GECAM双星总体方案及关键技术

韩兴博¹, 张科科^{1*}, 黄佳¹, 余金培¹, 熊少林², 陈有梅¹, 李新乔², 齐金玲¹, 文向阳², 陈雯¹, 耿浩³

1. 中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 201203;

2. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;

3. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190

*联系人, E-mail: zkkzero98@tom.com

收稿日期: 2020-04-08; 接受日期: 2020-07-03; 网络出版日期: 2020-11-11

中国科学院战略性先导科技专项(二期) (编号: XDA15360100, XDA15360101)资助项目

摘要 引力波暴高能电磁对应体全天监测器(GECAM)是针对引力波天文学的重大研究机遇而提出的空间探测项目, 将对引力波高能电磁对应体(也称引力波伽马暴)进行时间和空间上的完整监测. 本文以卫星的科学和观测需求为基础, 提出了GECAM卫星系统设计思路和方案, 包括观测需求分析, 卫星轨道、姿态及工作模式设计, 各系统的组成及主要技术指标, 也总结了卫星的技术特点和解决方案, 包括双星全天视场暴发源定位技术、主平面对日卫星指向设计、基于北斗三号全球位置报告系统触发信息实时下传技术、低成本高可靠一体化设计电子学、高度集约化卫星电磁兼容设计. 通过系统设计及优化, GECAM卫星星座具有全天视场、高灵敏度、良好的定位精度和从X射线到伽马射线的宽能段覆盖, 同时能够在轨触发定位并实时下传探测结果, 满足科学研究对引力波高能电磁对应体的科学探测需求.

关键词 引力波, 高能电磁对应体, 全天监测器, GECAM卫星

PACS: 95.55.Ka, 95.40.+s, 07.87.+v

1 引言

引力波发现之后, 探测伴随引力波源产生的电磁辐射(即引力波电磁对应体)变得更加重要和紧迫, 成为最热门的研究领域之一. 双致密星并合引力波的电磁波对应体可能分布在各种能段, 具有不同的性质, 其中有一种持续时间短暂、与引力波延迟时间很小, 且辐射主要集中在X射线和伽马射线能区的引力波高

能电磁对应体, 它在观测上跟伽马暴相似, 因此称为引力波伽马暴^[1-4].

鉴于引力波及引力波伽马暴探测研究的重要意义, 中国科学院提出了“引力波暴高能电磁对应体全天监测器(GECAM)”项目. 针对其观测需求和特点, GECAM卫星系统由两颗160 kg级微小卫星组成, 不仅具有全天视场、高灵敏度、良好的定位精度和X射线到伽马射线能段覆盖能力, 同时能够在轨触发定位并利

引用格式: 韩兴博, 张科科, 黄佳, 等. GECAM双星总体方案及关键技术. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 129507

Han X B, Zhang K K, Huang J, et al. GECAM satellite system design and technological characteristic (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 129507, doi: [10.1360/SSPMA-2020-0120](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0120)

用北斗短报文实时下传在轨触发结果, 从而为其他望远镜^[5]提供宝贵的观测预警, 引导其进行后随观测.

GECAM卫星的科学目标是^[4,6]: (1) 全天监测引力波事件的高能电磁对应体, 发现最大样本的引力波伽马暴和新的辐射现象, 研究中子星、黑洞等致密天体及其合并过程; (2) 全天监测快速射电暴可能的高能辐射, 揭示其物理起源和辐射机制; (3) 全时监测各类特殊伽马暴和磁星爆发, 深入研究它们的爆发机制.

本文从GECAM的科学需求出发, 概述了卫星总体方案设计和卫星配置, 重点针对双星全天视场暴发源触发定位、非太阳同步轨道对地定向卫星能源获取、在轨触发信息实时下传、高度集约化低成本高可靠综合电子学设计、高度集约化卫星电磁兼容设计等卫星的关键技术进行了论述, 设计结果及初样测试结果表明, 卫星各项性能指标满足任务要求.

2 系统设计

2.1 卫星系统方案概述

基于GECAM任务需求和特点, GECAM卫星继承和借鉴了中国科学院微小卫星创新研究院WN100微纳卫星平台技术^[7], 并在此基础上进行了针对性改进和创新. 卫星由有效载荷、结构与机构、热控、综合电子、姿轨控、星务分系统六个分系统组成(见图1).

