GECAM卫星科学应用系统简介

陈维^{1,2}, 宋黎明^{1,2,3*}, 郑世界^{1,2}, 马想^{1,2}, 黄跃^{1,2,3}, 王平^{1,2}, 李小波^{1,2}, 乔锐^{1,2},
宋欣颖^{1,2}, 张红梅², 熊少林^{1,2}, 彭文溪^{1,2}, 李兵^{1,2}, 赵小芸^{1,2}, 郭东亚^{1,2}, 蔡策^{1,2,3},
陈刚^{2,3}, 段静^{1,2,3}, 李超^{1,5}, 李建辉¹, 李清心^{1,5}, 欧歌², 史东篱^{1,4}, 孙功星², 王文帅²,
肖硕^{1,2,3}, 姚敏^{1,4}, 张凯^{1,6}, 张鹏^{1,4}, 赵师毅^{1,4}

1. 中国科学院粒子天体物理重点实验室, 北京 100049;

2. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;

3. 中国科学院大学物理科学学院, 北京 100871;

4. 西南交通大学信息科学与技术学院, 成都 610031;

5. 湘潭大学物理与光电工程学院, 湘潭 411105;

6. 曲阜师范大学物理工程学院, 曲阜 273165

*联系人, E-mail: songlm@ihep.ac.cn

收稿日期: 2020-10-01; 接受日期: 2020-10-26; 网络出版日期: 2020-11-12

国家重点基础研究发展计划(编号: 2014CB845800)和中国科学院战略性先导科技专项(编号: XDA15360300, XDA15020700, XDA15052700)资助项目

摘要 引力波的直接探测开启了引力波天文学的新纪元. 引力波事件高能电磁对应体的探测研究作为研究引力波源和基础物理规律的重要手段已成为天文研究领域的热点. 随着引力波探测器的升级, 引力波样本数急剧扩大, 对其高能电磁对应体的探测需求日益紧迫. 引力波暴高能电磁对应体全天监测器(GECAM)卫星是针对引力波高能电磁对应体探测研究所蕴含着的重大发现机遇而提出的全天监测器项目. GECAM卫星科学应用系统的主要功能包括保障卫星有效载荷的科学运行, 实现科学数据的生产、存储、处理、标定、发布与分析, 以及为科学用户提供技术支持和服务等. 本文以引力波事件高能电磁对应体的探索研究为出发点, 介绍GECAM科学应用系统针对引力波事件高能电磁对应体创新性的监测方法设计, 即GECAM科学应用系统的方案设计. 设计涵盖系统架构、接口控制、主要技术流程、功能组成及软件规划设计等. GECAM卫星计划于2020年底发射, 届时科学应用系统将具备执行运行任务的能力, 为卫星的在轨科学运行及科学研究提供支持和保障.

关键词 引力波, 伽马射线暴, 电磁对应体, 科学应用系统

PACS: 95.55.Ka, 95.55.Ym, 98.70.Rz, 07.05.-t

1 引言

中子星与黑洞作为宇宙中一类特殊的致密天体

源^[1], 不仅伴随极强的引力场, 往往还附带极强的磁场环境. 极端的条件使得它们在系统演化过程中产生了多种剧烈的可观测天体活动. 这些天体活动以爆发的

引用格式: 陈维, 宋黎明, 郑世界, 等. GECAM卫星科学应用系统简介. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 129512

Chen W, Song L M, Zheng S J, et al. Introduction of the scientific application system of GECAM (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 129512, doi: 10.1360/SSPMA-2020-0389

形式出现, 常常具有高能量、宽波段、多种类的特点, 例如双致密星并合引力波(GWs)、伽马暴(GBs)、磁星暴发及快速射电暴(FRBs)等. 理论研究表明, 这些宇宙中极为剧烈的高能爆发现象可能与致密星密切相关^[2-6]. 对这类现象的观测和研究是探索极端条件下物理规律的重要手段. Hulse和Taylor^[7]对双中子星系统(PSR 1913+16)的长期监测打开了通过引力波方式研究引力的可能性, 实现了人类首次间接证明广义相对论中预言的引力波(GW)辐射; 而激光干涉引力波天文台(LIGO)则实现了人类第一次直接探测到引力波信号(GW150914)^[8], 证实了爱因斯坦广义相对论的关键预测, 并提供了双黑洞并合的第一个直接证据; GW170817发生之后, LIGO和全球其他天文台对该事件进行了联合观测, 首次直接探测到双中子星(BNS)并合事件引起的引力波和其电磁对应体^[9-12]. 引力波的直接观测开启了迈向引力波天文学的新纪元, 牢固确立了引力波作为宇宙多信使的一员, 也推动了多信使天体物理学(Multi-Messenger Astrophysics, MMA)的跨越发展^[13,14].

