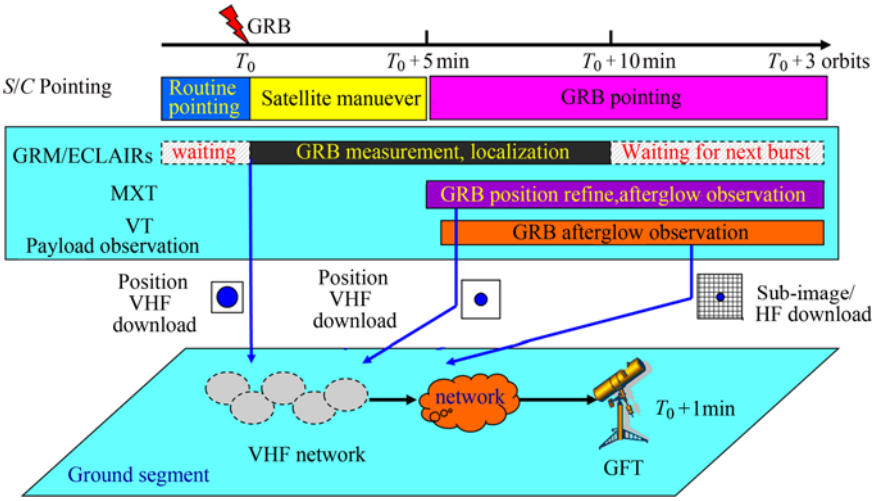


图 4 伽玛暴触发信息传输流程

Fig. 4 Information transmitting process of GRB trigger

分布. 载荷仪器主要指标列于表 1 和表 2.

系统设计要求方面, 在卫星探测到伽玛暴后的很短时间内, 地面后随观测望远镜、地面广角相机阵以及其他自动观测望远镜进行后随观测, 这需要有实时星地通信网络. 因此, 需要在沿赤道的地球低中纬度地区布置 VHF 接收网络以覆盖卫星轨道范围 [13]. VHF 报警网络的主要作用是卫星收到触发信息后几乎实时将位置信息传送到地面, 引导地面观测设备进行后随观测. 同时 VHF 将在 X 波段下传完整载荷数据之前传送一部分重要的载荷数据. 科学中心将对这部分数据进行分析, 决定下一步观测策略.

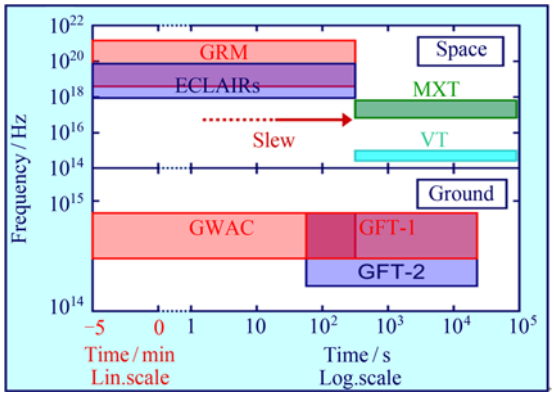


图 5 SVOM 空间段载荷与地面段仪器的光谱覆盖

Fig. 5 Spectral coverage of SVOM space-based and ground-based instruments

VHF 警报网络 [14] 能够调用大型地面望远镜 (例如 VLT) 对 SVOM 探测到的 GRB 光学余辉进行观测, 特别是准确地测定红移 (距离). 由于大型地面望远镜通常会提前安排观测计划, 要快速中断大型地面望远镜正在进行的观测程序并指向 SVOM 定位的光学余辉, 这取决于伽玛暴特性, 主要是对其红移 (距离) 的粗略估计. 伽玛暴目标距离越远, 越有利于地面大型望远镜观测.

可以预见, SVOM 将与一些自动望远镜直接连接, 如图 6 所示. 这些从专业和高效的望远镜 (例如 TAROT, LCOGT 望远镜) 中挑选出来的望远镜被称为预定的自动望远镜.