卫星构型采用模块化设计, 由载荷穹顶舱、载荷

电子学舱、综合电子模块舱段、能源模块舱段、姿控模块舱段及太阳电池阵机构组成(见图2). 为了保证充足的能源获取, 卫星创新性采用帆板斜装方案, 太阳电池阵在发射状态为平行于卫星本体, 通过压紧点固定在星体+X侧, 火工品解锁后, 太阳电池阵绕星体Y轴展开40°后锁定.

整星供电配置了1.2 m²太阳能电池阵和30 A·h锂离子电池组, 为了提高能源获取效率, 太阳电池阵功率调节创新性采用MPPT技术, 母线电压均钳位于蓄电池组电压, 为24.5–28.7 V. 整星配电采用集中管理为主、分散管理为辅的配电体制, 绝大部分单机的二次电由整星统一提供.

卫星姿控采用三轴稳定控制, 利用星敏感器与光纤陀螺组件作为主要定姿部件, 太阳敏感器和磁强计提供粗略定姿; 在轨控期间采用推力器进行控制, 在非轨控期间利用反作用轮组合进行三轴主动轮控, 并使用三轴磁力矩器对飞轮进行卸载, 同时考虑到卫星需每轨进行约360°偏航轴频繁机动, 针对性增配斜装飞轮以提高可靠性. 卫星轨控采用基于HAN推进剂的单组元推进系统, 在轨运行期间主要进行轨道高度维持和双星相位维持.

为了保证卫星各种工况的星地通信, 配置2个USB测控模块, 2副S波段测控接收天线以及2副S波段测控发射天线实现空间全向测控. 配置兼容北斗B1及GPS L1单频双模GNSS导航定位模块, 能够为载荷提供连

图1 GECAM卫星产品树

Figure 1 Product tree of GECAM satellite.

图 2 GECAM卫星构型示意图(图中为卫星坐标系)

Figure 2 GECAM satellite configuration schematic diagram (satellite coordinates are shown).

续的定位和校时服务, 定位精度优于20 m (1σ , J2000), 绝对时间精度优于10 μ s.

通过整星姿态设计, 保证了有效载荷运行热环境. 考虑到整星资源约束, 整星热控采用一体化设计思路, “被动热控为主、主动热控为辅”的设计理念, 同时为了降低载荷探头SiPM噪声并保证增益稳定性, 对探头部分采用多级隔热及主动加热的保障措施, 实现了载荷探头低温高精度控温.

为满足科学观测需求, 每颗卫星有效载荷^[8]配置25个伽马射线探测器(GRD)、8个荷电粒子探测器(CPD)和载荷处理器(EBOX), 不仅具有全天视场、高灵敏度($2 \times 10^{-8} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)、良好定位能力($\sim 1^\circ$)和宽波段(8 keV–2 MeV)能谱测量能力, 而且能够鉴别空间荷电粒子事件并对伽马暴实时触发定位. 同时卫星创新性配置基于北斗三号全球位置报告系统的短报文应答机, 实现轨触发定位信息的准实时下传(50%概率下 $< 5 \text{ min}$, 100%概率下 $< 1 \text{ h}$).

科学数据传输子系统采用一体化数传设计方案, 将数据处理单元、存储单元($2 \times 512 \text{ Gbits}$)及射频调制单元整合为固存及调制单元, 同时为了在不调姿的情况下保证足够的链路余量, 创新性配置相控阵天线, 实现大范围($\pm 60^\circ$)的高速率数据传输(300 Mbps), 保证每天约20 GB科学数据传输以及至少2 d的科学数据在轨存储.

2.2 任务轨道设计

(1) 设计需求

需求1 载荷在轨本底低且稳定.

GECAM的有效载荷^[8]属于宽视场探测器, 能区覆盖了X射线至伽马射线波段, 粒子本底是探测器在轨本底的重要组成部分^[9]. 根据AE8模型和AP8模型计算的600 km左右高度的电子及质子的全方向积分通量分布分析发现粒子本底受地磁刚度和南大西洋异常区(South Atlantic Anomaly, SAA)影响, 同时本底水平具有显著的轨道调制, 因此需要低倾角、低高度的圆轨道来尽量降低粒子本底水平, 减小本底随轨道的调制, 得到比较稳定的低粒子本底水平, 这样才有利于提高载荷的观测灵敏度. 综合考虑轨道寿命、测控和数传资源等因素, GECAM载荷对轨道的需求为: ①轨道倾角 $< 35^\circ$; ②轨道高度 $< 650 \text{ km}$; ③轨道类型为圆轨道.

需求2 全天视场覆盖.

根据科学需求, GECAM双星在轨正常观测运行时, 要求双星可同时监测覆盖100%天区.