引力波事件全天随机发生, 每一次事件都可能蕴含有价值的信息和重大发现机遇, 对全天区、大时段的监测是抓住机遇的重要手段. 在2016年LIGO宣布发现引力波不久后, 我国科学家提出引力波暴高能电磁对应体全天监测器(Gravitational wave high-energy Electromagnetic Counterpart All-sky Monitor, GECAM)项目, 其主要科学目标是探测与引力波暴成协的伽马射线电磁对应体以及其他高能暂现源.

GECAM卫星可以获取引力波事件的高能段辐射信息, 还可以快速确定暴发源的位置, 提供给其他波段的观测设备进行后随观测. GECAM卫星项目由两颗相同的卫星组成, 轨道相位相差180°, 每颗卫星的载荷光轴始终保持反地心(即天顶)指向, 伽马射线探测能区6 keV–5 MeV, 载荷在轨运行期间计划不间断工作, 可实现全天监测. 此外, 卫星具有在轨触发和定位功能, 使得GECAM卫星可通过北斗短报文系统实时下传触发和定位等信息, 具备准实时发布探测结果的能力, 这将有助于引导其他天文观测设备与GECAM卫星进行联合观测或后随观测. GECAM的设计观测能力也足以满足多种理论预期中相应事件的灵敏度等性能指标需求^[15-17].

GECAM科学应用系统作为卫星工程的六大系统

之一, 是联系科学研究和卫星运行之间的纽带. 科学应用系统将完成有效载荷的性能监测和工作参数优化调整等工作, 确保仪器的稳定运行. 科学应用系统还将完成科学数据的标定、生产、存储、发布及快速处理等工作, 并开发相应的数据分析软件, 满足科学用户针对各种科学目标的数据分析需求.

特别地, 宇宙中大量随机产生的各种伽马暴现象是GECAM卫星的主要探测目标. 为了引导国内国际其他探测设备对暴发现象进行多波段后随观测, 要求科学应用系统“三快一准”, 即反应快、处理快、发布快, 定位准. “三快”指的是将GECAM卫星利用北斗短报文准实时下传的在轨触发定位等信息进行快速处理并在1 min内对外发布, 对于数传数据也将进行快速处理和发布. “一准”则是对GECAM卫星下传的短报文数据、数传数据, 利用地面的高性能计算资源, 以及双星联合定位等算法给出更高精度的定位. 除此之外, GECAM还具有“信息全”的特点: GECAM在轨和地面将发现大量的天文暴发事件, 为了方便用户查阅研究, 我们将建设触发暴发信息数据库和在线源表等信息平台, 对其进行管理和发布. 科学应用系统为GECAM任务配置了专用计算硬件设备, 包括高性能计算集群、大容量存储以及直连高速网络等, 以保证任务指标的达成.

本文对GECAM科学应用系统进行系统性的介绍, 第2节阐述了科学应用系统针对监测任务的创新设计方案和组织架构; 第3节主要介绍科学应用系统各分系统的功能职责、技术方案和技术实现; 第4节介绍了GECAM科学应用系统面向外界科学用户的信息平台创建, 以及获取GECAM卫星数据信息的方式; 最后一节给出了结论和总结.

2 科学应用系统设计

2.1 GECAM科学应用系统简介

GECAM卫星工程由卫星系统、运载系统、发射场系统、测控系统、地面支撑系统和科学应用系统六大系统组成, 如图1所示.

科学应用系统作为GECAM卫星工程的组成部分, 根据其职责划分整个系统由4个分系统组成, 即科学应用系统总体、科学运行分系统、科学数据处理分系统和科学研究支持分系统. 系统组成如图2所示.

图 1 GECAM卫星工程系统组成
Figure 1 GECAM mission composition.

图 2 GECAM科学应用系统组成
Figure 2 Composition diagram of GECAM scientific application system.

(1) 科学应用系统总体分系统

GECAM科学应用系统总体分系统的主要工作目标是: 确定科学应用系统的工作职责, 确定与其他大系统的界面和接口; 参加大系统联试, 系统级测试和演练; 组建并运行科学委员会日常工作组; 协调联合观测, 组织完成与其他卫星数据的联合分析; 组织完成在轨测试; 开展科普宣传。

(2) 科学运行分系统

GECAM科学运行分系统的主要工作目标是: 完成有效载荷在轨监测, 确定仪器工作参数, 更新有效载荷工作参数和星上软件; 管理和运行触发警报系统, 快速响应GECAM及外部设备观测到的暴发现象; 制定有效载荷在轨测试计划。

(3) 科学数据处理分系统

GECAM科学数据处理分系统的主要工作目标是:

完成GECAM工程和标定级科学数据产品生成和科学数据库建设, 完成暴发事件快速分析; 完成暴发源的离线搜索等。

(4) 科学研究支持分系统

GECAM科学研究支持分系统的主要工作目标是: 结合载荷性能, 开展科学与观测模拟, 为在轨运行提供支撑; 根据有效载荷性能分析, 提出在轨标定方案; 完成数据分析软件开发, 提供科学用户支持; 建立科学值班系统; 建立和管理GECAM主页, 提供综合信息服务平台, 提供数据产品和分析软件的发布功能, 发布研究进展等。