卫星观测数据下传后由科学地面段进行处理, 包括数据预处理、存储与检索、观测计划制定、载荷定标、数据产品加工与发布以及天文警报信息处理等. 数据产品的发布按照中法联合制定的 SVOM 数据政策进行, 观测到的初级天文警报实时向全世界发布, 数据产品有一年 (暂定) 的数据专有期, 之后向公众开放.

表 1 星上载荷主要性能指标

Table 1 Performance of the spaceborne payloads

星上载荷	波段范围	视场范围	定位精度
ECLAIRs	4~250 keV	89°×89°	优于 13′
GRM	0.015~5 MeV	±60° (单个探头)	约 5°
MXT	0.3~10 keV	64′×64′	优于 2′
VT	400~650 nm, 650~1000 nm	26′×26′	优于 1′

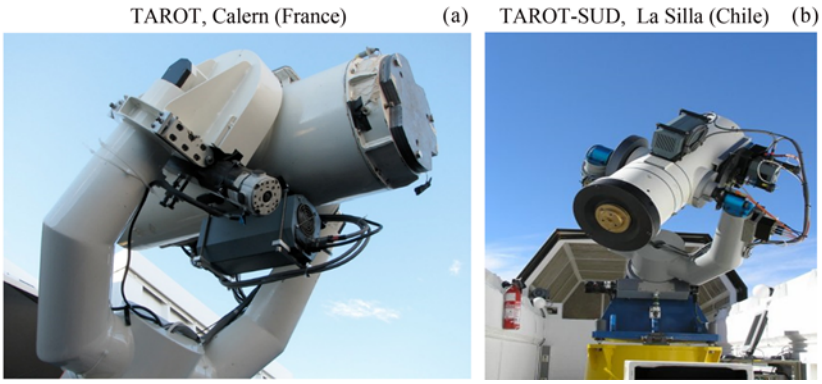


图 6 预定的自动望远镜

Fig. 6 Robotic telescopes

5 SVOM 结构与配置

SVOM 干重 950 kg, 功率 800 W, 外包络尺寸约为 2500 mm(直径)×2800 mm (高), 由卫星平台与有效载荷舱组成. 有效载荷舱集成中法双方的 4 个有效载荷, 与平台通过 4 个点进行机械连接. 卫星平台与有效载荷舱相对独立, 二者可以独立研制与装配, 最后进行整星集成.

5.1 载荷舱

载荷舱可以分为两大部分. 一是载荷舱模块, 该模块为载荷提供结构、热控以及电子学支持, 此外还包括载荷处理计算机、数传、VHF 发射机等服务模块. 为减小载荷间的热变形, 载荷舱设计了专用的光学基准板用于安装光学望远镜、软 X 射线望远镜和星敏感器, 保证载荷仪器、星敏感器之间有同一个光学基准. 二是 4 个载荷, 分别为 GRM, ECLAIRs, MXT 和 VT. SVOM 配置如图 7 所示.

(1) 伽玛射线监视器 (GRM)[15]. GRM 在硬 X 射线和软伽玛射线能段进行能谱观测 (0.05~5 MeV), 并对伽玛暴进行实时触发. GRM 包含三套 GRD 探测器和一台粒子监测器 (GPM). 每套 GRD 有效面积大于 200 cm^2, 指向与卫星主观测方向 $+X$ 向夹角成 30° (即仰角 30°)、周向 120° 均布, 三套 GRD 探测器组成约 2 sr 的综合视场, 定位精度约为 5°. 粒子监测器 GPM 在卫星经过 SAA 区时给出预警信息, 这些信息能够给仪器提供保护以及进行数据保护. GRM 载荷由中方负责研制.

(2) 硬 X 射线相机 (ECLAIR)[16]. ECLAIRs 对 GRB 触发并且提供位置信息, 具有很大的视场范围 (89°×89°), 采用编码孔径成像技术实现对 4~150 keV 能量范围的伽玛暴进行连续空间探测, 视场范围为 2 sr. 伽玛暴定位精度优于 13′. ECLAIRs 载荷由法方负责研制.