而根据前文的分析, 为了保证低粒子本底水平, GECAM需运行在近地圆轨道上, 这就必须要考虑地球对载荷探测视场的遮挡, 如图3所示, 结合载荷设计及轨道环境下的地球遮挡天区, 每颗卫星载荷有效视场预计达到 228° , 对应球面度为8.84, 占全天区的70.3%. 因此, 需两颗卫星处于相同轨道面内且共轨运行(相位相差 $(180^\circ \pm 5^\circ)$), 这样双星载荷对天区100%覆盖, 同时双星载荷重叠视场对应球面度为5.11, 占全天区的40.6%. 通过双星同时观测^[10], 单星视场内的接收面积大于 300 cm^2 , 双星视场重叠区域的接收面积提高至 550 cm^2 , 满足全天各方向入射平均的伽马暴探测灵敏度要达到 $2 \times 10^{-8} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (3σ 显著性)的科学指标要求.

(2) 设计约束

约束1 发射场位置约束.

国内发射场纬度小于 35° 的只有西昌发射场和文昌发射场. 综合考虑各发射场配套运载的实际情况, 选择西昌发射场, 因此卫星的轨道倾角为 29° .

约束2 轨道寿命约束.

为了累积足够的观测时间, 要求GECAM卫星在轨运行不少于3年, 并保有在轨延寿运行的余量. GECAM卫星预计发射时间为2020年, 任务期将包含第25太阳活动周期(每11年一个周期)的高年. 不同初始轨道高度对应的轨道寿命如图4所示.

为保证卫星的轨道寿命至少大于3年, 同时综合考虑测控数传通信时间的限制、轨道寿命余量等因素,

图 3 双星视场覆盖图

Figure 3 All-sky coverage of GECAM double satellite.

图 4 不同初始轨道高度下轨道寿命

Figure 4 Satellite orbit lifetime with different initial orbit heights.

初始轨道高度选为600 km.

2.3 发射与双星(星座)部署运行

GECAM双星由CZ-11运载火箭在西昌发射场“一箭双星”并联形式进行发射, 双星分离后, 采用升轨滞后相位的方式将双星相位拉开 180° .

同时在寿命期内, 预计进行3次轨控控制, 以维持双星的轨道高度(≥ 550 km)及双星相位($180^\circ \pm 5^\circ$).

2.4 观测模式设计

根据观测需求及卫星平台, GECAM卫星工作模式包括普通观测模式、SAA区工作模式、轨道控制模式以及安全模式.

(1) 普通观测模式是载荷全天区观测模式, 双星系统的载荷综合视场可以覆盖整个天区. 载荷在轨存储事例数据和并道数据等科学数据到大容量存储单元, 在卫星数传过境时, 通过X波段下传. 开启在轨触发定位软件. 当载荷在轨触发时, 星上实时确定暴发源的天球位置, 并将暴发源的触发时间、天球坐标位置、光

变和能谱信息等少量数据简报通过北斗短报文准实时链路发送给地面. 卫星指向模式为天顶主平面对日指向.

(2) SAA区工作模式是GECAM卫星进入SAA区后的工作模式. 载荷有两种子模式: (a) 载荷开机工作, 仅存储并道数据, 不存事例数据; (b) 载荷探测器关闭, 不采集数据. 卫星入轨后, 将根据运行需要选择其中的一种子模式. 关闭在轨触发定位软件. 卫星指向模式为天顶主平面对日指向;

(3) 轨道控制模式下, 卫星进行轨道调整和控制, 载荷不工作, 平台其他分系统处于正常工作模式, 卫星指向为惯性指向.

(4) 安全模式下, 卫星工作在最小系统, 执行特定程序, 保障卫星安全, 指向模式为对日匀速自旋.

2.5 卫星主要技术指标

围绕科学需求和载荷的工程需求, GECAM卫星的设计技术指标如表1所示.

3 卫星关键技术

3.1 双星全天视场暴发源定位技术

GECAM卫星的主要任务之一是对双致密星并合引力波事件的高能电磁对应体以及伽马暴等暂现源进行早期证认和良好定位, 为后随多波段观测提供关键的定位信息, 帮助寻找证认低能段的电磁对应体和伽马暴余辉以及宿主星系. GECAM将综合使用探测器计数分布法和时间延迟法进行定位.

跟国际上同类监测器(CGRO/BATSE和Fermi/GBM)类似^[11-13], GECAM卫星主要采用探测器计数分布法进行伽马暴定位, 即通过各探测器的计数分布与各个方向入射的计数分布模板进行匹配, 得出暴发源方位信息^[14].