通过四个分系统的组织结构划分, 共同构成了探索、监测引力波事件高能电磁对应体的相应职责, 为卫星的在轨科学运行及科学研究提供支持和保障。

2.2 GECAM任务运行总体流程

GECAM卫星任务在轨期间, 按照监测任务科学应用系统设计了整套完善的流程体系, 用于保障有价值事件的监测。

GECAM卫星任务在轨运行总体流程如图3所示。当引力波高能电磁对应体或其他高能暂现源产生的高能辐射扫过地球时, 其高能光子(6 keV–5 MeV)将被一颗或两颗GECAM卫星探测到。当监测到的高能光子流量达到或超过星上设定的触发阈值时(即载荷的25个GRD探测器中, 有3个或以上的探测器超过本底3倍标准差, 触发阈值可通过指令调整), 卫星即将其作为一个触发事件, 对该触发事件的基本信息(包括触发时间、坐标、强度以及光变曲线等)进行计算和采集, 并立即通过北斗导航系统的全球短报文服务下传到地面, 经过地面支撑系统转发, 由科学应用系统自动处理, 生成触发报告, 并通过全球伽马暴坐标网络(GCN)对外发布。

除通过北斗短报文准实时下传触发信息之外, GECAM卫星还通过遥测和数传通道下传各类科学数据与工程数据。这些数据由地面支撑系统进行源包解算、物理量转换、拼接去重等操作, 生成初级数据产品(即编辑级数据产品)。科学应用系统接收初级数据产品后, 对数据进行标定, 生成高级数据产品(包含标定级数据产品和JSON格式数据产品)。GECAM科学应用系统通过快速处理流程生成科学快视(Quicklook)产品, 以供科学用户进行快速的科学分析。这些数据产品

图 3 GECAM任务运行总体流程
Figure 3 GECAM operation overall flowchart.

均通过信息发布平台向科学用户及时发布, 其中短报文准实时下传触发信息生成的GCN Notice等, 将于1 min内对外公布, 标定级数据处理结果以及相应的快报产品, 则会在数据齐备后约1 d通过GECAM门户网站对外发布。

此外, 科学应用系统还利用地面比星上更强的计算能力, 对科学数据重新进行细致搜索, 以获取更多星上没有触发的事件(称为地面触发), 对于这些地面触发也将通过GCN发布触发信息, 以引导后随观测。

3 科学应用系统主要功能

引力波暴高能电磁对应体全天监测器卫星在轨运行与科学应用阶段, 科学应用系统将对其进行全面的数据分析、管理、发布等工作。总体、科学运行、科学数据处理、科学研究支持四个分系统在流程内互相合作, 负责各自的任务。以下简述一种常规处理流程便于了解分系统定位和功能。

科学运行分系统通过分系统内部署的触发警报软件进行有价值事件源的监视和短报文的数据处理, 并

将外部触发信息和GECAM短报文信息的处理结果发送总体分系统暴发库, 暴发库汇总结果推送科学研究支持分系统的值班软件, 由值班软件和值班人员自动或人工判断其价值, 并通过暴发库继续通知科学数据处理分系统的调度软件. 调度软件利用数据分析软件提交集群作业进行数传数据的处理, 最后将结果发送暴发库和总体档案库用于发布和归档.

实际数据处理流程更为复杂, 现以设备的监测管理, 数据的产生、处理、发布及归档流程顺序, 详细描述在这一过程中科学应用系统各个分系统的主要功能.

3.1 有效载荷性能监测及在轨管理

有效载荷性能监测及在轨管理是科学运行分系统的职责, 有效载荷性能监测主要包括: 从地面支撑系统发送的0C级和0D级载荷数据出发, 通过对科学数据、工程数据以及辅助数据等的处理与分析, 监测载荷在轨工作性能; 对在分析中发现的异常情况进行分级处理, 并通过设定方式发出警报; 根据异常等级协调相关单位或人员制定解决问题方案, 其流程见图4.

在轨管理主要包括载荷参数更新和星载软件更新. 由有效载荷组或科学用户提出参数更新或软件更新请求, 经过必要的审批后, 科学运行分系统制定参数/星载软件更新申请计划, 同时负责后续任务执行情况的跟踪和反馈, 参见图5.

在轨管理具体流程如下描述.