(3) 软 X 射线望远镜 (MXT)[16]. MXT 在软 X 射线能段探测并成像, 提供更高精度的伽玛暴定位信息, 同时获取 X 射线波段余辉观测数据. MXT 观测能段为 0.3~10 keV, 视场为 1°, 能够提供约 2′ 定位精度. MXT 载荷由法方负责研制.

(4) 可见光望远镜 (VT)[17]. VT 在光学谱段对伽玛暴进行在轨后随观测, 视场约 26′, 光学口径 400 mm, 拥有 400~650 nm 和 650~1000 nm 两个观测谱段, 能够提供优于 1′ 的定位精度. VT 仪器由中方负责研制.

表 2 地面观测仪器主要性能指标

Table 2 Performance of the ground-based instruments

地面观测仪器	波段范围/nm
GWAC	450~900
C-GFT	400~900
F-GFT	400~1700

5.2 卫星平台

卫星平台由中方自主研制, 能够适应 20°~145° 倾角、500~1500 km 轨道高度的不同类型轨道. 卫星平台包括结构、热控、姿轨控、电源、测控、星务、总体电路等分系统.

平台本体为框架面板式结构, 反作用轮组件安装

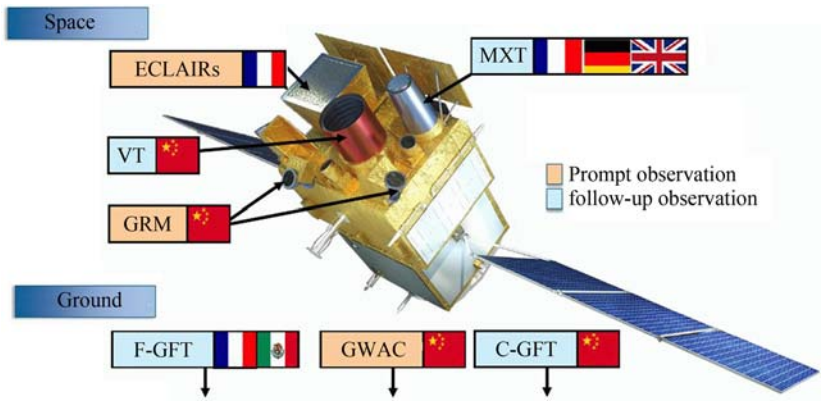


图 7 SVOM 配置

Fig. 7 SVOM configuration diagram

在支撑底板上, 其他服务分系统单机安装在 4 个侧板上. 该种结构布局形式紧凑, 能够最大限度地利用空间, 并且易于拆卸. 卫星采用一维转动太阳翼, 与运载器的机械接口为标准 1194 接口. 平台采用标准化、模块化设计方案, 包括平台与载荷独立模块化; 与载荷接口标准化; 采用集中式数据管理方案, 由星务计算机 (SMU) 统一管理姿轨控、热控、测控、与载荷电接口、监测和恢复管理 (FDIR) 等; 采用全冗余设计, 并通过高度集成的电子学实现质量、功耗的最小化和可靠性增强. 卫星平台结构与内部布局如图 8 所示.

6 进展

SVOM 分为方案、初样和正样三个研制阶段. 在方案阶段完成了结构热控星、电性星的研制以及相关试验, 目前正在开展初样鉴定星装配集成测试工作, 计划 2020 年初转入正样研制 (见图 9).

7 结论

SVOM 具有超强的多波段观测能力. SVOM 是一颗多功能天文观测卫星, 具有多波段观测能力以及灵活的地面操控和地面后随观测能力. SVOM 具有地面段 (GWAC, C-GFT + F-GFT) 以及空间段 (ECLAIRs, MXT, VT, GRM) 星地联合观测能力, 具有宽视场 (ECLAIRs + GRM + GWAC) 和窄视场 (VT + MXT + C-GFT + F-GFT) 相结合的观测能力, 具有从低能段 (近红外) 到高能段 (伽玛射线) 的宽波段覆盖能力. 因此, SVOM 能够实现对伽玛暴的全面研究, 同时还可以为新领域多信使天文学研究提供数据支持.