为了提高该定位方法的定位精度, 卫星系统从系统设计触发一系列创新性措施进行优化, 包括配置足够多的探头降低误差, 以及采用简洁的载荷设计和反地心指向, 从而简化伽马暴在卫星和地球大气层的反射效应等. 此外, 我们从卫星整体层次对影响定位精度的各因素进行了系统地分析, 随机定位误差主要为载荷本体系下的定位误差(包括算法定位误差和载荷探头形变误差)和载荷本体系在惯性坐标系下的测量

表 1 GECAM卫星主要技术指标

Table 1 Main technology parameters of GECAM satellite

类别	指标		备注	
系统指标(科学观测性能)	双星视场覆盖率	双星在轨正常观测运行时, 视场同时监测覆盖100%天区, 年平均视场覆盖>90%全天 ^{a)}	针对设计	
	平均探测灵敏度	伽马暴探测灵敏度优于 $2\times10^{-8}\text{ erg cm}^{-2}\text{ s}^{-1}\text{ b)}$	创新设计	
	定位精度	中等典型亮度伽马暴 ^{c)} 的定位精度优于 1° d)	创新设计	
星座及轨道构型	轨道类型、高度	轨道高度: 600 km 轨道倾角: 29° 偏心率: 0 轨道构型: 双星同轨道面, 共轭运行	针对设计	
卫星指向	指向方式	卫星+Z轴(载荷-Z轴)对地定向, 主平面(-Z/+X)对日定向	创新设计	
载荷	GRD探测器	载荷视场	单颗卫星视场张角大于 214° e)	针对设计
		探测器数量	25	
		几何面积	$\geq 40\text{ cm}^2$ (单个探测器)	
		探测能区	8 keV-2 MeV	
		能量分辨率FWHM	$< 18\% @ 59.5\text{ keV}$	
	CPD探测器	伽马射线探测效率	$> 50\% @ 8\text{ keV}$	针对设计
		探测能区	300 keV-5 MeV	
		伽马射线探测效率	$< 20\% @$ 全能区	
		探测器数量	8	
		几何面积	16 cm^2 (单个探测器)	
载荷处理器	在轨触发、定位计算时间	$\leq 1\text{ min}$	创新设计	
姿轨控	卫星Z轴与地心指向夹角	优于 0.5° (3σ)	继承设计	
	姿态控制	姿态测量精度	优于 0.1° (三轴, 1σ)	继承设计
		角速度跟踪精度	优于 $0.08^\circ/\text{s}$ (三轴, 3σ)	继承设计
		机动要求	卫星Z轴在一个轨道周期内对地指向, 最大跟踪速度不小于 $0.3^\circ/\text{s}$	创新设计
	轨道控制	双星初始调相时间	不多于60 d	继承设计
		轨道高度	寿命期内轨道高度 $\geq 500\text{ km}$	继承设计
轨道相位		$180^\circ\pm 5^\circ$	继承设计	
综合电子	数传	数传频段	X波段	继承设计
		数传信息速率	300 Mbps	创新设计
		存储容量	512 Gbits	继承设计
		误码率	1×10^{-6}	继承设计
	北斗短报文通信	通信体制	符合北斗三号卫星全球位置报告系统体制要求	创新设计
EIRP	9 dBW			
	接收机灵敏度	-160 dBW		

a) 不含卫星平台维护时间; b) 3σ 信噪比; 按照Band软谱, 持续时间20 s, 单个GRD探测器的本底700 counts/s计算; 各入射方向的平均值; c) 流强 $1 \times 10^{-6} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 10 s, Band软谱; d) 1σ 统计误差, 按照单个GRD本底700 cps计算, 各入射方向的平均值, 地面定位计算结果; e) 忽略集成在穹顶舱上的天线影响

误差(包括卫星姿态测量误差和姿态测量参考系到载荷基准系之间的形变误差), 其中在整星层级重点对星敏动态性能进行了专项动态观星试验, 对整星热应力

释放和在轨周期性热弹进行了机、热一体化的分析和仿真, 结果表明卫星对中等典型亮度(见表1注释c))的伽马暴的定位精度为 $37'$ (1σ 统计误差).

由于GECAM的两颗卫星距离较远,我们将利用伽马暴传播到两颗卫星的时间延迟进行定位.该方法的定位精度主要取决于两颗卫星的位置测量精度(双星位置测量误差小于80 m)、时统精度(双星时统误差 $<10\text{ }\mu\text{s}$),根据仿真分析,对中等典型亮度伽马暴(见表1注释c))的统计误差为 $12'$ (1σ , 带状区域的宽度方向).