当存在有效载荷参数更新需求、有效载荷软件更新需求或有效载荷控制指令需求时, 通过载荷运行管理软件界面提交需求, 载荷运行管理软件负责审核相关内容、格式等, 并提醒载荷相关负责人审批需求;

审批通过后, 则与地面支撑系统进行可行性协调, 确认更新时间;

根据审核通过的更新需求, 制定载荷参数/星载软件/载荷开关机及主备切换的更新申请计划, 发送至地面支撑系统;

地面支撑系统将更新申请计划翻译为上星指令, 并将上星指令发送至科学运行, 由责任人进行确认;

地面支撑系统将上星指令提交测控系统, 执行参数更新/星载软件/载荷开关机及主备切换等计划;

通过监测下传的遥测数据中的指令计数, 判断指令是否被正确接收: 若指令未正确接收, 则重新协调

地面支撑系统进行载荷参数更新/星载软件/载荷开关机及主备切换等计划执行, 若指令已正确接收, 通过对下行数据中相应参数的监测判断是否正确完成参数更新;

若参数未正确更新, 分析未正确执行的原因, 并重新制定更新申请计划, 若已正确更新, 则完成参数更新任务, 并更新有效载荷配置数据库(参数配置/星载软件配置).

3.2 触发/暴发事件的处理分析

GECAM双星在轨期间无相互通信, 两颗卫星独立进行触发. 针对同一起伽马暴等暴发源事件, 可能在两颗GECAM卫星分别产生触发, 且触发时间可能不同. 为了方便处理, 我们将天体源暴发称为暴发事件, 将暴发事件在GECAM卫星或其他观测设备产生的触发称为触发事件. 在这个触发/暴发框架内, 一个暴发可包含若干个触发. 因此, 对超长暴等长时标天体事件, 以及包含多段宁静期天体事件的完整监测是GECAM的优势.

科学应用系统对触发/暴发事件的处理主要分为短报文数据处理、地面暴发事件搜索和暴发事件快速处理, 以应对不同的需求.

(1) 短报文数据处理

GECAM卫星具有在轨实时触发和定位能力, 并将触发信息打包后通过北斗短报文准实时下传至地面. 与CGRO/BATSE和Fermi/GBM等卫星类似, GECAM星上采用基于探测器计数分布的定位方法对暴发事件进行定位, 即预设若干种能谱形状的定位模板, 利用实测的各个GRD计数与预设的定位模板进行匹配, 根据拟合优度计算最可几的定位及误差范围^[18]. 因星上计算和存储资源都十分有限, 定位模板采用简化版, 实测谱型与预设谱型可能会存在一定差异. 因此在地面会使用更为精确的定位模板重新进行定位分析, 以得到更高精度的定位结果. 此外, 因GECAM双星之间没有在轨通信交互, 星上定位独立使用单颗卫星的观测数据, 在地面可以结合双星的数据进行联合定位, 进一步提高定位精度.

在轨触发的短报文数据包含长触发和短触发两种. 短报文数据处理主要工作流程如下: 在轨触发后, 每个触发将下传多条短报文数据. 长触发和短触发的前两条短报文为重要的触发信息, 包括触发时间、星

图 4 有效载荷性能监测流程图

Figure 4 Payload performance monitoring flowchart.

上定位、显著性和能谱信息等, 两条短报文互为备份. 收到前两条短报文后, 将立即发布在轨触发时间、星上定位等信息. 长触发短报文还包含每个GRD单独的光变曲线, 将采用比星上更精细的定位模板, 使用能谱和定位联合分析的方法, 得到地面定位结果. 当两颗星探测到同一个暴发事件时, 将对两颗星的数据进行联合定位, 获得双星定位结果. 短触发短报文数据为25个GRD合并的高精度光变曲线, 因此无法使用计

数定位方法. 但根据暴发事件到达两颗星的时间差, 可以给出暴发所在天区的环状范围, 结合星上定位结果, 就可以更精确地确定事件位置.

以上流程均设计了独立的快速分析软件, 用于处理流程中的种种事宜.

(2) 地面的暴发事件搜索

地面的暴发事件搜索包含盲搜索和目标搜索, 是对星上触发搜索的重要补充, 在双星数据齐备后的地

图 5 有效载荷在轨管理工作流程
Figure 5 Workflow of payload on-orbit management.

面搜索增加了发现新触发/暴发事件的可能性。地面的暴发事件搜索功能主要包括：实现不同时间尺度、不同时间相位起点、不同能量区间的触发/暴发事件单星、双星数据全方位搜索；对于搜索到的触发/暴发事件，给出搜索算法的显著性；对于新发现的触发/暴发事件，根据任务需求切割该触发/暴发时刻附近指定时间范围内的数据，生成新的触发/暴发数据产品。此外，地面的暴发现象搜索结合其他卫星已发布暴发事件信息可对其进行有针对性的目标搜索，发现更多暴发事件。

地面的暴发现象搜索主要工作流程如下。

GECAM载荷GRD的连续事例数据在完成标定流程后，根据单星或双星齐备数据分别启动触发/暴发现象全面搜索流程，如果已有外部暴发事件信息，则匹配现有数据，并根据满足情况启动目标搜索流程，搜索流程启动后依次执行以下内容：解析搜索任务配置单内容；判断任务类型，区分单、双星数据全面搜索或者双星数据目标搜索；读取标定完成的GRD连续事例数据文件和轨道姿态文件，解析FITS格式数据；根据数