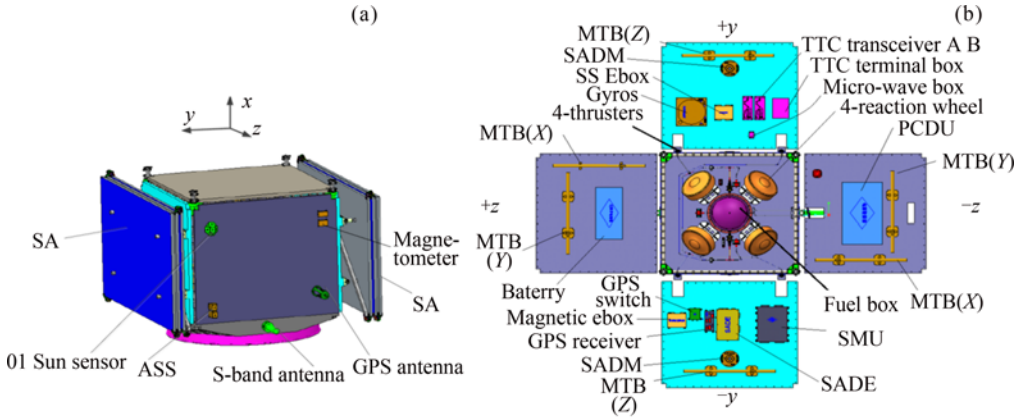


图 8 卫星平台结构 (a) 与内部布局 (b)

Fig. 8 Structure (a) and layout (b) of SVOM platform

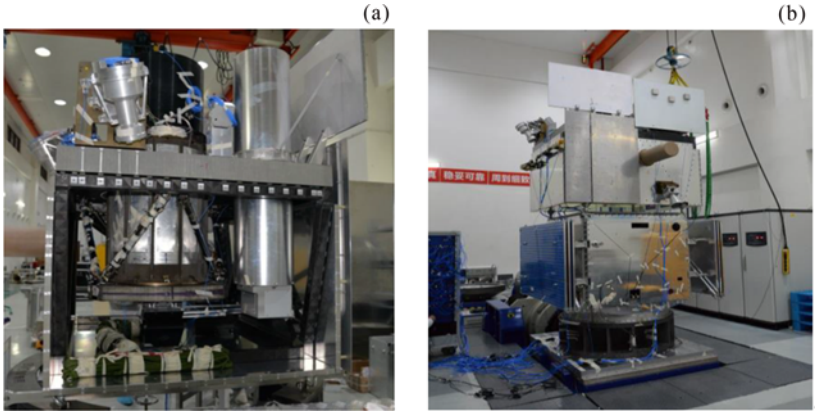


图 9 载荷舱装配 (a) 与结构星力学试验 (b)

Fig. 9 PL model integration (a) and mechanical test of the satellite structure (b)

SVOM 具有星地联合观测能力. SVOM 不但能够观测伽玛暴或者其他自主规划的目标, 而且能够对其他空间载荷或地面设备提供的报警信息进行快速响应.

SVOM 系统架构由中法双方分工负责, 整个系统能否成功取决于中法双方众多参与方能否完成各自任务, 因此系统管理是一大挑战. 此外, 将几项任务需求结合起来, 例如核心目标 (CP)、机会目标 (ToO) 或其他常规目标 (GP) 都需要有高通用性的星载自主能力. 2006 年以来, 中法合作不断深入, 2019 年开展初样鉴定星的装配集成测试, 双方正朝着 2021 年发射目标努力. SVOM 将成为下一个 10 年的卓越时域天文观测设备, 此时时域天文学将真正进入多波段、宽域天空覆盖和多信使时代.