这样对于单星视场可见的伽马暴(占比60%),使用探测器计数分布法得到的卫星随机定位误差为 $37'$ (1σ 统计误差);对于双星视场同时可见的伽马暴(占比40%),双星时间延迟法可将定位带宽度方向的随机误差缩小至 $12'$ (1σ 统计误差),满足对标称亮度伽马暴随机定位精度 1° (1σ 统计误差)的科学指标要求.

3.2 主平面对日卫星指向设计

为了保证全天视场覆盖性,GECAM卫星载荷工作期间需满足反地心指向.GECAM卫星跟对地观测卫星类似,但运行轨道却不是对地观测卫星常用的太阳同步轨道,而是倾角 29° ,这样卫星每轨运行,太阳矢量在本体系下的变化较大,同时载荷功耗较大并要求在轨常开,所以卫星指向模式需特殊设计以保证足够的能源获取.经过系统地仿真分析,考虑成本及可靠性,卫星创新性采用主平面对日天顶指向方案替代可转动太阳帆板(SADA)(图5).

(1) 对地定向,即载荷视轴(卫星-Z轴)一直指向天顶.

(2) 卫星绕偏航轴(卫星Z轴)机动保持太阳矢量在XZ面内的+X方向:保证太阳矢量与-X轴 $>90^\circ$,保证太阳矢量与Y轴 $\approx 90^\circ$;考虑姿控约束,最大跟踪角速度限定为 $0.3^\circ/\text{s}$.

卫星绕Z轴的机动角速度与 β 角的角度有直接关系,为了避免 β 角较小时,在每轨日下点和反日下点处偏航轴机动速度过快,在主平面对日的基础上对卫星姿态机动的角速度和角加速度进行了以下优化:

(1) 当 β 角较小时,对姿态角速度进行限幅,在日下点前后5 min内,安排10 min匀速机动,保证最大机动角速度 $<0.3^\circ/\text{s}$;

(2) 在阴影区,卫星匀速转动,保证下一轨重新进入日照区时已经调整为对日姿态.

通过姿态优化,能够将最大机动角速度限制在 $0.3^\circ/\text{s}$ 以下(见图6),有助于姿控的工程实现,同时太阳矢量与XZ面夹角在 10° (98.3%)以内.根据主平面对日

图5 天顶主平面对日指向示意图

Figure 5 Satellite pointing strategy schematic diagram.

方案,通过一年的仿真计算发现,在日照区时,太阳矢量与卫星-Z轴夹角在 0° – 120° 之间变化,当帆板斜装 50° – 60° 时(绕Y轴逆时针旋转)可达到最好的能源获取效果.

为了评估卫星的能源获取能力,引入光照当量的概念,光照当量定义为卫星每轨日照区获取等效光照的累计值.综合考虑载荷和平台各单机的视场需求,选择帆板斜装 40° ,卫星的光照当量最小值为50(见图7),与最理想情况帆板正对日光照当量60差距不大,能够保证卫星的正常运行能源.

3.3 基于北斗三号全球位置报告系统触发信息实时下传技术

根据科学需求,卫星需能够实时将在轨监测到的暴发事件的触发时间、定位及光变曲线等信息发送至地面.考虑到暴发事件的随机性和不可预知性,GECAM卫星选择北斗三号全球位置报告系统作为观测警报数据下传链路的方案^[15,16].北斗三号导航系统中,MEO卫星可提供全球位置报告服务,主要供境外用户使用.境外用户机(GECAM卫星)通过发射L信号至境外可见MEO卫星,境外可见MEO卫星通过Ka星间链路中继至境内MEO节点星,境内MEO节点星通过Ka或S频段遥测下传所需信息至地面站点.

北斗三号MEO系统共计24颗卫星,其中14颗配备有全球短报文位置报告系统,已于2019年完成组网,北斗系统已于2020年全面建成.届时,GECAM卫星将作为北斗三号全球位置报告系统的首个空间用户.

为此GECAM卫星配置新研北斗短报文通信模块,实现北斗短报文的发射和接收.(1) 北斗短报文的发

图 6 (a) 优化前后星上规划姿态角(轨道系); (b) 优化后星上规划姿态角速度(惯性系)

Figure 6 (a) Attitude angles after optimization (orbital frame); (b) angular velocity of attitude after optimization (inertial frame).