据类型和任务配置单内容开启全面或目标搜索，搜索算法设计实现了待搜索参数空间的高效遍历；搜索到的新触发/暴发事件，生成触发/暴发事件定位、定位误差和触发/暴发类型，此信息更新到触发暴发信息数据库；按照触发/暴发事件的时间范围切割数据，生成新的触发/暴发数据产品。

为处理引力波事件高能电磁对应体的数据，触发/暴发事件搜索采用了创新性的算法设计。算法联合全部探测器多个能道的观测数据(单星25个探测器×8个能道)，利用信号(暴发源)发生的时间、方向和能谱等信息，建立能谱模板定位库。另外，构造包含观测数据和仪器响应数据的似然比函数，通过一系列中间计算过程，得到真实信号存在条件下测量到观测数据的概率与只有本底存在的条件下得到观测数据的概率比值(似然比值)^[19-21]。设定阈值条件，当似然比值超过阈值时，就认为存在触发信号。触发/暴发事件搜索算法流程如图6所示。

(3) 触发/暴发事件的快速处理

在搜索到星上或地面触发的事件后，待不同流程需求的数据各自齐备后，即进入事件处理流程。

触发/暴发事件快速处理主要针对星上和地面发现的暴发事件进行快速分析，产生不同探测器组合和不同时间尺度的光变曲线；对光变曲线进行自动本底拟合分析；对暴发事件进行分类判断；对暴发数据进行定位、能谱分析和持续时间(包括 T_{90} 和 T_{50} 等)计算；利用两颗星的观测数据进行联合分析；跟其他探测设备报告的暴发事件进行关联分析，同时对GECAM没有探测到的外部暴发事件计算流强上限。

触发/暴发事件的快速处理根据快速分析的任务类型分为三个流程：对于单星触发数据，自动寻找信号

图 6 触发/暴发事件搜索算法流程图
Figure 6 Trigger/outbreak event search algorithm diagram.

本底范围, 并进行本底拟合, 以此得到净能谱数据和本底能谱数据. 根据定位结果生成能量响应矩阵, 将暴发事件按时间划分为若干段, 并对所有时间段进行批量能谱拟合, 然后利用该能谱拟合结果进行光变分析(计算 T_{90} 和 T_{50} 等); 针对双星暴发数据, 重复如上单星的处理流程, 区别仅在于使用单星或双星数据; 对于外部触发, 如果GECAM没有探测到对应的暴发事件, 那么根据外部触发的时间信息进行本底拟合, 得到净能谱数据和本底能谱数据. 依据外部触发的定位生成能量响应矩阵, 进行能谱拟合获得流强上限. 为此, 亦开发了软件用于自动化地处理全套流程.

3.3 探测器标定数据的生成

根据探测器的测量信号反推天体源入射信号时, 离不开准确的探测器响应矩阵等标定数据. GECAM标定数据将使用标准的CALDB管理和发布. 此部分是针对之前数据处理流程的补充.

标定数据主要来源于物理模拟与标定实验, 标定实验又包括地面标定与在轨标定. GECAM需要标定的项目主要包括如下内容. ①能量-道数关系(即EC关系), 用于把电子学采集的ADC道数转换为沉积能量. ②能量分辨与能量的关系(即E-FWHM), 用于产生响应矩阵. ③能量响应矩阵及其对入射方向的依赖, 用于根据探测器测量的计数谱计算入射探测器的暴发天体能谱. ④温度、偏压对增益的影响, 探测器中的SiPM增益敏感于温度和工作偏压. 在地面标定增益与温度和偏压的关系, 将其用于在轨的温度偏压反馈电路, 保证GECAM在轨工作的增益基本稳定. ⑤时间特性标定, 包括死时间与探测记录事例类型的关系, 以及每颗GECAM卫星33个探测器之间的相对时间精度.

GECAM的标定工作可分为两个阶段: 地面标定和在轨标定. 地面标定的优势是地面标定源的能量和流强已知, 本底水平较简单, 可控因素较多, 因此可以较完整地得到探测器的响应函数. 在轨标定的标定源较少, 标定条件较复杂, 除了使用谱线监测增益变化, 不能独立得到完整的探测器响应函数, 只能对地面得到的探测器响应函数进行微调, 使其符合探测器的在轨性能状态.

(1) 地面标定

地面标定是指在地面利用放射源和X光机对探测器的响应进行标定. 其中放射源的能量范围较宽, 覆盖

能区5.9 keV–2.6 MeV, 可以充分地标定GECAM探测器的全能段响应. X光机的能区相对较窄, 覆盖8–200 keV, 但其能量连续可调, 适合精细标定. GECAM的溴化铯晶体在13.47和38.9 keV附近存在吸收边, 探测效率和EC关系在其附近发生跃变. 因此, 非线性的探测器响应函数需要在地面使用X光机准确的标定.