参考文献

[1] WEI J Y, CORDIER B, ANTIER S, *et al*. The deep and transient universe: new challenges and opportunities – scientific prospects of the SVOM mission [OL]. arXiv: 1610.06892 [astro-ph.IM], [2016-10-21]. https://lanl.arxiv.org/

[2] WEI J Y, CORDIER B, ANTIER S, *et al*. The SVOM Gamma-ray Burst Mission [OL]. arXiv: 1512.03323 [astro-ph.IM], [2015-12-10], https://lanl.arxiv.org/

[3] PAUL J, WEI J Y, BASE S, *et al*. The Chinese-French SVOM mission for gamma-ray burst studies [J]. *Compt. Rendus Phys.*, 2011, **12**(3): 298-308

[4] KLEBESADEL R W, STRONG I B, OLSON R A. Observations of gamma-ray burst of cosmic origin [J]. *Astrophys. J.*, 1973, **182**: 85

[5] FRAIL D A, KULKARNI S R, SARI R, *et al*. Beaming in gamma-ray bursts: evidence for a standard energy reservoir [J]. *Astrophys. J.*, 2001, **562**: 55-58

[6] REES M J, MESZAROS P. Relativistic fireballs: energy conversion and time-scales [J]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 1992, **258**(1): 41-43

[7] PIRAN T. Gamma-ray bursts and the fireball model [J]. *Phys. Rep.*, 1999, **314**(6): 575-667

[8] WEI Jianyan. SVOM has been approved by CNSA [J]. *Chin. Natl. Astron.*, 2011, **6**: 40-41 (魏建彦. SVOM 天文卫星通过国家立项 [J]. 中国国家天文, 2011, **6**: 40-41)

[9] LACOMBE K, DEZALAY J P, HOURET B, *et al*. Spectral performance of ECLAIRs flight detectors on SVOM mission [J]. *Astrop. Phys.*, 2018, **103**: 131-141

[10] GODET O, PAUL J, WEI J Y, *et al*. The Chinese-French SVOM mission: studying the brightest astronomical explosions [C]//Proceeding SPIE 8443, Space Telescopes and Instrumentation 2012: Ultraviolet to Gamma Ray, 2012

[11] PAUL J, WEI J Y, BASA S, *et al*. The Chinese-French SVOM mission for gamma-ray burst studies [J]. *C R Phys.*, 2011(12): 298-308

[12] MERCIER K, GONZALEZ F,JOURET M, *et al*. The French payload on-board the SVOM French-Chinese mission [C]//Proceeding SPIE 9144, Space Telescopes and Instrumentation, Ultraviolet to Gamma Ray, 2014

[13] WAN M, WU C, WANG J, *et al*. Column Store for GWAC: a high-cadence, high-density, large-scale astronomical light curve pipeline and distributed shared-nothing database [J]. *Pub. Astron. Soc. Pacific*, 2016, **128**(969): 114501

[14] GONZALEZ F, YU S J. A French/Chinese cooperation for a Gamma-Ray burst mission [C]//Proc. SPIE 10699, Space Telescopes and Instrumentation, Ultraviolet to Gamma Ray, 2018

[15] ZHAO Tonghua. Research on the Performance of SVOM Satellite High Energy Scientific Payload [D]. Beijing: Institute of High Energy, Chinese Academy of Sciences, 2012 (赵佟华, SVOM 卫星高能科学载荷性能研究 [D]. 北京: 中国科学院高能物理研究所, 2012)

[16] MERCIER K, GONZALEZ F,JOURET M, *et al*. The French payload on-board the SVOM French-Chinese mission [C]//Proceeding SPIE 9144, Space Telescopes and Instrumentation, Ultraviolet to Gamma Ray, 2014

[17] WU C, QIU Y L, CAI H B. SVOM Visible telescope: performance and data process scheme [J]. *Proc. IAU Symp.*, 2013(279): 421-422