图 7 GECAM卫星一年内单轨光照当量变化

Figure 7 GECAM satellite's monorail illumination equivalent evolution in a year.

射: 将GECAM卫星的观测数据封装成北斗短报文上行信息帧, 通过直接序列扩频和BPSK调制方式, 发射短报文上行信号; 北斗卫星收到此信号后, 将GECAM卫星的观测数据回传至境内地面站。(2) 北斗短报文的接收: 接收北斗B2b信号, 通过捕获、跟踪、解调后获取短报文发射后接入卫星的确认回执信息。

结合链路预算进行了GECAM卫星对北斗MEO卫

星短报文终端可见性分析, 由于GECAM卫星基于微纳卫星平台研制, 受质量功耗等约束, 北斗短报文天线设计指标只能在 $\pm 70^\circ$ 范围内满足增益要求, 导致对北斗卫星的覆盖性达不到100%。在轨运行期间, 链路覆盖性达99.3%, 最长不可见时间小于15 min (表2), 平均链路延迟小于5 min, 满足科学需求。

从整星角度统筹考虑, 对触发时刻信息流进行了统筹设计(见图8), 在通过北斗信道发送短报文触发信息的同时, 以异步包形式备份了全部短报文信息, 在卫星过境时通过测控/数传信道下传触发信息。同时将触发时刻在科学数据中进行标记, 并在卫星数传过境时, 优先下传触发时刻前50 s至触发时刻后250 s的事例数据。

3.4 低成本高可靠一体化设计电子学

GECAM要求卫星具备长寿命、体积小、重量轻、成本低、集成度高等特征, 因此需要研究低成本、高可靠性、一体化的综合电子学技术, 使得卫星电子学系统能够融合更多功能, 便于星上信息综合管理和控制, 为“一箭双星”发射提供有利条件。

为实现卫星低成本、高可靠性、一体化电子学设计, 项目组在系统设计层面, 突破了如下技术问题。

表 2 不同天线张角的链路可见性

Table 2 Link visibility at different antenna beam angles

天线半锥角 (°)	覆盖性 (%)	最长不可见时间 (min)
70	99.3	14.6
75	99.8	9.1
80	99.9	4.2

图 8 触发时刻星上信息流设计

Figure 8 On-board information flow at trigger time.

(1) 卫星电子学功能模块解耦技术. 针对电子学通用模块化的要求, 进行功能集成和解耦, 分为能源流、信息处理、数据管理和射频信号处理模块. 能源流完成整星一、二次供电, 为星上各设备进行供电配电, 连接各设备间的电信号, 满足各设备的供电性能要求; 信息处理主要完成各种信息的融合和处理, 包括姿轨控、热控、载荷管理等信息处理和控制输出; 数据管理完成接收外部输入/输出的所有数据, 并将其输入至信息处理; 射频信号处理主要完成遥测、遥控和GPS等射频信号的处理, 并将其转换为数字信号.

(2) 卫星电子学通用化接口标准技术. 通过对电子学系统对外接口进行归纳分类, 分为能源流、低速信息流和高速信息流, 并针对每种信息流接口设计标准的接口电路. 针对每种接口制定标准的接口协议, 实现对外接口的标准化, 实现综合电子信息接口标准化.

(3) 电子学软硬件低成本、高可靠设计技术. 硬件

上, 采用FPGA替代分离元器件, 对系统功能进行整合和集成化设计, 考虑到FPGA可能存在元器件限制等因素, 进一步采用分系统级异构备份技术实现电子系统集成. 软件上, 加强软件冗余备份纠错机制, 对卫星健康状态进行自主诊断和处理, 采用可配置重构的软件架构.

(4) 机电热一体化设计技术. 基于已有各模块的供电、力学和热分析结果, 充分考虑电磁兼容、热集中等约束, 并同步考虑整体布局优化, 实现机电热一体化设计.

3.5 高度集约化卫星电磁兼容设计

为了适应CZ-11“一箭双星”发射, GECAM卫星的包络尺寸约束较大, 在局促的空间内需集成测控、数传、短报文、GNSS共计9根天线, 同时GNSS接收频点与北斗短报文发射频点较接近, 需特别注意整星电磁兼容性设计.

GECAM卫星包含的射频发射源有测控发射机、数传发射机和短报文发射机. 卫星内部有部分高速数字信号线, 在信号传输过程中也会产生电磁辐射.