(2) 在轨标定

当卫星发射上天后, 其性能状态(如温度、晶体潮解等)与地面标定时不同, 因此需要重新标定其探测器响应函数. 需要在轨标定的项目如下所述.

能量-道数关系和能量-能量分辨关系的在轨标定: GRD探头使用的标定源为溴化铯晶体的3条特征谱线(37.4 keV, 511 keV, 1.47 MeV); CPD探头使用的标定源为内嵌的 ^{241}Am 放射源. 通过结合在轨标定源的特征峰位与地面标定的完整的探测器响应函数, 可以得到在轨的能量-道数关系和能量-能量分辨关系.

能量响应矩阵的在轨标定: 主要标定源为GECAM与其他空间项目共同观测到的暴发事件. 由于观察到的是同一个暴发事件, 因此暴发事件的入射能谱是一致的. 通过对GECAM的沉积能谱以及其他空间项目的沉积能谱进行联合拟合, 可以实现对此暴发事件的能量响应矩阵的交叉标定. 此外, 太阳耀发事件、已知亮源的地球掩饰事件也可用于能量响应矩阵的在轨标定.

温度、偏压与增益的在轨标定: 通过统计不同温度、不同偏压下的能量-道数对应关系, 可以提取在轨的温度、偏压与增益的关系. 需要注意, 受到晶体潮解、辐照损伤等因素的影响, 探测器性能会有大时间尺度的变化. 通过观察温度、偏压与增益的关系随时间的演化, 可以监视探测器的性能衰减.

其详细流程如图7所示.

3.4 科学数据产品的生产与发布

科学数据产品生产主要包括从编辑级数据到标定级数据产品的生产, 其中编辑级数据为卫星数传原始数据经解帧、源包提取、验证排序等处理形成的数据产品. 在编辑级数据基础上经数据分解、内容重组、标定等处理, 自动生成可向科学用户发布的标定数据产品.

如图8所示, 科学数据产品生产的主要工作流程如下. 针对不同类型的编辑级数据文件, 分别生成相应的

图 7 GECAM 卫星能量-道数对应关系在轨标定流程

Figure 7 GECAM energy-channel correspondence relationship on-orbit calibration process.

图 8 科学数据产品生产流程

Figure 8 Scientific data product production process.

任务配置单, 科学数据产品生成任务通过解析任务配置单执行数据产品生产任务, 调用相应的数据生产流程; 提取工程数据和标定数据文件, 结合载荷在轨实时状态完成科学数据标定工作; 对同一触发事件完成双星触发数据的匹配; 判断科学数据产品生产任务中数据处理质量, 形成科学数据质量分析报告; 如果标定数据或数据处理算法有更新, 则通过人工界面启动订购生产流程, 指定待处理数据时间范围和数据种类, 实现数据产品的重新生产和版本升级。

在标定级数据基础上, 通过人工设置参数对触发数据进行去本底、拟合等分析处理, 并按照暴发事件属性进行分类处理, 生成能谱、光变和定位等高级数据产品, 并生成暴发源表。

发布数据产品包括按照连续性数据、并道数据和触发/暴发数据分类输出的标定级FITS格式数据产品, 也包括在此基础上生成的高级数据产品, 高级数据产品包含FITS格式产品和JSON格式产品。FITS格式产品会存储于档案库并发布给科学用户下载, JSON格式产品和暴发源表会存储于触发暴发事件信息数据库并发布给科学用户浏览和检索。

4 信息平台

在数据产品生成后, 即进入产品的审核发布环节。GECAM信息平台是连结GECAM卫星触发/暴发事件信息及数据产品和科学用户的纽带。GECAM科学应用系统搭建了全新的信息平台 and 配套软件, 为数据发布提供服务。信息平台主要包括触发暴发事件信息数据库、数据档案库和门户网站三个部分。它们分别承担了内部自动化数据处理的中转、产出数据产品的汇总, 以及外部的数据发布工作。

信息平台将为全球伽马暴协同观测、引力波等多信使协同观测提供及时的信息。一方面, 信息平台将GECAM最新发现的有价值的暴发天体事件推送至GCN等协作网站, 另一方面, 科学用户也可以直接通过GECAM门户网站获取所需信息。详细的平台数据流程和各组成关系参见图9。

4.1 触发暴发事件信息数据库

科学应用系统内部的数据交互包含传统的FITS文件交互, 以及为快速响应伽马暴和引力波事件准备的JSON交互两种方式。存储于文件数据库的FITS文件(即上文中提到的数据产品, 图9中的红色线走向), 记录引力波事件高能电磁对应体最全面的信息。此外, 经过短报文数据的处理、地面的触发暴发事件搜索、触发暴发事件的快速处理等流程, 会生产有价值天体暴发事件信息, 包含流水线化自动处理后得出的 T_{90} 时间、定位坐标、Fluence、Flux、不同能谱的拟合参数等关键信息, 也包括来自其他探测设备发布的暴发事件的特征信息。这些信息会以JSON数据流方式汇总于触发暴发事件信息数据库, 这类数据流和文件被称为“CATALOG”, 缩写CAT, 即图9中有CAT标签的黑色线。CAT类数据文件不仅是发布信息用的文件, 也是应用系统各分系统通信的中介。暴发库接收CAT数据

的文件系统. 科学应用系统的文件数据库主要对发布、归档的数据产品文件提供存储和管理支持.