测控发射机工作在2.2–2.3 GHz频段, 通过射频电缆将信号传输至测控前端然后至天线, 发射功率为27 dB m. 数传发射机工作在8.2 GHz频段, 发射功率为41 dB m. 短报文发射机工作在1.6 GHz, 通过射频电缆将信号传输至短报文前端然后至天线, 发射功率为40 dB m.

内部高数数字信号线包括遥测传输信号的三线制, 传输信号速率16384 bps, 采用RS422接口, 差分信号电平1.5Vp-p, 按照传输的数据速率计算, 其频谱覆盖范围应该在100 kHz到几十MHz之间. 载荷科学数据通过LVDS接口与数传进行传输估算其频谱覆盖范围在20 MHz–2 GHz.

GECAM卫星内部接收机有3种, 测控接收工作为2.05–2.15 GHz, 灵敏度为–108 dB m. GNSS接收机接收北斗系统B1频段和GPS系统L1频段, 灵敏度为–132 dB m. 北斗短报文接收工作在1.2 GHz, 灵敏度为–103 dB m.

为此, 项目组从整星设计角度考虑, 对天线隔离度和滤波器进行统一设计(见表3), 保障整星电磁兼容性.

根据设计结果, 接收机接收实际空间背景噪声约为–174 dB m/Hz, 数传发射、测控发射信号落入测控

表 3 卫星电磁信号实际设计结果

Table 3 Satellite electromagnetic signal interference calculation

发射端	接收端	发射机谱密度 (dBm/Hz)	发射落入接收带内归 一化谱密度 (dB/Hz)	发射机滤波器 抑制 (dB)	天线隔离度 (dB)	接收带内干扰信号 谱密度 (dBm/Hz)
数传发射	测控接收	—	-36.17	60	50	-189.97
数传发射	GNSS和短报文接收	-43.8	-36.98	60	60	-200.78
测控发射	测控接收	-36	-67.58	60	40	-203.58
测控发射	GNSS接收	-36	-89.46	60	40	-225.46
测控发射	短报文接收	-36	-93.52	60	55	-244.52
短报文发射	测控接收	-22.14	-58.29	80	37	-197.43
短报文发射	GNSS接收	-22.14	-44.9	80	46	-193.03
短报文发射	短报文接收	-22.14	-62	80	28	-192.14

接收、GNSS接收、短报文接收带内信号功率均低于空间背景噪声, 因此对接收不会有影响. 短报文发射链路中的腔体滤波器隔离度设计为80 dB, 发射落入测控接收带内信号低于遥控谱密度(-150 dB m/Hz) 47 dB 以上, 因此对测控接收的影响可以忽略不计. 落入GNSS接收和短报文接收的信号功率谱密度也小于背景噪声, 不会对接收造成电磁干扰.

4 总结

GECAM卫星面向引力波天文学的重大研究机遇,

针对科学和载荷需求, 进行了卫星和星座设计, 对宽视场暴发源定位技术、主平面对日和对地定向卫星指向设计、基于北斗三号全球位置报告系统触发信息实时下传技术、低成本高可靠一体化设计电子学、高集约化卫星电磁兼容设计等关键技术提出了有效的解决方案. GECAM卫星计划2020年底以“一箭双星”方式发射, 入轨运行后将具有全天视场、高灵敏度、良好的定位精度和宽能段覆盖, 利用北斗三号全球位置报告系统, 也具备在轨触发定位以及准实时下传探测结果的能力, 将是“多波段、多信使”时域天文学时代重要的高能望远镜之一.

参考文献

- Li T P, et al. (The *Insight*-HXMT team). *Insight*-HXMT observations of the first binary neutron star merger GW170817. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2018, 61: 031011, arXiv: [1710.06065](#)
- Gao H, Fan X L, Wu X F, et al. Detection of electromagnetic counterpart for gravitational wave bursts (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2018, 48: 039504 [高鹤, 范锡龙, 吴雪峰, 等. 引力波爆发性事件的电磁对应体的探测. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 039504]
- Xiong S L. Is the GW150914-GBM really associated with the GW150914? arXiv: [1605.05447](#)
- Tong Q F. Study of the Data Management System for GECAM (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Kunming: Yunnan University, 2018 [童秦烽. GECAM数据管理系统研制. 博士学位论文. 昆明: 云南大学, 2018]
- Zhang S N, Santangelo A, Feroci M, et al. The enhanced X-ray timing and polarimetry mission—eXTP. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 029502, arXiv: [1812.04020](#)
- Song X Y, Xiong S L, Luo Q, et al. Introduction to gamma ray burst data analysis algorithm and software tools for GECAM (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2020, 50: 129511 [宋欣颖, 熊少林, 罗琦, 等. GECAM伽马暴数据分析算法和软件设计介绍. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 129511]
- Zhang K K, Zhu Z C, Xia L. Analysis of small satellite modular design technology (in Chinese). *Spacecraft Eng*, 2015, 24: 107–115 [张科科, 朱振才, 夏磊. 小卫星模块化设计技术分析. 航天器工程, 2015, 24: 107–115]
- Li X Q, Wen X Y, An Z H, et al. The GECAM and its payload (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2020, 50: 129508 [李新乔, 文向阳, 安正华, 等. GECAM卫星有效载荷介绍. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 129508]

- 9 Guo D Y, Peng W X, Zhu Y, et al. Energy response and in-flight background simulation for GECAM (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2020, 50: 129509 [郭东亚, 彭文溪, 朱玥, 等. GECAM能量响应及在轨本底模拟. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 129509]
- 10 Zhang D, Li X, Xiong S, et al. Energy response of GECAM gamma-ray detector based on $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$ and SiPM array. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A*, 2019, 921: 8–13
- 11 Berlato F, Greiner J, Burgess J M. Improved Fermi-GBM GRB localizations using BALROG. *Astrophys J*, 2019, 873: 60, arXiv: 1902.01082
- 12 Briggs M S, Connaughton V, Meegan C, et al. The accuracy of GBM GRB localizations. *Bull Am Astron Soc*, 2010, 41: 670–671
- 13 Boër M, Klotz A, Thiébaud C, et al. Four years of observations of GRB localizations with TAROT. In: *Gamma-Ray Burst Symposium*. AIP Conf Proc, 2004, 727: 447–450
- 14 Liao J-Y, Luo Q, Zhu Y, et al. The localization method of GECAM and simulation analysis (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2020, 50: 129510 [廖进元, 罗琦, 朱玥, 等. GECAM定位方法及模拟分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 129510]
- 15 Xue F, Ren H, Zhang Z X, et al. The conception of future constellation programming of BDS global radio determination satellite service (RDSS) (in Chinese). In: *Proceedings of the 7th China Satellite Navigation Conference*. Academic Exchange Center of China Satellite Navigation Office, 2016. 1–3 [薛峰, 任晖, 张之学, 等. 北斗全球RDSS业务星座配置研究. 见: 第七届中国卫星导航学术年会论文集. 中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心, 2016. 1–3]
- 16 Zhu X P, Zhang P, Wang D F, et al. Beidou global message communication access capability analysis and study (in Chinese). *Space Electron Tech*, 2020, 1: 46–50 [朱向鹏, 张蓬, 王登峰, 等. 北斗全球报文通信系统接入能力分析与研究. 空间电子技术, 2020, 1: 46–50]

GECAM satellite system design and technological characteristic

HAN XingBo¹, ZHANG KeKe^{1*}, HUANG Jia¹, YU JinPei¹, XIONG ShaoLin², CHEN YouMei¹, LI XinQiao², QI JinLing¹, WEN XiangYang², CHEN Wen¹ & GENG Hao³

¹ Innovation Academy for Microsatellites, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201203, China;

² Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³ National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

The Gravitational wave high-energy Electromagnetic Counterpart All-sky Monitor (GECAM) is proposed to explore the significant opportunity of the gravitational wave multi-messenger astronomy by monitoring the gravitational wave high-energy electromagnetic counterpart in all-sky. Based on the satellite science and observation requirements, we propose the design philosophy and schemes of the GECAM satellite system, including the system configuration and main technical parameters, observation requirement analysis, and satellite orbit, attitude, and operation mode design. Further, we summarize the technical characteristics and solutions of satellites, including the satellites all-sky field of view burst source location technology, multi-constraint satellite pointing design, the real-time downlink telemetry technology of trigger information based on the Beidou-3 global position reporting system, the integrated design electronics with low cost and high reliability, and the electromagnetic compatibility design of highly intensive satellite. The GECAM satellite can achieve an all-sky field of view, high sensitivity, good positioning accuracy, and wide energy coverage through system design and optimization. Also, it has the capability of on-orbit trigger positioning and quasi-real-time downlink of detection alerts, satisfying the comprehensive requirements of the detection of gravitational wave gamma-ray bursts and other high-energy transient sources.

gravitational wave, high-energy electromagnetic counterpart, all-sky monitor, GECAM satellite

PACS: 95.55.Ka, 95.40.+s, 07.87.+v

doi: 10.1360/SSPMA-2020-0120