总体档案库汇总并储存科学应用系统各分系统生成的各级数据产品以及其他需要归档的信息. 数据产品库则存储经过总体档案库整理后的、用于发送给地面支撑系统的最终归档文件. 数据产品库实际为总体档案库专门用于归档的特殊组成部分, 部署于档案服务器. 数据发布库用于存储经过总体档案库整理后的, 发布至外部科学用户的文件. 其中三个产品库硬件分离, 确保数据的安全性和可靠性. 各档案库位置和关系参见图9.

文件数据库存储流程主要为: 各分系统利用中国科学院高能物理研究所计算中心高性能集群等计算资源, 流水线化自动处理触发和暴发的事件, 生产数据产品分别储存于总体档案库的指定空间, 科学应用系统总体整理并汇总于数据产品, 转移至数据产品库归档. 经值班人员于触发暴发事件信息数据库发布软件审批后, 传递可发布内容至对外数据发布库. 对外数据发布库和GECAM对外公开网站紧密结合, 提供外界科学用户下载所需数据进行进一步科学研究.

4.3 GECAM门户网站

门户网站(gecam.ihep.ac.cn)是GECAM项目主页,

除了常规的信息发布和收集功能外, 还负责发布最新、最全的GECAM对有价值天体事件的观测信息, 网站提供数据下载、快速浏览(Data Viewer)等服务, 以满足不同人员的使用需求.

5 结论

GECAM科学应用系统是开展GECAM卫星运行, 将GECAM在轨观测数据转化为科学探测结果, 为科学用户提供服务的平台. GECAM科学应用系统根据任务指标, 设计了全新的整套处理流程, 相配套的软件及其算法, 为引力波事件高能电磁对应体的探测提供支持与服务.

GECAM科学应用系统将根据地面标定测试和在轨标定观测, 结合模拟仿真, 获得标定数据并建立标定数据库; 对原始观测数据(0级数据)进行处理, 生产供科学用户使用的数据产品(1级数据); 进行触发暴发事件自动处理与发布; 建立科学值班系统, 对伽马暴等暂现源进行监测处理; 开发数据分析软件, 为科学用户提供数据分析的工具和环境; 支持科学用户开展联合观测和后随观测以及GECAM数据分析等工作.

GECAM科学应用系统计划于2020年底GECAM卫星发射前建成并投入使用.

参考文献

- 1 Shapiro S L, Teukolsky S A. Black holes, white dwarfs, and neutron stars: The physics of compact objects. *Phys Bull*, 1983, 35: 2
- 2 Woosley S E. Gamma-ray bursts from stellar mass accretion disks around black holes. *Astrophys J*, 1993, 405: 273–277
- 3 Eichler D, Livio M, Piran T, et al. Nucleosynthesis, neutrino bursts and γ -rays from coalescing neutron stars. *Nature*, 1989, 340: 126–128
- 4 Narayan R, Paczyński B, Piran T. Gamma-ray bursts as the death throes of massive binary stars. . arXiv: [astro-ph/9204001](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9204001)
- 5 Paczynski B. Cosmological gamma-ray bursts. *Acta Astron*, 1991, 41: 257–267
- 6 Falcke H, Rezzolla L. Fast radio bursts: The last sign of supramassive neutron stars. *Astron Astrophys*, 2014, 562: A137, arXiv: [1307.1409](https://arxiv.org/abs/1307.1409)
- 7 Hulse R A, Taylor J H. Discovery of a pulsar in a binary system. *Astrophys J*, 1975, 195: L51–L53
- 8 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 061102, arXiv: [1602.03837](https://arxiv.org/abs/1602.03837)
- 9 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. GW170817: Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. *Phys Rev Lett*, 2017, 119: 161101, arXiv: [1710.05832](https://arxiv.org/abs/1710.05832)
- 10 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](https://arxiv.org/abs/1710.06065)
- 11 Goldstein A, Veres P, Burns E, et al. An ordinary short gamma-ray burst with extraordinary implications: Fermi-GBM detection of GRB 170817A. *Astrophys J*, 2017, 848: L14, arXiv: [1710.05446](https://arxiv.org/abs/1710.05446)
- 12 Savchenko V, Ferrigno C, Kuulkers E, et al. INTEGRAL detection of the first prompt gamma-ray signal coincident with the gravitational-wave event GW170817. *Astrophys J*, 2017, 848: L15, arXiv: [1710.05449](https://arxiv.org/abs/1710.05449)

- 13 Mészáros P, Fox D B, Hanna C, et al. Multi-messenger astrophysics. *Nat Rev Phys*, 2019, 1: 585–599, arXiv: [1906.10212](#)
- 14 Ayala Solares H A, Coutu S, Cowen D F, et al. The astrophysical multi-messenger observatory network: Performance and science program 2020. *Astropart Phys*, 2019, 114: 68
- 15 Wang Y Z, Huang Y J, Liang Y F, et al. GRB 111005A at $z = 0.0133$ and the prospect of establishing long-short GRB/GW association. *Astrophys J*, 2017, 851: L20, arXiv: [1710.04781](#)
- 16 Jin Z P, Li X, Wang H, et al. Short GRBs: Opening angles, local neutron star merger rate, and off-axis events for GRB/GW association. *Astrophys J*, 2018, 857: 128, arXiv: [1708.07008](#)
- 17 Guo Q, Wei D, Wang Y. The luminosity distribution of short gamma-ray bursts under a structured jet scenario. *Astrophys J*, 2020, 894: 11, arXiv: [2006.02748](#)
- 18 Meegan C, Lichti G, Bhat P N, et al. The Fermi gamma-ray burst monitor. *Astrophys J*, 2009, 702: 791–804, arXiv: [0908.0450](#)
- 19 Blackburn L, Briggs M S, Camp J, et al. High-energy electromagnetic offline follow-up of LIGO-Virgo gravitational-wave binary coalescence candidate events. *Astrophys J Suppl Ser*, 2015, 217: 8, arXiv: [1410.0929](#)
- 20 Blackburn L, Briggs M S, Camp J, et al. Techniques for targeted Fermi-GBM follow-up of gravitational-wave events. In: Proceedings of the 4th International Fermi Symposium: Monterey, California, 2012. . arXiv: [1303.2174](#)
- 21 Kocevski D, Burns E, Goldstein A, et al. Analysis of sub-threshold short gamma-ray bursts in Fermi GBM data. *Astrophys J*, 2018, 862: 152, arXiv: [1806.02378](#)

Introduction of the scientific application system of GECAM

CHEN Wei^{1,2}, SONG LiMing^{1,2,3*}, ZHENG ShiJie^{1,2}, MA Xiang^{1,2}, HUANG Yue^{1,2,3},
WANG Ping^{1,2}, LI XiaoBo^{1,2}, QIAO Rui^{1,2}, SONG XinYing^{1,2}, ZHANG HongMei²,
XIONG ShaoLin^{1,2}, PENG WenXi^{1,2}, LI Bing^{1,2}, ZHAO XiaoYun^{1,2}, GUO DongYa^{1,2}, CAI
Ce^{1,2,3}, CHEN Gang^{2,3}, DUAN Jing^{1,2,3}, LI Chao^{1,5}, LI JianHui¹, LI QingXin^{1,5}, OU Ge²,
SHI DongLi^{1,4}, SUN GongXing², WANG WenShuai², XIAO Shuo^{1,2,3}, YAO Min^{1,4},
ZHANG Kai^{1,6}, ZHANG Peng^{1,4} & ZHAO ShiYi^{1,4}

¹ Key Laboratory of Particle Astrophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

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

³ School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100871, China;

⁴ Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

⁵ School of Physics and Optoelectronics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China;

⁶ College of Physics and Engineering, Qufu Normal University, Qufu 273165, China

The direct detection of gravitational waves has started a new era of gravitational wave astronomy. As an important method for studying the counterparts of gravitational waves, the observation and search of the multi-wavelength radiation of the electromagnetic counterpart of gravitational waves has become the research focus in the field of astronomy. With the advancement of gravitational wave detectors, the number of gravitational wave samples has dramatically increased and the detection of gravitational wave electromagnetic counterparts has become very promising. The Gravitational wave high-energy Electromagnetic Counterpart All-sky Monitor (GECAM) satellite is a full-sky monitoring telescope designed for detecting high-energy electromagnetic counterparts of gravitational wave events. The main reason for designing a scientific application system of GECAM satellites, which is proposed and designed with an emphasis on discovery, is to ensure the scientific operation of the payload of satellites and achieve the production, storage, processing, calibration, release, and analysis of scientific data. It is also designed to provide technical support and services to scientific users. Based on the exploration and research of the gravitational wave electromagnetic counterpart, this article introduces an innovative monitoring method design of the GECAM scientific application system for the gravitational electromagnetic counterpart, namely, the scheme design of the GECAM scientific application system. The design covers system architecture, interface control, main technical processes, functional composition, and software planning and design. The GECAM satellite is scheduled for launch by the end of 2020. By then, the scientific application system will be able to support the satellite's in-orbit scientific operation and research.

gravitational wave, gamma-ray burst, electromagnetic counterpart, scientific application system

PACS: 95.55.Ka, 95.55.Ym, 98.70.Rz, 07.05.-t

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0389](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0389)